



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis multicriterio de técnicas de almacenamiento de hidrógeno

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Adrián López Granados

DIRECTORA: Rocío Maceiras Castro

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis multicriterio de técnicas de almacenamiento de hidrógeno

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

Este trabajo aborda un análisis exhaustivo de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, un vector energético clave en la transición hacia sistemas sostenibles. Se ha realizado un estudio detallado sobre las diferentes alternativas de almacenamiento, considerando aspectos como seguridad, eficiencia, impacto ambiental, coste e implementación. Para evaluar de manera objetiva estas tecnologías, se han aplicado dos métodos de análisis multicriterio: AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) y TOPSIS (Técnica para la Ordenación de Preferencias según la Similitud con la Solución Ideal). El estudio se ha dividido en dos enfoques: en primer lugar, una evaluación general sobre el almacenamiento de hidrógeno y, posteriormente, enfocado en el sector marítimo, especialmente en buques, adaptando los criterios a los desafíos específicos de la industria naval.

Además de la aplicación de estos métodos, se ha llevado a cabo un estudio en profundidad sobre el hidrógeno, un vector clave en la transición energética hacia una economía descarbonizada y sostenible, analizando sus propiedades, aplicaciones y su papel en el desarrollo de sistemas energéticos sostenibles.

PALABRAS CLAVE

Hidrógeno, almacenamiento, análisis multicriterio, AHP, TOPSIS

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, a mi familia y amigos.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	10
1.1 Justificación y motivación	10
1.2 Objetivos	11
1.3 Estructura del proyecto	11
2 Estado del arte	13
2.1 Antecedentes, propiedades y aplicaciones del hidrógeno	13
2.1.1 Antecedentes.....	13
2.1.2 Propiedades.....	14
2.1.3 Aplicaciones	14
2.2 Producción	15
2.2.1 Introducción.....	15
2.2.2 Electrolisis	16
2.2.3 Reformado de vapor	17
2.2.4 Gasificación del carbón	17
2.2.5 Oxidación parcial de hidrocarburos.....	17
2.2.6 Biomasa	17
2.2.7 Producción fotobiológica.....	18
2.3 Almacenamiento	18
2.3.1 Introducción.....	18
2.3.2 Almacenamiento físico	19
2.3.2.1 Hidrógeno comprimido	19
2.3.2.2 Hidrógeno líquido.....	20
2.3.2.3 Hidrógeno crio-comprimido.....	20
2.3.3 Almacenamiento basado en materiales.....	20
2.3.3.1 Hidrógeno químico.....	20
2.3.3.2 Hidruros complejos	21
2.3.3.3 Hidruros intersticiales.....	21
2.3.3.4 Líquidos orgánicos	21
2.3.3.5 Adsorbentes	22
2.4 Métodos de decisión multicriterio.....	23
2.4.2.1 Métodos de puntuación directa.....	24

2.4.2.2 Métodos basados en la distancia	24
2.4.2.3 Métodos de comparación por pares	24
2.4.2.4 Métodos de superación	25
2.4.2.5 Métodos basados en funciones de utilidad o valor	25
3 Desarrollo del TFG	26
3.1 Método AHP	26
3.1.1 Generalidades	26
3.1.2 Matriz de comparaciones pareadas	28
3.1.3 Cálculo del vector propio y ponderación de alternativas	29
3.1.4 Consistencia del método	30
3.1.5 Elección de la alternativa óptima	31
3.2 Método TOPSIS	32
3.2.1 Matriz de decisión normalizada	33
3.2.2 Ponderación de la matriz de decisión	33
3.2.3 Determinación de la solución ideal positiva y negativa	34
3.2.4 Cálculo de las distancias al ideal positivo y al ideal negativo	34
3.2.5 Cálculo del ratio de proximidad/lejanía	34
3.3 Alternativas de almacenamiento de hidrógeno	34
3.3.1 Compuestos con base de carbono	34
3.3.1.1 Nanotubos de carbono (CNTs)	35
3.3.1.2 Grafeno y sus derivados	36
3.3.2 Metal-Organic Frameworks (MOFs)	36
3.3.3 Hidruros metálicos	38
3.3.4 Hidrógeno comprimido en estado gaseoso	40
3.4 Criterios seleccionados para la comparación de alternativas	42
3.4.1 Seguridad	43
3.4.2 Eficiencia del ciclo	44
3.4.3 Capacidad de almacenamiento	45
3.4.4 Durabilidad y ciclo de vida	45
3.4.5 Madurez tecnológica	46
3.4.6 Coste del sistema	47
3.4.7 Escalabilidad	47
3.4.8 Impacto ambiental	48
4 Resultados y Discusión	50
4.1 Resultados método AHP	50
4.1.1 Seguridad	50

4.1.2 Eficiencia	52
4.1.3 Capacidad de almacenamiento	53
4.1.4 Durabilidad y ciclo de carga	54
4.1.5 Madurez tecnológica.....	55
4.1.6 Impacto ambiental	56
4.1.7 Coste	58
4.1.8 Escalabilidad.....	59
4.1.9 Resultados finales	60
4.2 Resultados método TOPSIS.....	61
5 Caso de estudio.....	65
5.1 Introducción al hidrógeno como posible alternativa de combustible en el sector marítimo...	65
5.2 La pila de combustible	66
5.2.1 Antecedentes.....	67
5.2.2 Funcionamiento	67
5.2.3 Tipos de pilas de combustible.....	68
5.3 Almacenamiento de hidrógeno a bordo	68
5.3.1 Hidrógeno comprimido.....	69
5.3.2 Hidruros metálicos.....	69
5.3.3 Hidrógeno líquido	70
5.4 Criterios utilizados para el estudio.....	74
5.4.1 Seguridad	74
5.4.2 Autonomía	75
5.4.3 Impacto ambiental	76
5.4.4 Coste	76
5.4.5 Implementación	77
5.5 Método AHP	78
5.6 Método TOPSIS	79
6 Conclusiones y líneas futuras	83
6.1 Conclusiones	83
6.2 Líneas futuras	84
7 Bibliografía.....	85
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	91
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	92
Anexo III: Matrices de comparaciones pareadas, normalización de estas y consistencias de los criterios utilizados para el método AHP aplicado al caso de estudio	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Energía del futuro, un mundo sin emisiones	10
Figura 2-1 Theophrastus Phillippus Aureolus Bombastus Von Hohenheim ("Paracelso") [6]	13
Figura 2-2 Proceso de producción de hidrógeno	15
Figura 2-3 Principales rutas en la producción de hidrógeno [9]	16
Figura 2-4 Clasificación y tipos de almacenamiento de hidrógeno (autoría propia, basado en [13])	18
Figura 2-5 Tanque de hidrógeno de alta presión en una planta química [14]	19
Figura 2-6 Estructura atómica del alano $Mg(AlH_4)_2$ [22]	21
Figura 2-7 Potenciales LOHC usados en la actualidad [26]	22
Figura 3-1 Estructura jerárquica modelo AHP (autoría propia)	27
Figura 3-2 Diagrama de flujo método AHP (autoría propia)	28
Figura 3-3 Modelo matemático aplicado a las matrices de comparación pareada	29
Figura 3-4 Método TOPSIS	32
Figura 3-5 Diagrama de flujo TOPSIS	33
Figura 3-6 Diagrama esquemático del mecanismo spillover [50]	35
Figura 3-7 Nanotubos de carbono vistos mediante microscopía electrónica de transmisión. Fuente: CSIC	36
Figura 3-8 Estructura de un nanotubo de carbono. Fuente: CSIC	36
Figura 3-9 Unidades básicas que forman la red de del MOF-5, uno de los utilizados para almacenar hidrógeno [51]	37
Figura 3-10 Capacidad de almacenamiento del MOF V2Cl2.8 [55]	37
Figura 3-11 Clasificación de los hidruros [58]	39
Figura 3-12 Comparación del contenido gravimétrico de diferentes hidruros metálicos [59]	39
Figura 3-13 Número de publicaciones sobre almacenamiento y seguridad en tanques de hidrógeno en la base de datos Scopus	40
Figura 3-14 Ventajas del hidrógeno comprimido (autoría propia, basado en [60])	41
Figura 3-15 Tipos de tanques de hidrógeno y sus características [60]	41
Figura 3-16 Ponderación de los criterios seleccionados para el análisis	43
Figura 3-17 Evaluación de la seguridad de las alternativas de almacenamiento	44
Figura 3-18 Evaluación de la eficiencia del ciclo	45
Figura 3-19 Evaluación de la capacidad de almacenamiento	45
Figura 3-20 Evaluación de la durabilidad y el ciclo de vida	46
Figura 3-21 Evaluación de la madurez tecnológica	46
Figura 3-22 Evaluación del coste	47
Figura 3-23 Evaluación de la escalabilidad	48
Figura 3-24 Evaluación impacto ambiental	48

Figura 4-1 Importancia relativa de cada alternativa para C1	52
Figura 4-2 Importancia relativa de cada alternativa para C2	53
Figura 4-3 Importancia relativa de cada alternativa para C3	54
Figura 4-4 Importancia relativa de cada alternativa para C4	55
Figura 4-5 Importancia relativa de cada alternativa para C5	56
Figura 4-6 Importancia relativa de cada alternativa para C6	57
Figura 4-7 Importancia relativa de cada alternativa para C7	59
Figura 4-8 Importancia relativa de cada alternativa para C8	60
Figura 4-9 Representación gráfica de los resultados obtenidos en el método AHP.....	61
Figura 4-10 Resultados obtenidos método TOPSIS.....	63
Figura 4-11 Comparativa de los resultados obtenidos en cada método	64
Figura 5-1 Técnicas de almacenamiento de hidrógeno a bordo (autoría propia, basado en [61]) ...	65
Figura 5-2 Entradas y salidas en una pila de combustible de hidrógeno.....	66
Figura 5-3 Sir William Robert Grove [81]	67
Figura 5-4 Esquema de funcionamiento básico de un pila de combustible [82].....	68
Figura 5-5 H ₂ Barge 1, primer carguero fluvial propulsado por hidrógeno [84]	69
Figura 5-6 Submarino alemán Tipo 212 navegando en superficie [86]	70
Figura 5-7 Buque propulsado por GNL [87].....	71
Figura 5-8 Diseño 3D de un barco mercante propulsado por hidrógeno líquido [89]	71
Figura 5-9 Futuro buque GAIA de hidrógeno [90]	72
Figura 5-10 Ferry MF Hydra [91]	72
Figura 5-11 Evaluación de la seguridad de las alternativas	75
Figura 5-12 Evaluación de la autonomía de las alternativas de almacenamiento	76
Figura 5-13 Evaluación del coste de las alternativas.....	77
Figura 5-14 Evaluación de la implementación de las alternativas	77
Figura 5-15 Representación gráfica de los resultados obtenidos en el método AHP.....	78
Figura 5-16 Resultados obtenidos método TOPSIS.....	80
Figura 5-17 Comparativa de los resultados obtenidos en cada método para el caso de estudio	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Propiedades termodinámicas a 25°C y 1 atm [8, 11].	14
Tabla 2-2 Clasificación de los métodos MADM (autoría propia).	24
Tabla 3-1 Escala de valores de Saaty (autoría propia, basado en [35]).	27
Tabla 3-2 Valores máximos de la Razón de Consistencia (autoría propia, basado en [35]).	30
Tabla 3-3 Valores del Índice Aleatorio (autoría propia basado en [44]).	31
Tabla 3-4 Ponderación de criterios.	32
Tabla 3-5 Resumen alternativas en función de los criterios.	49
Tabla 4-1 Matriz de ponderación de criterios.	50
Tabla 4-2 Matriz de comparaciones pareadas para C1.	51
Tabla 4-3 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C1.	51
Tabla 4-4 Vectores propios de las alternativas para C1.	51
Tabla 4-5 Verificación de la consistencia del método para C1.	51
Tabla 4-6 Matriz de comparaciones pareadas para C2.	52
Tabla 4-7 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C2.	52
Tabla 4-8 Vectores propios de las alternativas para C2.	52
Tabla 4-9 Verificación de la consistencia del método para C2.	52
Tabla 4-10 Matriz de comparaciones pareadas para C3.	53
Tabla 4-11 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C3.	53
Tabla 4-12 Vectores propios de las alternativas para C3.	53
Tabla 4-13 Verificación de la consistencia del método para C3.	54
Tabla 4-14 Matriz de comparaciones pareadas para C4.	54
Tabla 4-15 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C4.	54
Tabla 4-16 Vectores propios de las alternativas para C4.	55
Tabla 4-17 Verificación de la consistencia del método para C4.	55
Tabla 4-18 Matriz de comparaciones pareadas para C5.	55
Tabla 4-19 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C5.	56
Tabla 4-20 Vectores propios de las alternativas para C5.	56
Tabla 4-21 Verificación de la consistencia del método para C5.	56
Tabla 4-22 Matriz de comparaciones pareadas para C6.	57
Tabla 4-23 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C6.	57
Tabla 4-24 Vectores propios de las alternativas para C6.	57
Tabla 4-25 Verificación de la consistencia del método para C6.	57
Tabla 4-26 Matriz de comparaciones pareadas para C7.	58
Tabla 4-27 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C7.	58

Tabla 4-28 Vectores propios de las alternativas para C7	58
Tabla 4-29 Verificación de la consistencia del método para C7	58
Tabla 4-30 Matriz de comparaciones pareadas para C8.....	59
Tabla 4-31 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C8.....	59
Tabla 4-32 Vectores propios de las alternativas para C8	59
Tabla 4-33 Verificación de la consistencia del método para C8	59
Tabla 4-34 Múltiplo de la matriz de vectores propios y la ponderación de criterios	60
Tabla 4-35 Resultados del método multicriterio AHP	60
Tabla 4-36 Matriz de decisión método TOPSIS	61
Tabla 4-37 Matriz de decisión normalizada método TOPSIS.....	62
Tabla 4-38 Ponderación de criterios método TOPSIS	62
Tabla 4-39 Matriz de decisión normalizada ponderada	62
Tabla 4-40 Cifras ideales para cada criterio	62
Tabla 4-41 Vector diferencia con ideal positivo	63
Tabla 4-42 Vector diferencia con ideal negativo	63
Tabla 4-43 Ratio de proximidad/lejanía método TOPSIS.....	63
Tabla 5-1 Tipos de pilas de combustible. Fuente: APPICE	68
Tabla 5-2 Comparativa de almacenamiento de hidrógeno a bordo	73
Tabla 5-3 Buques operados por hidrógeno en la actualidad [92]	73
Tabla 5-4 Buques en desarrollo que serán propulsados por hidrógeno [92]	74
Tabla 5-5 Múltiplo de la matriz de vectores propios y la ponderación de criterios	78
Tabla 5-6 Resultados finales método AHP caso de estudio	78
Tabla 5-7 Matriz de decisión método TOPSIS	79
Tabla 5-8 Matriz de decisión normalizada método TOPSIS.....	79
Tabla 5-9 Ponderación de criterios método TOPSIS	79
Tabla 5-10 Matriz de decisión normalizada ponderada	79
Tabla 5-11 Cifras ideales para cada criterio	80
Tabla 5-12 Vector diferencia con ideal positivo	80
Tabla 5-13 Vector diferencia con ideal negativo	80
Tabla 5-14 Ratio de proximidad/lejanía método TOPSIS.....	80
Tabla A3- 1 Matriz de comparaciones pareadas para C1.....	93
Tabla A3- 2 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C1.....	93
Tabla A3- 3 Vectores propios de las alternativas para C1	93
Tabla A3- 4 Verificación de la consistencia del método para C1	93
Tabla A3- 5 Matriz de comparaciones pareadas para C2.....	93
Tabla A3- 6 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C2.....	93

Tabla A3- 7 Vectores propios de las alternativas para C2	94
Tabla A3- 8 Verificación de la consistencia del método para C2	94
Tabla A3- 9 Matriz de comparaciones pareadas para C3.....	94
Tabla A3- 10 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C3.....	94
Tabla A3- 11 Vectores propios de las alternativas para C3	94
Tabla A3- 12 Verificación de la consistencia del método para C3	94
Tabla A3- 13 Matriz de comparaciones pareadas para C4.....	94
Tabla A3- 14 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C4.....	95
Tabla A3- 15 Vectores propios de las alternativas para C4	95
Tabla A3- 16 Verificación de la consistencia del método para C4	95
Tabla A3- 17 Matriz de comparaciones pareadas para C5.....	95
Tabla A3- 18 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C5.....	95
Tabla A3- 19 Vectores propios de las alternativas para C5	95
Tabla A3- 20 Verificación de la consistencia del método para C4	95

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Justificación y motivación

En los últimos años, el hidrógeno ha emergido como un vector energético clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible; basado en alternativas sin emisiones como las mostradas en la Figura 1-1. Su versatilidad y capacidad para integrarse en múltiples sectores lo han convertido en una alternativa prometedora frente a los combustibles fósiles. Desde la industria del transporte hasta la generación de energía, su uso se ha expandido significativamente gracias a avances tecnológicos que han permitido mejorar su producción, almacenamiento y distribución [1].

Una de las principales razones de este crecimiento es la alta densidad energética del hidrógeno en relación con su masa, lo que lo hace especialmente atractivo para aplicaciones que requieren grandes cantidades de energía con bajas emisiones. Además, su producción puede aprovechar fuentes renovables mediante electrólisis, reduciendo la dependencia de combustibles convencionales [2]. En este sentido, organismos públicos como el ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico [3] han establecido estrategias para impulsar su adopción a gran escala, con el objetivo de alcanzar la neutralidad en carbono en las próximas décadas.



Figura 1-1 Energía del futuro, un mundo sin emisiones

A pesar de sus ventajas, el hidrógeno también presenta importantes desafíos. Su almacenamiento y transporte siguen siendo problemáticos debido a su baja densidad volumétrica y a la necesidad de mantener condiciones específicas, como altas presiones o temperaturas extremadamente bajas. Además, su producción aún depende en gran medida de procesos que utilizan combustibles fósiles, lo que limita su impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Estas barreras han llevado a una intensificación de la investigación en nuevas tecnologías de almacenamiento, buscando soluciones más eficientes y seguras para su uso en diferentes sectores.

La motivación de este proyecto radica en la necesidad de disponer de una herramienta analítica que permita comparar de manera objetiva las diferentes alternativas de almacenamiento de hidrógeno existentes. Al evaluar sus ventajas y limitaciones, se pretende contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes que faciliten la integración del hidrógeno en un sistema energético sostenible y viable a largo plazo.

1.2 Objetivos

Este Trabajo de Fin de Grado analiza las distintas formas de almacenar hidrógeno, explorando las distintas tecnologías disponibles para determinar cuáles ofrecen un equilibrio óptimo entre viabilidad y sostenibilidad. Dada la creciente relevancia del hidrógeno como vector energético, resulta necesario analizar sus métodos de almacenamiento desde una perspectiva amplia y multidisciplinar.

Para ello, primero se llevará a cabo un recorrido por las principales alternativas actuales: almacenamiento en estado gaseoso, líquido y sólido, destacando sus principios de funcionamiento y sus implicaciones técnicas. Una vez establecida esta base, se procederá a una evaluación comparativa mediante un enfoque de toma de decisiones multicriterio, con el objetivo de arrojar luz sobre cuál de estas opciones se ajusta mejor a los retos y necesidades del sector.

El análisis se estructurará en torno a cuatro pilares fundamentales. Desde el punto de vista logístico, se examinarán factores como la accesibilidad a los materiales, la infraestructura requerida y los costes asociados a cada tecnología. En el plano medioambiental, se valorará el impacto en la reducción de emisiones. La perspectiva técnica permitirá evaluar el grado de desarrollo de cada tecnología y su viabilidad para aplicaciones reales. Por último, la seguridad será un criterio clave, pues cualquier método de almacenamiento debe garantizar estándares adecuados para minimizar riesgos.

Más allá de ofrecer una mera comparación, este trabajo aspira a proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en un sector que avanza a pasos agigantados. Identificar la alternativa más adecuada no solo facilitará el despliegue eficiente del hidrógeno como fuente de energía, sino que contribuirá al desarrollo de soluciones más sostenibles y robustas de cara al futuro.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es comparar las principales alternativas de almacenamiento de hidrógeno mediante un método de análisis multicriterio.

Además de dicho objetivo principal, existe el objetivo específico de aplicar dicha herramienta de análisis multicriterio en el sector marítimo; donde el hidrógeno está empezando a jugar un papel importante que se verá aún más acentuado en el futuro.

1.3 Estructura del proyecto

Con el propósito de simplificar la comprensión del estudio y obtener una perspectiva ordenada de los temas que se abordan en él, se ha organizado de la siguiente forma:

Introducción y objetivos: esta sección tiene como propósito explicar las razones que han motivado la realización de este estudio y los objetivos que se pretende alcanzar. Además, se detalla la estructura del trabajo con el fin de proporcionar una visión clara y ordenada que facilite su comprensión.

Estado del arte: este apartado tiene como propósito contextualizar y fundamentar el análisis de las distintas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. Se establece así un marco sólido para la posterior

evaluación comparativa, facilitando la identificación de las soluciones más viables y eficientes para el almacenamiento de hidrógeno en un contexto energético sostenible.

Desarrollo del TFG: el objetivo de este capítulo es aplicar de manera estructurada y fundamentada los métodos de análisis definidos para la evaluación de las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. A través de este enfoque metodológico, se busca garantizar un análisis riguroso y objetivo que permita comparar las distintas alternativas bajo un marco sistemático.

Resultados y discusión: este punto tiene como propósito presentar y analizar los datos obtenidos tras la aplicación de los métodos de evaluación multicriterio a las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. Este análisis permite comparar el desempeño de cada tecnología en función de los criterios establecidos, proporcionando una visión cuantitativa de sus ventajas y limitaciones.

Caso de estudio: en este apartado se busca aplicar el análisis multicriterio en un contexto específico, centrado en la viabilidad del almacenamiento de hidrógeno en el ámbito marítimo. En esta sección se redefine el conjunto de criterios de evaluación para adaptarlos a las particularidades del ámbito naval. Con ello, se busca aportar un enfoque práctico y aplicado que complemente el análisis teórico previo, contribuyendo a la toma de decisiones en la adopción del hidrógeno como fuente de energía en buques.

Conclusiones y líneas futuras: el último capítulo del TFG tiene como propósito sintetizar los principales hallazgos obtenidos a lo largo del estudio, destacando las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno que han demostrado mayor viabilidad en función de los criterios evaluados. se reflexiona sobre las implicaciones del uso del hidrógeno como vector energético, tanto en el ámbito general como en el sector marítimo, evaluando su impacto en términos de sostenibilidad y eficiencia. Por último, se plantean posibles líneas de investigación futura, enfocadas en la optimización de las tecnologías estudiadas, la mejora de los métodos de análisis multicriterio y la integración del hidrógeno en nuevas aplicaciones, con el objetivo de seguir avanzando hacia un sistema energético más limpio y eficiente.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes, propiedades y aplicaciones del hidrógeno

2.1.1 Antecedentes

La historia del hidrógeno se remonta a unos quinientos años atrás, cuando T. Von Hohenheim, más conocido como Paracelso, descubrió que, al mezclar metales con ácidos fuertes, se liberaba un gas durante la reacción. Sin embargo, Paracelso no identificó que ese gas correspondía a un nuevo elemento químico. Tuvieron que pasar aproximadamente ciento cincuenta años hasta que, en 1671, Robert Boyle redescubrió esta reacción utilizando limaduras de hierro y ácidos diluidos, reconociendo que el gas emitido era hidrógeno en estado gaseoso [5].



Figura 2-1 Theophrastus Phillippus Aureolus Bombastus Von Hohenheim ("Paracelso") [6]

En 1766 Henry Cavendish identificó lo que llamó "aire inflamable" mientras realizaba experimentos con ácidos y mercurio. Aunque inicialmente cometió el error de pensar que el gas provenía del mercurio y no del ácido, años más tarde, en 1781, descubrió que dicho "aire inflamable" se combinaba con el oxígeno al arder, produciendo agua como resultado. En 1783, Antonie Lavoisier bautizó este gas con el nombre de hidrógeno, que en latín significa "generador de (genos) agua (hydro)" [7]. Posteriormente, en 1832, Michael Faraday logró establecer las leyes que rigen el proceso de electrólisis, permitiéndole obtener hidrógeno a partir de agua mediante este método [8].

La producción industrial de hidrógeno comenzó en la década de 1920. En este siglo se consiguieron grandes avances en el uso del hidrógeno como la incorporación de pilas de combustible en misiones espaciales por la NASA en 1962 o la creación del primer automóvil impulsado por hidrógeno, en 1970, aumentando así los campos de uso de este. No fue hasta el presente siglo, en 2003, cuando se firmó el

primer acuerdo internacional “International Partnership on Hydrogen Economy”, impulsando la cooperación global en esta tecnología [8].

2.1.2 Propiedades

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, con un peso del 92%; siendo en forma de agua como generalmente se le encuentra, aunque también en compuestos de nitrógeno y carbono. Se trata del elemento más simple de la tabla periódica, contando únicamente con un protón y un electrón y se encuentra en la naturaleza en forma diatómica [8].

En condiciones estándar, el hidrógeno se presenta como una sustancia en forma de gas, incolora, inodora, insípida e inflamable. No es hasta que se somete a presiones muy elevadas y/o temperaturas muy bajas (de hasta -250 °C [9]) cuando el gas cambia a las fases de líquido o gas. Este fenómeno es debido a las débiles fuerzas de atracción que presentan sus moléculas. Esta débil atracción molecular se verifica también ya que la expansión de hidrógeno de alta a baja presión a temperatura ambiente produce un aumento de su temperatura, al contrario que los demás gases. Posee tres isótopos naturales (^1H , ^2H y ^3H) [9]

Una de las propiedades por el que es muy utilizado es que al combinar átomos de carbono para formar moléculas se libera mucho calor y energía (103,4 kcal [10]), haciendo así que sea muy útil en diferentes ámbitos. Las propiedades termodinámicas del hidrógeno en condiciones estándar (25 °C y 1 atm) se reflejan en la Tabla 2-1:

Propiedades	Valores
Volumen específico (m^3/kg)	12,1000
Temperatura de evaporación (°C)	252,7600
Punto de fusión (°C)	259,1000
Masa atómica (kg/mol)	1,0080
Calor específico a presión constante ($\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$)	28,6230
Calor específico a volumen constante ($\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$)	20,3090
Densidad	
Gas (g/L)	0,0899
Líquido (g/mL)	0,0708
Sólido (g/mL)	0,0706

Tabla 2-1 Propiedades termodinámicas a 25°C y 1 atm [8, 11].

Por último, una de las propiedades más importantes y que supone que países como Estados Unidos y la Unión Europea apuesten por una economía energética basada en el hidrógeno es que su combustión sólo libera vapor de agua, libre de CO_2 ; al igual que la electricidad producida por vía renovable y nuclear, apostando así por un modelo energético mucho más beneficioso para el medio ambiente [11].

2.1.3 Aplicaciones

El hidrógeno, desde su descubrimiento, ha sido utilizado para numerosos procesos, algunos muy dispares entre sí. Sin embargo, donde mayor impacto útil ha creado ha sido en la industria petroquímica; donde es utilizado para reducir la cantidad de partículas, aromáticos y, sobre todo, azufre presentes en la gasolina y el gasóleo [9].

Otro de los usos más comunes que se le da al hidrógeno es en la fabricación de amoníaco mediante el proceso Haber-Bosch; en el que se consume alrededor de dos tercios de la producción mundial de hidrógeno. Además, es también muy utilizado en la creación de metanol [10].

Una de las aplicaciones más importantes del hidrógeno es en procesos catalíticos de compuestos orgánicos como pueden ser aceites animales y vegetales y grasas; los cuales son hidrogenados para mejorar sus propiedades oxidativas, en caso del aceite, y para lograr convertirse las grasas en sólidas o semisólidas, como las mantecas o margarinas [11]. Esto se conoce como “hidrogenación”, y se emplea también en otros alimentos como la soja, los cacahuetes, cereales y el pescado.

El hidrógeno ha sido también utilizado como combustible primario de cohetes debido a su alta velocidad de inflamación con amplios límites de inflamabilidad; además de ser escogido como propulsor de cohetes nucleares y vehículos espaciales. Esta propiedad hace que su uso deba de hacerse en condiciones de seguridad óptimas; ya que el hidrógeno prende mucho más fácil que otros combustibles como la gasolina o el gas natural. Por ello, es importante que los sistemas de hidrógeno cuenten con ventilaciones adecuadas y detectores de fugas; además de detectores de llama ya que el hidrógeno produce al quemarse una llama prácticamente invisible [10].

El hidrógeno ha sido estudiado como vector energético desde la década de 1970, cuando la crisis del petróleo impulsó la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles. Su interés ha crecido en los últimos años debido a la necesidad de reducir las emisiones de carbono y almacenar energía renovable de forma eficiente. En movilidad, el hidrógeno se usa en celdas de combustible para generar electricidad y propulsar vehículos, ofreciendo una autonomía mayor y tiempos de recarga más rápidos en comparación con las baterías eléctricas [11]. Sin embargo, la tecnología aún enfrenta desafíos como los altos costes de producción del hidrógeno verde y la falta de infraestructura para su distribución. Actualmente, se encuentra en una fase de expansión temprana, con proyectos piloto en transporte pesado, aviación y redes eléctricas, respaldados por políticas gubernamentales e inversiones en innovación.

En conclusión, las aplicaciones de este elemento son muy diversas, desde la industria hasta el sector del transporte, la alimentación y la energía; quedando aún mucho por investigar y descubrir

2.2 Producción

2.2.1 Introducción

El hidrógeno no se encuentra en la naturaleza en su estado elemental; por lo que ha de ser producido a partir de otras fuentes como el agua o el gas natural mediante el aporte de energía, liberándose hidrógeno, subproductos y energía. La dificultad que se presenta en la producción del hidrógeno reside en separarlo de sus compuestos naturales.



Figura 2-2 Proceso de producción de hidrógeno

Se estima que la producción mundial de hidrógeno a día de hoy está en torno a las 60 millones de toneladas anuales [9], cifra insuficiente a la demanda actual, por lo que es evidente que es preciso producir hidrógeno de manera masiva y a partir de una elevada diversidad de fuentes para garantizar así el abastecimiento energético. Una de las principales clasificaciones más sencillas que se puede hacer es observando si se producen emisiones de CO₂ a lo largo de todo el proceso de producción. Cuando se

obtiene hidrógeno a partir de combustibles fósiles, este hidrógeno es denominado como sucio ya que ha implicado la emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, si se produce a partir de agua con un aporte energético procedente de fuentes renovables, durante la vida completa del hidrógeno no se habrían producido emisiones de CO₂; por lo que es conocido como hidrógeno limpio. Existen ciertos compuestos que están en el límite como son la biomasa y la energía nuclear [11].

Sin embargo, no siempre se produce de la misma manera, pues existen varias formas en función de la materia prima que se utilice. El hidrógeno, como se muestra en la Figura 2-3, puede producirse por rutas electroquímicas, bioquímicas, termoquímicas y fotoquímicas; además de otros caminos más complejos y mucho menos comunes como el pulsado láser o el plasma [9].

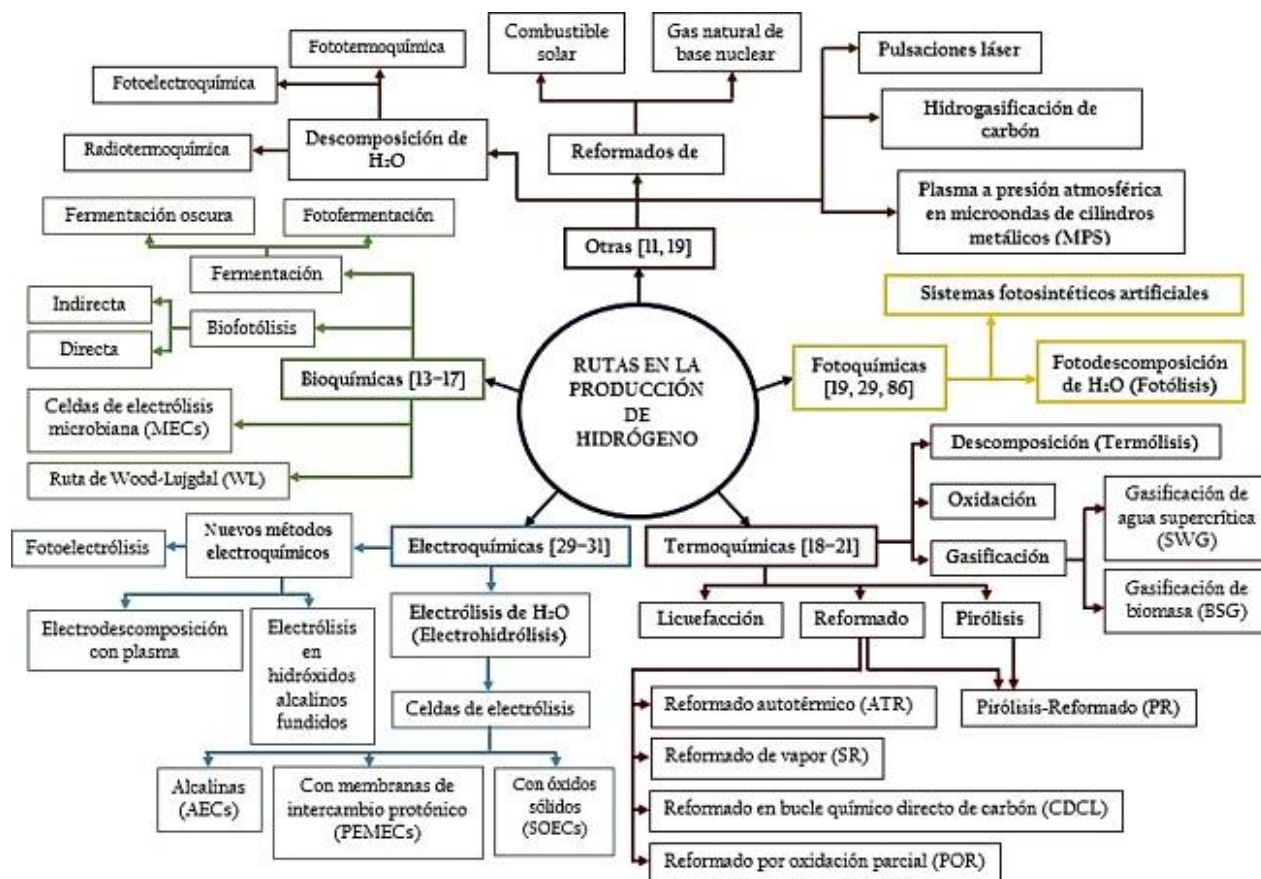


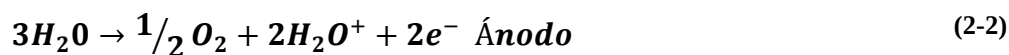
Figura 2-3 Principales rutas en la producción de hidrógeno [9]

Es importante destacar que cada uno de estos procesos se compara principalmente por la eficiencia térmica de cada uno; es decir, el poder calorífico del hidrógeno producido entre la energía necesaria suministrada al sistema, que es donde se producen los mayores costes.

Se desarrollan a continuación algunos de los procedimientos más comunes de producción de hidrógeno en la actualidad.

2.2.2 Electrolisis

La electrolisis es el método más antiguo y conocido para producir hidrógeno. Se trata de la hidrólisis del agua; es decir, la separación de cada uno de los átomos que constituyen una molécula de agua utilizando la electricidad. Es muy efectiva para producir hidrógeno puro en cantidades pequeñas. Este proceso se basa en las semirreacciones de los iones del agua [11]:



Observamos que el hidrógeno se forma en el cátodo y el oxígeno en el ánodo. Esta tecnología se suele mejorar variando la composición del agua, normalmente añadiéndole sales para obtener una mayor velocidad de reacción.

Debido a que utiliza la electricidad como fuente de entrada, este proceso no tiene restricciones geográficas como otros se verán más adelante; permitiendo una localización flexible y remota de los generadores de hidrógeno. Sin embargo, debido a su baja eficiencia comparada con otras técnicas no ha sido implementada en grandes plantas. A favor cuenta con que es un proceso completamente libre de emisiones si la electricidad utilizada es generada a partir de una fuente de energía renovable [9].

Para llevar a cabo este proceso es necesaria una gran cantidad de electricidad; por lo que usarlo o no va a residir en la distinción de los métodos existentes para producirla; analizando así si es o no rentable.

2.2.3 Reformado de vapor

Otra de las técnicas para producir hidrógeno es extrayéndolo de los hidrocarburos. El reformado es la tecnología dominante en el sector, siendo la utilizada para el 95% del hidrógeno producido en los Estados Unidos [11]. Se trata de un proceso termodinámico en el que se hace reaccionar metano (gas natural) y vapor a alta temperatura (800-900 °C), utilizando catalizadores.

Aunque es una tecnología consolidada con alta eficiencia (alrededor del 70%), su principal desventaja radica en las emisiones significativas de CO₂ que produce, lo que lo clasifica como un método no sostenible a largo plazo [12].

2.2.4 Gasificación del carbón

Este método es el más antiguo de producción de hidrógeno, habiendo plantas de producción que llevan ya operando en Europa, Sudáfrica y los Estados Unidos desde hace mucho tiempo. Consiste en la conversión de este recurso en un gas compuesto principalmente por hidrógeno, monóxido de carbono y CO₂, mediante calor y vapor. Consta de dos reacciones; en la primera se convierte el carbón en monóxido de carbono y en la segunda se convierte este producto en dióxido de carbono. Ambas reacciones producen hidrógeno [11].

Aunque se trata de un método probado y viable en regiones con abundancia de carbón, su eficiencia es menor que la del reformado de gas natural, y su impacto ambiental es significativo debido a las altas emisiones de CO₂ asociadas [11].

2.2.5 Oxidación parcial de hidrocarburos

Otro proceso importante es la oxidación parcial de hidrocarburos, que utiliza oxígeno para oxidar parcialmente compuestos como el metano o la biomasa. Este método genera hidrógeno y monóxido de carbono sin necesidad de un aporte externo de energía debido a su naturaleza exotérmica. Sin embargo, su rendimiento en la producción de hidrógeno es inferior al del reformado de vapor, y los subproductos generados requieren purificación adicional [11].

2.2.6 Biomasa

La biomasa también ofrece un camino renovable para la producción de hidrógeno. A través de procesos como la gasificación, la pirólisis o la fermentación, es posible convertir materia orgánica en hidrógeno. Este enfoque tiene la ventaja de ser una fuente de energía sostenible con bajas emisiones

netas de carbono, especialmente cuando se utilizan desechos orgánicos. Sin embargo, presenta retos en términos de complejidad técnica y eficiencia [11].

2.2.7 Producción fotobiológica

En el campo de las tecnologías emergentes, la producción fotobiológica utiliza algas y bacterias especializadas que, mediante procesos fotosintéticos, generan hidrógeno a partir de agua y luz solar. Aunque esta tecnología es completamente limpia y sostenible, su aplicación a gran escala está limitada por su baja eficiencia y la necesidad de avanzar en la investigación biotecnológica [11].

2.3 Almacenamiento

2.3.1 Introducción

El almacenamiento de hidrógeno es un aspecto clave en su uso como fuente de energía, ya que de ello depende su viabilidad en distintas aplicaciones. Después de haber visto sus propiedades y su papel como vector energético, es importante entender qué tecnologías permiten guardarlo de forma segura y práctica, asegurando que pueda utilizarse cuando y donde se necesite.

La naturaleza ligera del hidrógeno y su baja densidad tanto en estado gaseoso como líquido presentan retos significativos, lo que ha impulsado el desarrollo de diversas estrategias de almacenamiento adaptadas a diferentes escenarios industriales y tecnológicos. Además, el hidrógeno almacena mucha energía por unidad de masa, pero muy poca por unidad de volumen lo que motiva que el almacenamiento del mismo sea un campo de investigación muy alto y activo, relacionado estrechamente con el avance en la tecnología de nuevos materiales [2].

Como se puede ver en la Figura 2-4, el almacenamiento de hidrógeno puede clasificarse en dos grandes categorías: físico y basado en materiales, cada una con características específicas que responden a distintas necesidades.



Figura 2-4 Clasificación y tipos de almacenamiento de hidrógeno (autoría propia, basado en [13])

Estas alternativas varían en aspectos como la densidad energética alcanzable, la facilidad de liberación del hidrógeno, los requerimientos de temperatura y presión, la sostenibilidad del proceso y los costes asociados.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de almacenar hidrógeno es si va a ser estacionario o no estacionario. Mientras que en el primer caso se establece un punto fijo, como las plantas de producción del propio gas, el segundo es cuando la distribución o consumo del hidrógeno se realiza por carretera, mar o aire. Ese último tipo de almacenamiento es muy crítico ya que, en el transporte, el espacio necesario para mantener el gas licuado (ya sea a temperaturas criogénicas o altas temperaturas) ocupa mucho volumen; lo cual se traduce en unos gastos considerables [8].

2.3.2 Almacenamiento físico

El almacenamiento físico del hidrógeno se basa en la compresión o licuefacción del gas para almacenarlo en recipientes a alta presión o en estado líquido a temperaturas criogénicas. A diferencia del almacenamiento basado en materiales, simplemente se retiene el hidrógeno en su forma molecular dentro de un contenedor [13].

2.3.2.1 Hidrógeno comprimido

Este tipo de almacenamiento se lleva a cabo en tanques de alta presión a temperatura ambiente, como se muestra en la Figura 2-5. Esta alternativa ofrece una capacidad del uno al siete por ciento de hidrógeno en peso; en función del tipo del tanque utilizado, cumpliéndose la regla de a menor peso, mayor capacidad de almacenamiento y precio [10].



Figura 2-5 Tanque de hidrógeno de alta presión en una planta química [14]

El almacenamiento de hidrógeno en tanques presurizados como gas comprimido es una técnica ampliamente utilizada. Para llevar a cabo este proceso, es necesario un aporte de energía, ya que el hidrógeno debe comprimirse a altas presiones, lo que implica que el volumen requerido para almacenar el gas comprimido es considerablemente mayor en comparación con los combustibles convencionales, hecho que se traduce en una menor densidad energética [10].

En la actualidad, el hidrógeno se almacena en tanques cilíndricos de 50 litros a presiones de 200-250 bar, aunque esta presión puede incrementarse hasta 600-700 bar en función de la aplicación. No obstante, debido a su baja densidad volumétrica, el hidrógeno sigue ocupando un gran volumen incluso en condiciones de alta presión. A su vez, los tanques diseñados para soportar estas presiones son estructuralmente pesados, lo que supone un desafío en términos de eficiencia y movilidad [10].

A elevadas presiones y bajas temperaturas, el hidrógeno se comporta de manera similar a un gas ideal. Esto permite calcular la cantidad de moléculas y la masa almacenada en un tanque a partir de la ecuación del gas ideal ($p \cdot v = n \cdot R \cdot T$), facilitando el diseño y optimización de los sistemas de almacenamiento [10].

2.3.2.2 Hidrógeno líquido

El almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es una de las alternativas más utilizadas cuando se busca aumentar su densidad energética sin recurrir a altas presiones. Este proceso consiste en enfriar el hidrógeno hasta alcanzar $-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, su punto de ebullición a presión atmosférica, lo que permite su transformación en líquido. Gracias a esta reducción de volumen, el hidrógeno líquido ocupa aproximadamente 850 veces menos espacio que su versión en estado gaseoso a presión ambiente, facilitando su transporte y almacenamiento en grandes cantidades [15].

El hidrógeno líquido es especialmente atractivo para aplicaciones en movilidad y almacenamiento a gran escala, donde la reducción de volumen es prioritaria. Su densidad energética volumétrica es considerablemente mayor que la del hidrógeno comprimido, alcanzando $8,4\text{ MJ/L}$, aproximadamente el doble que los sistemas de almacenamiento gaseoso a 700 bar [13].

A pesar de estas ventajas, esta alternativa de almacenamiento requiere un gasto energético considerable, del orden de $13,2\text{ kWh}$ por kilogramo, lo que equivale a aproximadamente un 30-40% de la energía total contenida en el hidrógeno almacenado, lo que hace que sea menos eficiente en comparación con otras tecnologías de almacenamiento [16].

Otro de los problemas que presenta esta alternativa son las pérdidas por evaporación que sufre el hidrógeno líquido, que llegan a ser de hasta el 0,1% del volumen almacenado al día en sistemas de gran escala [17].

2.3.2.3 Hidrógeno crio-comprimido

El almacenamiento crio-comprimido de hidrógeno (Cryo-Compressed Hydrogen Storage, CcH₂) es una tecnología híbrida que combina los principios del almacenamiento de hidrógeno comprimido y el almacenamiento criogénico. Este método consiste en enfriar el hidrógeno a temperaturas criogénicas (similares a las del hidrógeno líquido, es decir, alrededor de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$) mientras se mantiene a altas presiones, generalmente entre 250 y 350 bar. Gracias a esta combinación de bajas temperaturas y presurización, el CcH₂ logra aumentar la densidad de almacenamiento, permitiendo una mayor cantidad de hidrógeno en un volumen reducido en comparación con los métodos tradicionales [13].

A diferencia del hidrógeno líquido convencional, que se almacena a presión atmosférica en tanques criogénicos, el hidrógeno crio-comprimido puede encontrarse en diferentes estados físicos dentro del tanque: como un gas criogénico denso, como un fluido supercrítico o en una mezcla de fases líquida y gaseosa, dependiendo de la presión y la temperatura del sistema [15].

Esta tecnología, a pesar de sus ventajas, presenta ciertos inconvenientes que limitan su uso a gran escala, principalmente la complejidad en el diseño de los tanques y un consumo energético muy elevado en el enfriamiento y la compresión [18].

2.3.3 Almacenamiento basado en materiales

Se refiere a todas las técnicas en las que el hidrógeno es almacenado en un material sólido o líquido; en lugar de mantenerse como gas comprimido o en estado líquido. Entre ellas:

2.3.3.1 Hidrógeno químico

El almacenamiento de hidrógeno en forma química implica la conversión del hidrógeno gaseoso en compuestos químicos estables que pueden liberar hidrógeno cuando sea necesario. Este método se basa en la formación de enlaces químicos entre el hidrógeno y otros elementos, permitiendo su almacenamiento a presión y temperatura ambiente, lo que mejora la seguridad y facilita su manejo [19].

Las características que lo hacen competir por ser uno de los métodos de almacenamiento son la alta densidad energética y la seguridad. En contra, tiene como desventajas la baja eficiencia energética, una reversibilidad limitada y los altos costes e indisponibilidad de los compuestos utilizados para el almacenamiento [19].

2.3.3.2 Hidruros complejos

Los hidruros complejos se caracterizan por contener aniones formados por hidrógeno y elementos ligeros, como el aluminio (alanatos) o el boro (borohidruros), que se enlazan con cationes metálicos, como se muestra en la Figura 2-6. El proceso de almacenamiento en hidruros complejos implica la absorción de hidrógeno para formar el hidruro y su posterior desorción mediante la aplicación de calor o la reducción de presión [20].

Esta alternativa de almacenamiento cuenta con la ventaja de poder operar a presiones moderadas. Además, ofrece una densidad de hidrógeno superior en comparación con otros métodos. No obstante, requieren altas temperaturas de desorción para liberar el hidrógeno, tienen una velocidad de adsorción y desorción lenta y, en algunas ocasiones, pueden descomponerse de manera irreversible, lo que reduce su vida útil y eficiencia. A día de hoy las investigaciones en este campo se centran en paliar estos inconvenientes; con técnicas como el dopaje con catalizadores [21].

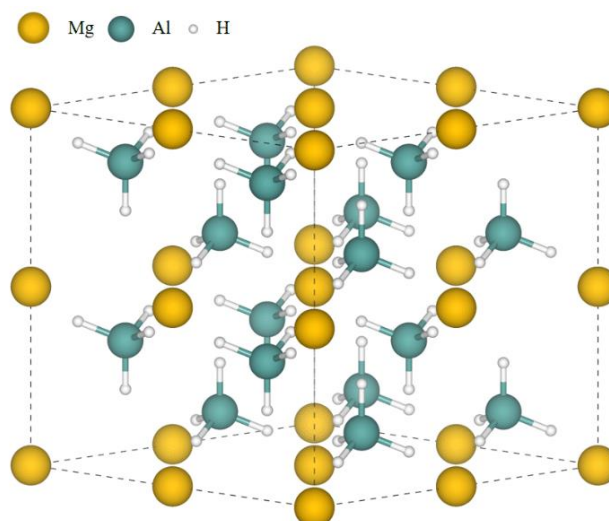


Figura 2-6 Estructura atómica del alanato Mg (AlH_4)₂ [22]

2.3.3.3 Hidruros intersticiales

Los hidruros intersticiales son compuestos formados cuando átomos de hidrógeno se ubican en los espacios intersticiales de una red metálica sin alterar significativamente su estructura cristalina. Este tipo de hidruros se forma principalmente con metales de transición y ciertas aleaciones. Un ejemplo clásico es el sistema $\text{LaNi}_5\text{-H}_2$, donde el hidrógeno se inserta en la estructura intermetálica de LaNi_5 para formar LaNi_5H_6 [23].

Tienen utilidad en distintas aplicaciones entre las que se incluyen, además de sistemas de almacenamiento estacionario de hidrógeno, dispositivos de energía portátil y la purificación y separación de hidrógeno [24].

2.3.3.4 Líquidos orgánicos

Los líquidos orgánicos portadores de hidrógeno (LOHC, por sus siglas en inglés) permiten almacenar hidrógeno mediante una técnica innovadora que utiliza compuestos orgánicos líquidos para almacenar y transportar hidrógeno de manera segura y eficiente. Estos compuestos pueden absorber y

liberar hidrógeno a través de reacciones químicas de hidrogenación y deshidrogenación, respectivamente [25].

Al ser líquidos en condiciones ambientales, los LOHC pueden utilizar las infraestructuras de almacenamiento y transporte ya establecidas para combustibles líquidos, lo que facilita su implementación. Además, permiten el almacenamiento de hidrógeno durante períodos prolongados sin pérdidas significativas, ya que el hidrógeno está químicamente ligado dentro del compuesto [25].

La Figura 2-7 muestra algunos de los ejemplos potenciales de LOHC; entre ellos el naftaleno, cuya hidrogenación forma la decalina, con una capacidad gravimétrica de hasta el 7,3% [26].

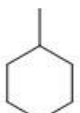
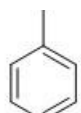
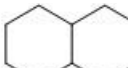
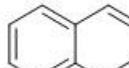
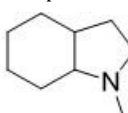
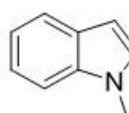
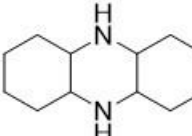
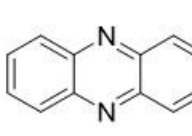
Sistemas LOHC		Capacidad gravimétrica (%)
Metilciclohexano 	$\xrightarrow{-3H_2}$	Tolueno  6.2
Decalina 	$\xrightarrow{-5H_2}$	Naftaleno  7.3
1-Metilperhidroindol 	$\xrightarrow{-4H_2}$	1-Metilindol  5.8
Perhidrofenazina 	$\xrightarrow{-7H_2}$	Fenazina  7.2

Figura 2-7 Potenciales LOHC usados en la actualidad [26]

A finales del año 2024 la empresa Exolum inició el primer proyecto del mundo para transportar y almacenar hidrógeno verde a escala comercial en infraestructuras ya existentes utilizando estos compuestos. Este proyecto se está llevando a cabo en Immingham, el mayor puerto de Reino Unido de transporte de mercancías y puede suponer la reutilización de las infraestructuras de combustibles fósiles existentes [27].

2.3.3.5 Adsorbentes

El almacenamiento de hidrógeno mediante adsorbentes es una técnica que se basa en la fisisorción, donde las moléculas de hidrógeno se adhieren a la superficie de materiales sólidos porosos debido a interacciones físicas, como las fuerzas de Van der Waals [28].

Existen diferentes materiales adsorbentes; entre ellos los materiales carbonosos, los MOFs y las zeolitas. Los dos primeros serán vistos más en profundidad más adelante en este trabajo. Estos materiales presentan ventajas como una mayor seguridad debido al empleo de presiones más moderadas y la reversibilidad de la fisisorción; que permite realizar ciclos repetidos de carga y descarga sin degradar los materiales adsorbentes [29].

Esta alternativa presenta todavía algunos desafíos que debe superar; y es por ello por lo que se requiere una investigación más profunda para hacerla viable en aplicaciones comerciales a gran escala.

2.4 Métodos de decisión multicriterio

Los métodos de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) son herramientas analíticas diseñadas para abordar problemas de decisión que involucran múltiples criterios, frecuentemente en conflicto. Estos métodos permiten evaluar y priorizar diversas alternativas considerando simultáneamente distintos factores relevantes para el decisor [30].

Su origen se remonta a mediados del siglo XX, cuando se reconoció la necesidad de superar las limitaciones de los enfoques monocriterio en la toma de decisiones complejas. Desde entonces, el MCDM ha evolucionado, incorporando técnicas matemáticas y computacionales avanzadas para mejorar la precisión y eficacia en la evaluación de alternativas [30].

El uso de estos métodos está extendido en la actualidad a numerosos ámbitos. Por ejemplo, en planificación urbana y gestión ambiental, se aplican para determinar qué áreas son más adecuadas para la conservación o el desarrollo, combinando datos geográficos y criterios socioeconómicos [31]. Además, en ingeniería y gestión de proyectos, para selección de personal docente [32], en economía y finanzas para priorizar proyectos de infraestructura [33] o en salud y biomedicina para la evaluación de tecnologías sanitarias [34].

2.4.1 Características comunes de la decisión multicriterio

En cualquier problema de decisión, el objetivo principal es seleccionar la mejor alternativa entre varias opciones disponibles, basándose en un conjunto de criterios bien definidos. Para comprender mejor el significado del término criterio, se diferencian cuatro elementos esenciales [35]:

- Atributo: hacer referencia a los valores que describen objetivamente cada alternativa.
- Objetivo: indica la dirección en la que se busca mejorar un atributo determinado.
- Nivel de aspiración: representa el umbral de rendimiento que se considera aceptable para un atributo.
- Meta: es el valor específico dentro del nivel de aspiración que se desea alcanzar en un atributo concreto.

Por ejemplo, si se considera el precio como atributo, un posible objetivo podría ser minimizarlo. En este caso, establecer un precio máximo que no se desea superar correspondería al nivel de aspiración, mientras que fijar un valor concreto dentro de ese umbral representaría la meta [35].

A la hora de tomar una decisión, el decisor siempre se enfrenta a un ambiente de decisión, es decir, un contexto particular que influye en el proceso. Dependiendo de la información disponible, estos entornos pueden clasificarse en tres categorías principales, según la diferenciación establecida por Eduardo Pérez Gorostegui [35]:

- Ambientes de certeza: en este escenario, el decisor posee un conocimiento preciso sobre el contexto en el que tomará la decisión y las diferentes alternativas disponibles.
- Ambientes de riesgo: aunque similares a los ambientes de certeza, aquí el decisor conoce las probabilidades asociadas a cada posible resultado, lo que le permite actuar en función de estos valores.
- Ambientes de incertidumbre: en estos casos, se dispone de información limitada o inexistente sobre el contexto en el que se tomará la decisión, lo que dificulta la evaluación de las alternativas.

2.4.2 Clasificación de los métodos de toma de decisión

En 1981 [36] se propuso una división de los métodos de análisis multicriterio en métodos de toma de decisión multi-atributo (Multi-attribute decision-making, MADM) y métodos de toma de decisión multi-objetivo (Multiobjective decision-making, MODM). Mientras que los primeros se utilizan para resolver problemas discretos (alternativas predeterminadas y valoración de cada criterio “a priori”), los

segundos se utilizan para resolver problemas continuos (alternativas no predeterminadas, participando los expertos “a posteriori”) [36].

A su vez, los métodos MADM se clasifican en: métodos de puntuación directa, basados en la distancia, de comparación por pares, de superación y basados en funciones de utilidad o valor, como se muestra en la Tabla 2-2 [36].

Grupo MADM	Método MADM
Métodos de puntuación directa	Ponderación aditiva simple (SAW)
	Evaluación proporcional compleja (COPRAS)
Métodos basados en la distancia	Programación por objetivos (GP)
	Programación por compromiso (GP)
	Técnica para la ordenación de preferencias por similitud con la solución ideal (TOPSIS)
	Optimización multicriterio y solución de compromiso (VIKOR)
Método de comparación por pares	Proceso analítico jerárquico (AHP)
	Proceso analítico en red (ANP)
	Medición de atractivo mediante una técnica de evaluación basada en categorías (MACBETH)
Métodos de superación	Método de organización de clasificación de preferencias para el enriquecimiento de evaluaciones (PROMETHEE)
	Eliminación y elección expresando la realidad (ELECTRE)
Métodos basados en funciones de utilidad o valor	Teoría de utilidad multiatributo (MAUT)
	Teoría de valor multiatributo (MAVT)
	Modelo integrado de valor para evaluaciones sostenibles (MIVES)

Tabla 2-2 Clasificación de los métodos MADM (autoría propia)

2.4.2.1 Métodos de puntuación directa

Son los más simples, basados en evaluar las diferentes alternativas mediante operaciones aritméticas básicas. Se evalúan las alternativas sumando el valor normalizado de cada criterio por su peso correspondiente. SAW es un método más antiguo que solo puede aplicarse cuando el objetivo es maximizar un criterio [37]. En cambio, COPRAS es una versión mejorada de SAW que permite evaluar tanto criterios a maximizar como a minimizar [38, 39].

2.4.2.2 Métodos basados en la distancia

Estos métodos miden la distancia entre cada alternativa y un punto de referencia. El método GP busca la alternativa que cumpla con un conjunto de objetivos establecidos, sin necesariamente ser la mejor opción, sino aquella que satisface ciertas condiciones. Por otro lado, el método CP identifica la alternativa más cercana al punto óptimo teórico. VIKOR y TOPSIS derivan de CP, pero se diferencian en la forma en que normalizan los criterios: VIKOR evalúa solo la distancia a la solución ideal, mientras que TOPSIS considera tanto la proximidad a la solución ideal como a la menos deseable [38, 39].

2.4.2.3 Métodos de comparación por pares

Estos métodos resultan especialmente útiles para determinar la importancia relativa de los distintos criterios y analizar factores subjetivos mediante la comparación entre alternativas. El método AHP,

pionero en este enfoque, es ampliamente utilizado en la toma de decisiones. Su evolución, el método ANP, permite considerar la interdependencia entre criterios. Por su parte, MACBETH es una variante similar a AHP en su estructura, aunque presenta diferencias conceptuales en su aplicación [38, 39].

2.4.2.4 Métodos de superación

Estos métodos determinan una jerarquía de preferencia entre un conjunto de soluciones, donde cada una posee cierto grado de superioridad sobre las demás en relación con un criterio específico. Además, son útiles para manejar información parcial o imprecisa, permitiendo ordenar las alternativas según su nivel de preferencia. Entre los enfoques más representativos de esta categoría se encuentran PROMETHEE y ELECTRE [38, 39].

2.4.2.5 Métodos basados en funciones de utilidad o valor

Métodos como MAUT (basado en utilidad) y MAVT (basado en valor) establecen funciones que miden el nivel de satisfacción de una alternativa en relación con un criterio específico. Estas funciones transforman las valoraciones de las alternativas en un grado de satisfacción correspondiente a cada criterio, adoptando distintas formas según la relación entre ambos factores. MIVES, una variante de estos métodos, incorpora ecuaciones que describen las diferentes funciones de satisfacción de manera más estructurada [38, 39].

Los métodos de decisión multicriterio que se utilizarán en este proyecto serán AHP y TOPSIS, ambos encuadrados dentro de la clasificación MADM, ya que las alternativas de almacenamiento de hidrógeno son opciones ya establecidas que se deben comparar mediante criterios ponderados. La elección del método AHP se debe a que el almacenamiento de hidrógeno implica la evaluación de criterios subjetivos, no solo cuantitativos. Además, es un método más sencillo de implementar en comparación con otros, que requieren modelos más avanzados. Por último, el método AHP incluye una verificación de consistencia, de manera que la toma de decisiones no es ni arbitraria ni contradictoria.

En cuanto al método TOPSIS, su implementación permite contrastar los resultados obtenidos; ofreciendo una mayor confianza en la selección de la mejor alternativa. La diferencia en la metodología de ambos métodos permite analizar si las conclusiones obtenidas son coherentes y consistentes.

La combinación de estos dos métodos en problemas de decisión multicriterio ha sido implementada en numerosos problemas de ingeniería para comparar la efectividad de ambos y dar así un mayor respaldo a la decisión final [40, 41, 42].

3 DESARROLLO DEL TFG

Este proyecto tiene como objetivo estudiar cuál es la mejor alternativa para almacenar hidrógeno. Para ello, se van a establecer unos criterios de comparación y se van a analizar cuatro alternativas en base a cada uno de esos criterios mediante un método de análisis multicriterio, obteniendo así la mejor técnica para el almacenamiento de hidrógeno.

Como son muchas las posibilidades que se ofrecen hoy en día para almacenar hidrógeno y con el tiempo que se brinda para la realización de este proyecto, se ha decidido que se analizarán en detalle dos alternativas prometedoras que han sido objeto de un creciente interés en la investigación: los metal-organic frameworks (MOFs) y los compuestos de carbono. Estas técnicas, cada una con sus ventajas y desafíos, ofrecen soluciones innovadoras para superar las limitaciones inherentes a las tecnologías tradicionales. Además, representan un enfoque hacia el desarrollo de sistemas de almacenamiento que permitan optimizar el balance entre densidad energética, seguridad operativa y viabilidad económica, factores trascendentes para la integración del hidrógeno en el panorama energético global. Adicionalmente, se describirán dos técnicas de almacenamiento que están consolidadas en la industria y cuyo uso está extendido en numerosos países: los hidruros metálicos y el hidrógeno comprimido en estado gaseoso.

De manera previa al análisis de las alternativas de almacenamiento, se procede a la explicación de en qué consisten y cómo se realizan los dos métodos de análisis multicriterio desarrollados en este trabajo.

3.1 Método AHP

3.1.1 Generalidades

El método AHP (Analytic Hierarchy Process) o PAJ (Proceso Analítico Jerárquico) por sus siglas en castellano fue creado por el profesor matemático y economista Thomas L. Saaty en 1980 [42]. Propone una estructura jerárquica de tres niveles, como se muestra en la Figura 3-1, para la resolución de un problema de decisión multicriterio. En el nivel más alto se define el objetivo, que es la meta principal o propósito que se busca alcanzar en el proceso de toma de decisiones. En el siguiente nivel se encuentran los criterios, que son los factores o parámetros utilizados para evaluar y comparar las diferentes alternativas. Por último, en el nivel más bajo, se encuentran las alternativas, que son las opciones o posibles soluciones entre las cuales se debe elegir para alcanzar el objetivo establecido y se evalúan en función de los criterios definidos [43]. En este trabajo la estructura se dividirá en ocho criterios y cuatro alternativas.

Esta herramienta se caracteriza por su gran rigurosidad académica, dado que se basa en fundamentos psicológicos y matemáticos; además de contar con diversas comprobaciones empíricas. En cuanto a los

fundamentos psicológicos, el profesor Saaty afirma que la mente humana tiene ciertas fortalezas y debilidades específicas, siendo una de las debilidades las comparaciones globales. Por el contrario, una de las fortalezas es la capacidad para hacer comparaciones por pares de elementos. Multitud de empresas utilizan este método en la actualidad para la resolución de problemas complejos de decisión. [35].

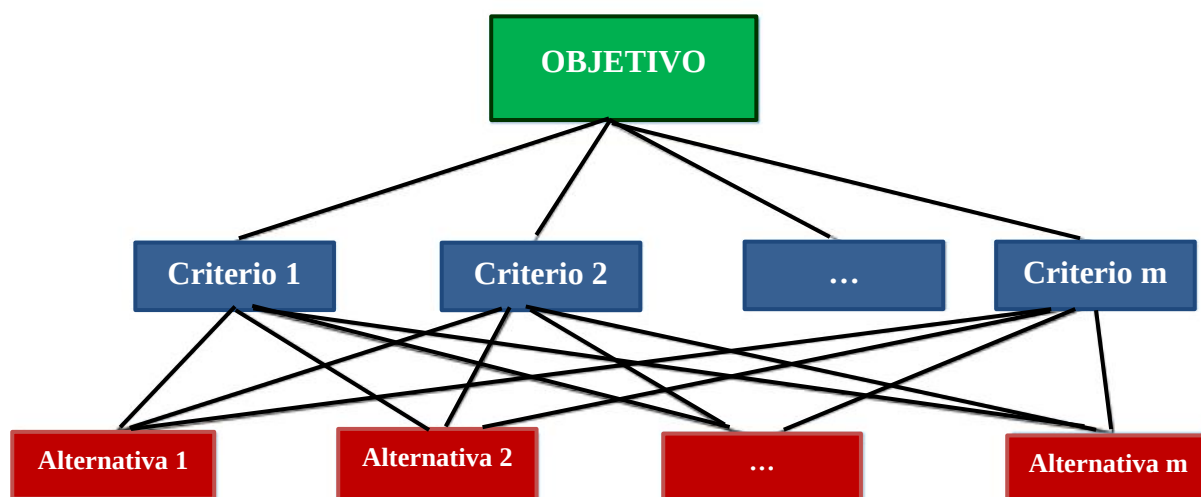


Figura 3-1 Estructura jerárquica modelo AHP (autoría propia)

Este método no se basa en evaluaciones exactas, es decir, se basa en juicios subjetivos y comparaciones relativas. Por esta razón, los expertos en psicología sugieren el uso de escalas de valoración, lo que permite realizar comparaciones más precisas entre los diferentes criterios y alternativas [41].

Este método propone una escala numérica (Tabla 3-1) para cuantificar las comparaciones pareadas; evitando de esta manera hacer comparaciones globales que puedan resultar imprecisas.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Ambos componentes tienen una contribución equitativa en la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa otorgan una ventaja a un elemento en comparación con el otro
5	Fuertemente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa confieren una ventaja significativa a un elemento en comparación con el otro.
7	Mucho más grande la importancia entre un elemento y otro	Un elemento ejerce un dominio significativo. Su prioridad ha sido demostrada en la práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	Un elemento prevalece sobre el otro con el máximo nivel de magnitud posible.
2,4,6 y 8	Valores intermedios cuando se requiere clarificar	

Tabla 3-1 Escala de valores de Saaty (autoría propia, basado en [35])

Para explicar el método AHP se seguirá el diagrama de la Figura 3-2, repitiéndolo tantas veces como criterios se analicen. En los siguientes apartados se detallará el proceso para calcular la calificación de cada alternativa. Por otro lado, la asignación de los pesos a los criterios (apartado 3.4) no se ha realizado arbitrariamente, sino que se ha basado en un análisis de diversas fuentes bibliográficas citadas en este trabajo, garantizando así una evaluación fundamentada.

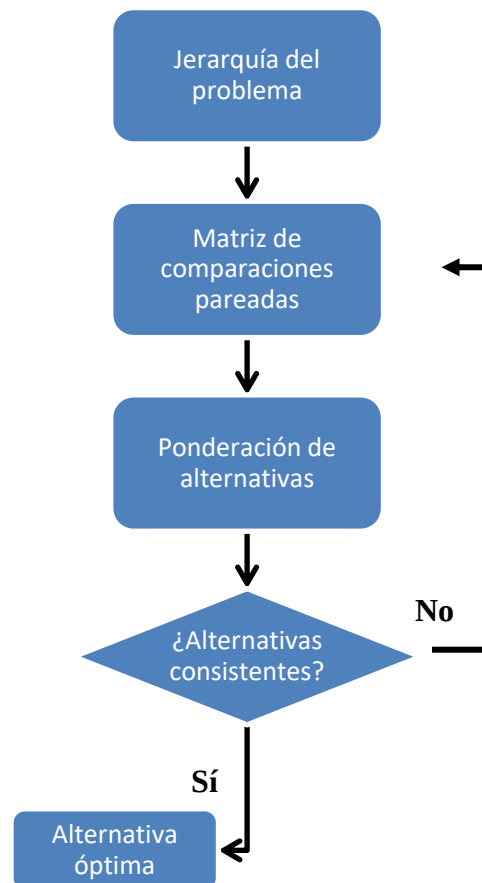


Figura 3-2 Diagrama de flujo método AHP (autoría propia)

Una vez conocida la jerarquía del problema, la metodología para aplicar el método AHP es la siguiente: cálculo de la matriz de comparaciones pareadas, cálculo del vector propio, ponderación de alternativas y consistencia del método. Siendo el método consistente, se procederá a analizar cuál es la alternativa óptima. Estos pasos se explican con mayor detalle en los siguientes apartados.

3.1.2 Matriz de comparaciones pareadas

El siguiente paso a realizar serían las matrices de decisión, conocidas como matrices de comparaciones pareadas. En ella, se determina la importancia de cada una de las alternativas en función de cada criterio (una matriz para cada criterio).

Para facilitar la realización de este paso, se aplicará un método matemático alternativo. El objetivo es generar valores automáticamente sin necesidad de asignarlos manualmente, asegurando coherencia y evitando inconsistencias en las matrices de comparación. Este procedimiento busca transformar la escala de Saaty (Tabla 3-1) en una representación numérica basada en diferencias y razones matemáticas.

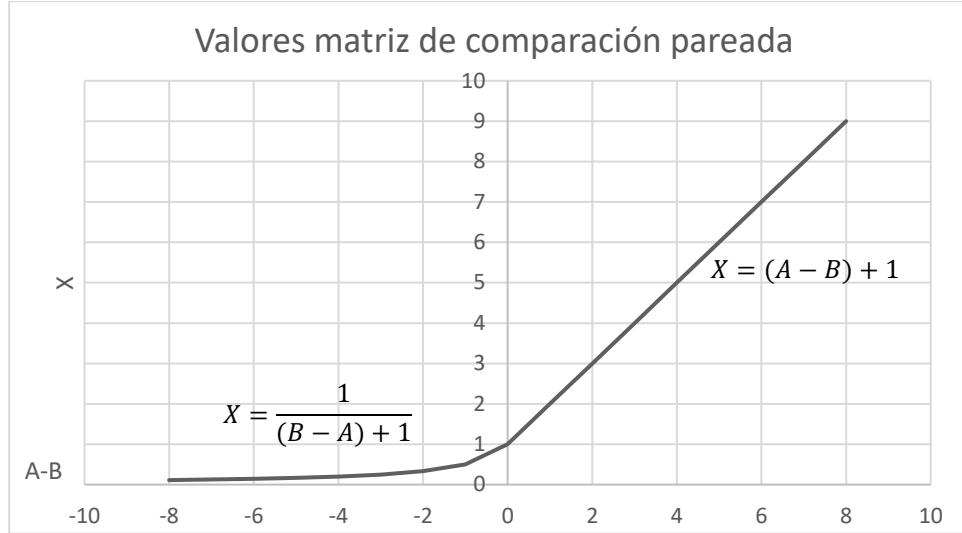


Figura 3-3 Modelo matemático aplicado a las matrices de comparación pareada

Supongamos que estamos comparando dos alternativas A y B, asignando un valor X que representa la importancia de A respecto a B. Cuando $A = B$ implica que ambas alternativas tienen la misma importancia; por lo que $X = 1$. Cuando la alternativa A es más importante que B, se utiliza la siguiente expresión:

$$X = (A - B) + 1 \quad (3-1)$$

Y cuando $A < B$ esta otra:

$$X = \frac{1}{(B - A) + 1} \quad (3-2)$$

El problema no pierde su linealidad al realizar este procedimiento ya que no se multiplican variables y cumple la condición en ambos extremos, por lo que se considera matemáticamente correcto y es posible aplicarlo al método [35].

La diagonal principal de la matriz siempre será igual a uno, ya que se está comparando cada alternativa consigo misma. Además, solo es necesario realizar las comparaciones por encima o debajo de la diagonal principal, ya que las que se encuentran en el lado opuesto son simplemente la inversa de las anteriores. Para facilitar el modelo, siempre se hará la comparación de las alternativas que tengan mejor calificación con la que tengan menos; de tal forma que solo se utilizará la ecuación (3-1) y, en el lado simétrico de la matriz, el opuesto al resultado obtenido.

Este proceso se lleva a cabo de forma individual para cada una de las alternativas, construyendo así una matriz $A = (a_{ij})_{n \times n}$, siendo n el número de alternativas.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \text{ verificándose que: } a_{ij} \times a_{ji} = \frac{1}{c} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

De esta manera se confirma que la matriz A cumple con los requisitos de reciprocidad, homogeneidad y consistencia. El número de operaciones a realizar será de $\frac{n \times n - n}{2}$; en este caso, seis.

3.1.3 Cálculo del vector propio y ponderación de alternativas

El vector propio se define como el peso que tiene cada alternativa en ese criterio específico. Para calcularlo, se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Se multiplica la matriz A por sí misma y se hace el sumatorio de cada columna de la matriz resultante:

$$B = A \times A = \begin{pmatrix} 1 & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & 1 & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}; \text{ siendo } s_1, s_2, \dots, s_n = \sum_{i=1}^n s_i$$

2. Se normaliza la matriz B, dividiendo cada término de la matriz por la suma de la columna a la que pertenece:

$$C = B_{\text{normalizada}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{p_1} & \frac{b_{12}}{p_2} & \cdots & \frac{b_{1n}}{p_n} \\ \frac{b_{21}}{p_1} & \frac{1}{p_2} & \cdots & \frac{b_{2n}}{p_n} \\ \frac{b_{31}}{p_1} & \frac{b_{32}}{p_2} & \cdots & \frac{b_{3n}}{p_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{b_{n1}}{p_1} & \frac{b_{n2}}{p_2} & \cdots & \frac{1}{p_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}$$

3. El vector propio se obtiene calculando la media de cada fila de la matriz C, obteniendo valores de 0 a 1:

$$\text{Vector propio} = V = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{2j} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{nj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

3.1.4 Consistencia del método

Siguiendo el diagrama del flujo del método AHP indicado en la Figura 3-2, el siguiente paso es comprobar la consistencia de todas las matrices de comparación realizadas. Una de las propiedades que deben tener estas matrices es la transitividad, es decir, si la alternativa 1 es extremadamente más importante que la 4 y a su vez la 4 es más importante que la 3, no se puede considerar el criterio 3 más importante que el 1.

Por tanto, es necesario verificar la consistencia del método antes de dar por válidos los resultados del vector propio. En caso de obtener alguna matriz inconsistente será necesario realizar nuevamente la matriz de ponderaciones, evaluando así de nuevo las alternativas.

Para considerar consistente a una matriz, el valor de la razón de consistencia no debe superar los valores expuestos en la Tabla 3-2.

Tamaño de la matriz	Razón de consistencia
3x3	5%
4x4	9%
$\geq 5 \times 5$	10%

Tabla 3-2 Valores máximos de la Razón de Consistencia (autoría propia, basado en [35])

Para verificar la consistencia se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Se multiplica la matriz de comparaciones pareadas (A) por el vector propio (V), obteniendo el denominado vector fila (T):

$$T = A \times V = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}$$

2. Se divide cada valor de T entre el correspondiente valor de V, obteniéndose así lo que se llamará cociente (Q):

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{t_1}{v_1} \\ \vdots \\ \frac{t_n}{v_n} \end{pmatrix}$$

3. Se obtiene el valor máximo de lambda calculando la media de los cocientes:

$$\lambda_{\max} = \frac{(\frac{t_1}{v_1} + \cdots + \frac{t_n}{v_n})}{n} \quad (3-3)$$

4. Se halla el índice de consistencia (IC) mediante la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3-4)$$

5. Por último, obtenemos la razón de consistencia (RC):

$$RC = \frac{IC}{IA}, \quad (3-5)$$

siendo IA el valor obtenido de la Tabla 3-3.

Tamaño matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabla 3-3 Valores del Índice Aleatorio (autoría propia basado en [44])

3.1.5 Elección de la alternativa óptima

Siendo la razón de consistencia válida para el tamaño de la matriz correspondiente, se finaliza el proceso obteniendo la calificación final que recibe cada alternativa. En primer lugar, se debe obtener una matriz de una sola columna y cuyo número de filas sea igual al número de criterios utilizados para analizar las alternativas. Posteriormente, se halla el valor normalizado de cada criterio como se muestra en la Tabla 3-4 Ponderación de criterios (los criterios se muestran enumerados de más a menos importantes).

La calificación que recibe cada alternativa se obtiene haciendo el múltiplo entre esta matriz columna de criterios ponderados y los vectores propios hallados para cada uno de los criterios.

Criterio	Importancia	Valor normalizado
C1	1	$8/36 = 0,2222$
C2	2	$7/36 = 0,1944$
C3	3	$6/36 = 0,1667$
C4	4	$5/36 = 0,1389$
C5	5	$4/36 = 0,1111$
C6	6	$3/36 = 0,0833$
C7	7	$2/36 = 0,0556$
C8	8	$1/36 = 0,0278$
Σ	36	1

Tabla 3-4 Ponderación de criterios

3.2 Método TOPSIS

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) fue propuesto por Hwang y Yoon en 1981 y posteriormente mejorado por ellos mismos en 1987 y 1992 [45]. Se basa en la ordenación de un número discreto de alternativas por similitud y disparidad a una solución ideal. Los creadores de este método se basaron en el concepto de solución por compromiso, entendiendo la misma como aquella que presenta la menor distancia euclídea a la solución del ideal positivo y la mayor distancia a la solución ideal negativa [45].

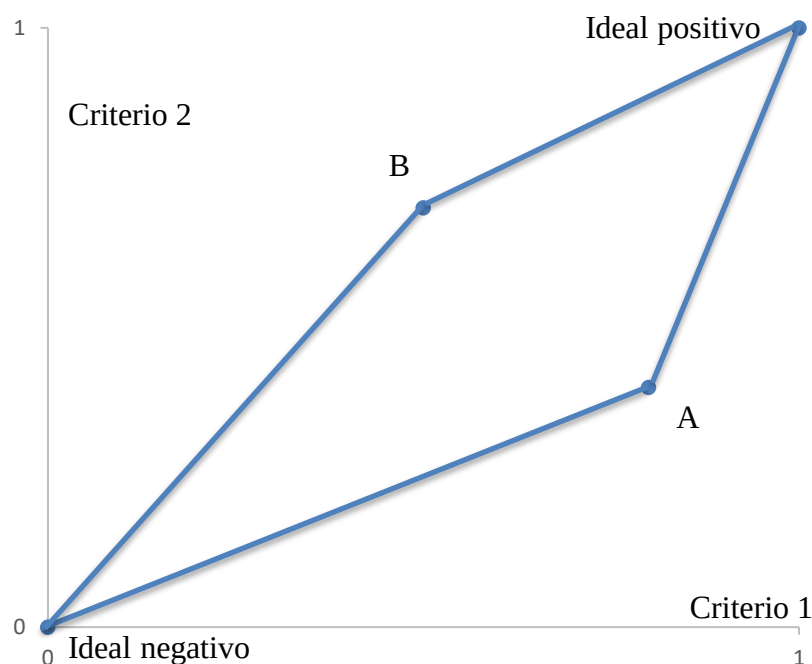


Figura 3-4 Método TOPSIS

La solución ideal se define como un conjunto de valores óptimos para cada criterio, aunque en algunos casos puede no ser alcanzable. La solución ideal positiva corresponde a una alternativa hipotética cuyos valores son los mejores entre todas las opciones evaluadas para cada criterio [46]. Por otro lado, la solución ideal negativa representa una alternativa teórica cuyos valores son los peores en comparación con el resto. El método TOPSIS no solo selecciona la alternativa más próxima a la solución ideal positiva, sino que también busca aquella que esté más alejada de la solución ideal negativa [45].

Se puede dar que una alternativa sea la más cercana a la solución ideal positiva pero no la más alejada de la ideal negativa; por lo que este método define un índice de similitud que es una combinación de cercanía al ideal positivo y lejanía al negativo.

Para la elaboración de este método se lleva a cabo el siguiente diagrama, siguiendo los pasos en los siguientes apartados.



Figura 3-5 Diagrama de flujo TOPSIS

3.2.1 Matriz de decisión normalizada

Se obtiene la matriz de decisión A a partir de la evaluación de las alternativas para cada uno de los criterios, donde X_{ij} representa la calificación de la alternativa A_i con respecto al criterio C_j

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

Posteriormente, para normalizar dicha matriz, se utiliza la siguiente expresión, obteniendo la matriz N:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}} \quad (3-6)$$

3.2.2 Ponderación de la matriz de decisión

Para ponderar la matriz de decisión normalizada (P), simplemente se debe hacer el múltiplo entre cada n_{ij} y el peso correspondiente de cada criterio (w_j). La asignación de estos pesos son los mismos que los explicados en el apartado 3.1.5.

$$p_{ij} = n_{ij} \times w_j \quad (3-7)$$

3.2.3 Determinación de la solución ideal positiva y negativa

En primer lugar, se debe de hacer distinción entre criterios positivos (representan atributos deseables, A^+ , a mayor número mejor) y criterios negativos (representan atributos no deseables, A^- , a mayor número peor). Para criterios de tipo positivo, el ideal positivo representará el máximo de la matriz de decisión normalizada ponderada. Por el contrario, en criterios de tipo negativo, el ideal positivo equivaldrá al mínimo. Se determina de la siguiente forma:

$$A^+ = \{p_1^+, p_2^+, \dots, p_n^+\} = \{(max_i p_{ij}, j \in J)(min_i p_{ij}, j \in J')\}$$

$$A^- = \{p_1^-, p_2^-, \dots, p_n^-\} = \{(min_i p_{ij}, j \in J)(max_i p_{ij}, j \in J')\}$$

donde J está asociado a criterios positivos y J' a criterios negativos.

3.2.4 Cálculo de las distancias al ideal positivo y al ideal negativo

Se denomina distancia euclídea y viene dada por las siguientes expresiones:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; i = 1, \dots, m \quad (3-8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}; i = 1, \dots, m \quad (3-9)$$

3.2.5 Cálculo del ratio de proximidad/lejanía

Como se ha mencionado, este método valora las alternativas en función a la proximidad al ideal positivo y a la lejanía al ideal negativo. Para hallar ese ratio de proximidad/lejanía se utiliza la siguiente expresión:

$$T_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}; i = 1, \dots, m \quad (3-10)$$

De forma que cuanto más próximo es el valor del ratio de cualquier alternativa a 1 mejor será el ratio de dicha alternativa.

3.3 Alternativas de almacenamiento de hidrógeno

En este apartado se analizarán las principales tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, explorando sus características, ventajas y limitaciones. Dado que no existe una solución única que sea óptima en todas las aplicaciones, es fundamental comparar las diferentes opciones desde distintos enfoques. Este análisis permitirá entender mejor algunas de las posibilidades actuales de almacenamiento de las mencionadas en el apartado 2.3.

Se estudiarán las siguientes cuatro alternativas: hidruros metálicos, metal-organic frameworks (MOFs), compuestos con base de carbono e hidrógeno comprimido.

3.3.1 Compuestos con base de carbono

El almacenamiento de hidrógeno en materiales basados en carbono se ha convertido en una alternativa prometedora debido a su estructura porosa, baja densidad y estabilidad química [47]. A diferencia del almacenamiento en estado comprimido o en hidruros metálicos, estos materiales permiten la adsorción física del hidrógeno, lo que facilita su almacenamiento reversible sin reacciones químicas que dificulten la liberación del gas.

Esta alternativa se basa principalmente en la fisisorción [48], donde las moléculas de hidrógeno se adsorben en la superficie del material mediante fuerzas de Van der Waals. Este método es más eficiente a bajas temperaturas y moderadas presiones, mejorando la densidad de almacenamiento. La capacidad de almacenamiento está estrechamente relacionada con el área superficial específica y la distribución de poros del material.

Además, en estos compuestos se da el fenómeno “spillover”; a través del cual se mejora la capacidad de almacenamiento de hidrógeno, como se muestra en la Figura 3-6. Este proceso se divide en dos etapas: la disociación, en la que las moléculas de hidrógeno (H_2) se adsorben en la superficie de un catalizador metálico y se separan en átomos; y la migración, en la que dichos átomos se trasladan hacia la superficie de la superficie del catalizador a la del material adyacente (en este caso carbono), que en un principio tiene una afinidad baja por el hidrógeno [49].

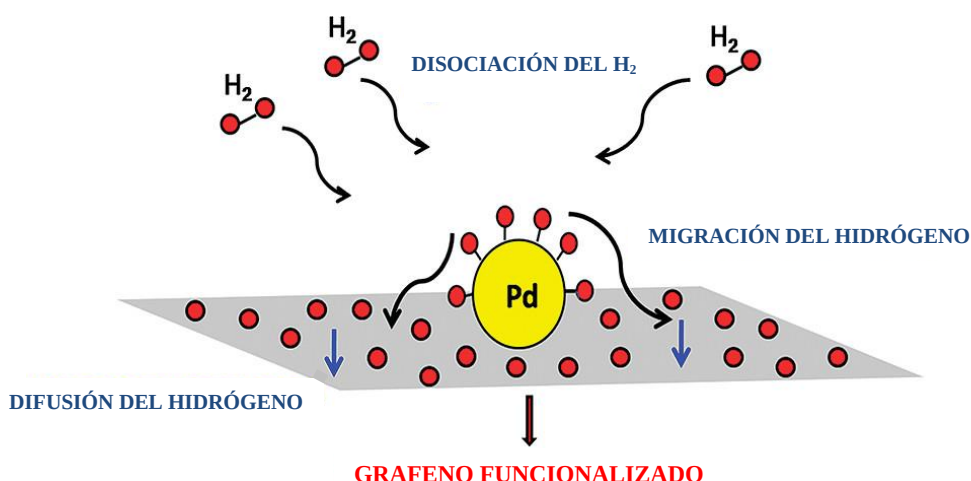


Figura 3-6 Diagrama esquemático del mecanismo spillover [50]

Las dos principales ventajas en las que destaca esta alternativa sobre las demás es en la estabilidad química y la seguridad. Mientras que la primera de ellas permite a estos materiales soportar múltiples ciclos de adsorción-desorción, la segunda, gracias a que la fisisorción no implica la formación de enlaces químicos fuertes, permite la liberación de hidrógeno con riesgos mínimos. No obstante, al aumentar la presión mejora la capacidad de almacenamiento ya que el hidrógeno llena todos los espacios accesibles, incluidos los poros y grietas que no lo estaban a menor presión. Esta estrategia presenta desafíos importantes en el ámbito de la seguridad y el coste [48].

Los factores que juegan en contra de estos compuestos son la menor capacidad de almacenamiento, la cual no cumple todavía con los objetivos establecidos por el DOE de los Estados Unidos del 6,5% de almacenamiento en peso [51], las condiciones operativas, ya que muchos de estos materiales requieren temperaturas muy bajas para alcanzar capacidades significativas y la escalabilidad, pues la producción a gran escala de la mayoría de estos materiales sigue siendo un desafío debido limitaciones técnicas y económicas.

Existen diferentes tipos de materiales basados en carbono. En este proyecto se van a estudiar dos:

3.3.1.1 Nanotubos de carbono (CNTs)

Los nanotubos de carbono son estructuras cilíndricas con un diámetro de entre 0,4 y 3 nanómetros y hasta varios micrómetros de longitud (los de pared simple) o de entre 2 y 100 nanómetros y hasta varios milímetros de longitud (los de pared múltiple) formadas por láminas de grafeno enrolladas sobre sí mismas. Gracias a su alta relación superficie-volumen, los CNTs presentan una buena capacidad de adsorción de hidrógeno, con valores reportados entre 2-6% a bajas temperaturas [52].

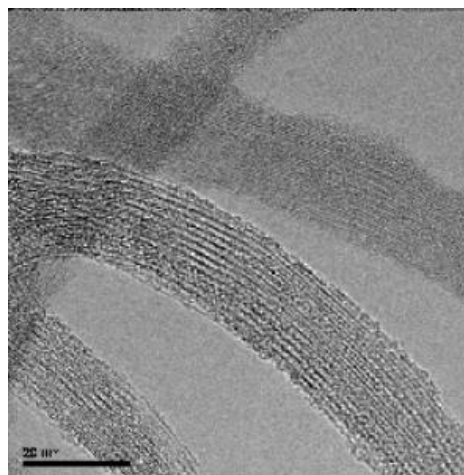


Figura 3-7 Nanotubos de carbono vistos mediante microscopía electrónica de transmisión. Fuente: CSIC

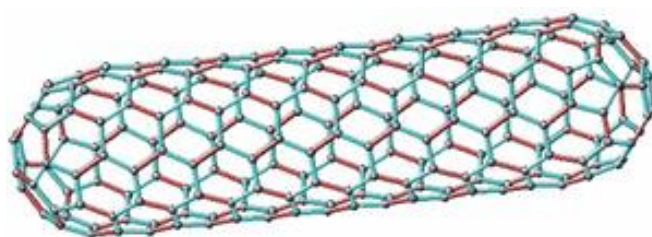


Figura 3-8 Estructura de un nanotubo de carbono. Fuente: CSIC

La capacidad de almacenamiento de los CNTs depende de su diámetro, longitud y distribución de defectos estructurales. En algunos estudios [53], la modificación química mediante dopaje con metales ha permitido aumentar la capacidad de adsorción. Sin embargo, su producción a gran escala sigue siendo costosa y su rendimiento a temperatura ambiente es limitado.

3.3.1.2 Grafeno y sus derivados

El grafeno es un material bidimensional compuesto por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal. Su estructura ultradelgada y su altísima superficie específica le otorgan propiedades prometedoras para el almacenamiento de hidrógeno [54].

Una de las ventajas del grafeno es su flexibilidad estructural, lo que permite la modificación de su interlámina para optimizar la adsorción de hidrógeno. Sin embargo, su síntesis sigue siendo un desafío debido a la necesidad de procesos costosos y complejos [54].

3.3.2 Metal-Organic Frameworks (MOFs)

Una de las alternativas de almacenamiento más emergentes y sujetas a investigación en los últimos años son los metal-organic frameworks, comúnmente conocido como MOFs. Debido a que el hidrógeno gaseoso se expande fácilmente ocupando un gran volumen, el futuro apunta a sistemas de almacenamiento de tamaño adaptado al espacio disponible en los vehículos para dar solución a esas aplicaciones emergentes en movilidad que se han mencionado anteriormente. Además, los métodos convencionales requieren presiones extremadamente altas que se traducen en la necesidad de tanques de almacenamiento pesados y un consumo de energía muy alto [51], lo que implica un coste elevado.

Estas son las dos principales causas por las que se están investigando materiales capaces de almacenar grandes cantidades de hidrógeno en condiciones moderadas de presión y temperatura. Entre las distintas estrategias disponibles, el almacenamiento de hidrógeno en materiales porosos se considera una alternativa prometedora debido a su alta reversibilidad, adecuada cinética y la capacidad de retener hidrógeno a presiones relativamente bajas (< 100 bar). Con el objetivo de mejorar esta tecnología, el

Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha establecido que para el año 2025 los sistemas de almacenamiento de hidrógeno deberían alcanzar una capacidad gravimétrica del 6,5 % en peso y una capacidad volumétrica de 50 g/L, operando en un rango de temperaturas de -40 a 60 °C y a presiones inferiores a 100 bar [51]. A día de hoy ya se informan capacidades de almacenamiento de entre el 6 y el 15 por ciento en peso, superando así ese objetivo [48].

Los MOFs se podrían definir como materiales cristalinos porosos con redes de una, dos o tres dimensiones, formadas por iones o clústeres metálicos y ligandos orgánicos multidentados a través de enlaces de coordinación [51]. De manera más sencilla y como se puede observar en la Figura 3-9 son una especie de “esponja” con una estructura altamente organizada y muchos espacios vacíos en su interior (poros), lo que les permite, entre otras muchas aplicaciones, almacenar gases como el hidrógeno en distintas condiciones de temperatura y presión.

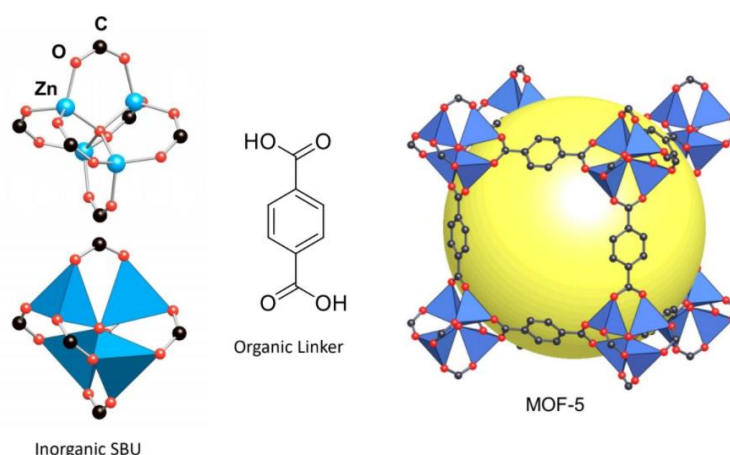


Figura 3-9 Unidades básicas que forman la red de del MOF-5, uno de los utilizados para almacenar hidrógeno [51]

Una de las diferencias que presentan estas estructuras es que su temperatura óptima de almacenamiento es muy baja (alrededor de los 77K); mientras que otros métodos requieren temperaturas superiores a los 300 °C. Al aumentar la temperatura, los MOFs pierden capacidad de almacenamiento, alcanzando solo entre 0,5 y el 1 por ciento en peso a temperatura ambiente [48]. En la Figura 3-10 se puede ver la capacidad de almacenamiento, tanto volumétrica como gravimétrica del MOF $V_2Cl_{2.8}$ en distintas condiciones de presión y temperatura.

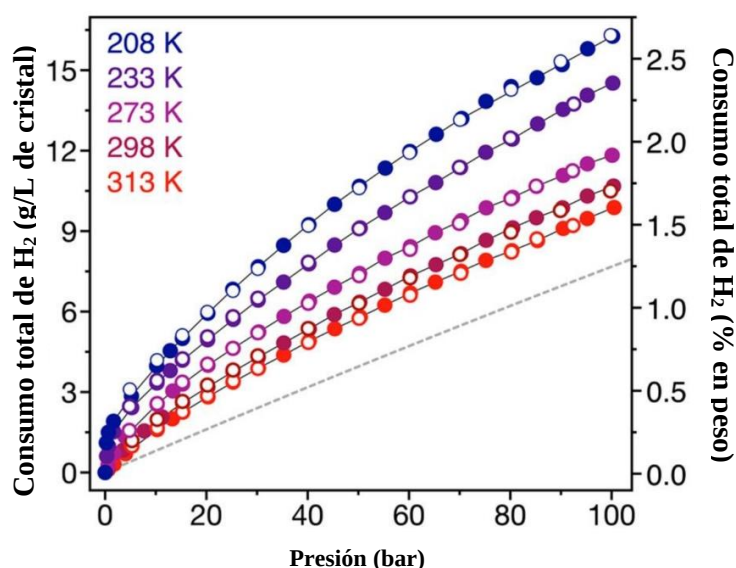


Figura 3-10 Capacidad de almacenamiento del MOF $V_2Cl_{2.8}$ [55]

El proceso de almacenamiento de hidrógeno en un MOF se basa en la adsorción física (fisisorción), un mecanismo que no implica enlaces químicos fuertes, sino interacciones de Van der Waals entre el gas y la superficie interna del material [55]. Consta de tres etapas diferenciadas:

- Difusión del hidrógeno en la estructura porosa: cuando el hidrógeno en estado gaseoso es introducido en un sistema que contiene MOFs, las moléculas de H_2 se desplazan hacia los poros del material debido a la diferencia de concentración y presión. Los MOFs con mayor área superficial específica y volumen de poros optimizado pueden capturar más moléculas de hidrógeno.
- Adsorción sobre los sitios activos del MOF: Una vez dentro de los poros, el hidrógeno se adhiere a las superficies internas del MOF por fuerzas intermoleculares débiles. Algunos MOFs presentan sitios metálicos expuestos que aumentan la afinidad del material por el hidrógeno, mejorando la capacidad de almacenamiento. Por ejemplo, el MOF-210 ha demostrado una capacidad de adsorción de 8,6 % en peso a 77 K y 80 bar, un valor significativamente alto en comparación con otros materiales porosos [56].
- Retención y liberación del hidrógeno: una vez adsorbido, el hidrógeno permanece atrapado en la estructura porosa hasta que se modifican las condiciones de presión o temperatura. A diferencia de los hidruros metálicos, donde el hidrógeno está químicamente enlazado, los MOFs permiten su liberación sin necesidad de elevadas temperaturas. Reduciendo la presión o aumentando la temperatura, las interacciones de Van der Waals se debilitan, y el hidrógeno es liberado del material de manera eficiente.

Es por esto por lo que no todos los MOFs tienen la misma capacidad de almacenamiento de hidrógeno. Algunos de los factores que influyen son el tamaño de los poros y el área interna disponible (a mayor, más capacidad de almacenamiento), la fuerza de interacción con el hidrógeno, que depende del metal y de la modificación química de los ligandos [29] y las condiciones de operación.

Esta alternativa de almacenamiento está siendo empleada hoy en día en fases poco avanzadas de dispositivos portátiles de energía, entre otros [56].

3.3.3 Hidruros metálicos

Esta alternativa surge, al igual que los MOFs, para poner fin a los problemas de alto coste y condiciones operativas que traían consigo los métodos tradicionales de almacenamiento de hidrógeno, que hasta este momento eran comprimirlo o criogenizarlo; con mejores niveles de seguridad y mayores densidades de hidrógeno por volumen.

El hidrógeno interactúa con una gran cantidad de materiales para la formación de diferentes tipos de hidruros. Existen hidruros iónicos, covalentes y metálicos [57], como se muestra en la Figura 3-11. Sin embargo, los hidruros metálicos son los más apropiados para el almacenamiento de hidrógeno debido a que ofrecen un equilibrio ideal entre estabilidad y facilidad de liberación del hidrógeno (enlaces intersticiales en su estructura en vez de enlaces demasiado fuertes), condiciones más prácticas y seguras y poseen mayor densidad de almacenamiento [58].

La formación de un hidruro metálico se muestra en la ecuación (3-11); en la que ocurre que un metal en estado sólido (M_s) reacciona con el hidrógeno en estado gaseoso a unas condiciones específicas de presión y temperatura, obteniendo como productos el hidruro y calor. La formación del hidruro libera energía en forma de calor, aunque su activación requiere un aporte energético significativo, por lo que se dice que es una reacción exotérmica. En cambio, cuando el hidruro se descompone, el proceso absorbe energía (reacción endotérmica) [58].

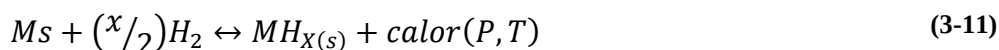


Figura 3-11 Clasificación de los hidruros [58]

El almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos se basa en la capacidad de ciertos metales y aleaciones para formar compuestos estables con hidrógeno. Este proceso ocurre a través de la adsorción del hidrógeno molecular en la superficie del metal, seguido de su disociación en átomos individuales que luego se difunden en los sitios intersticiales del material, formando así el hidruro metálico [48].

Esta alternativa presenta una serie de ventajas en comparación con otros métodos de almacenamiento de hidrógeno como son: alta capacidad de almacenamiento volumétrico, lo que los hace ideales para aplicaciones donde el espacio es una limitación, baja presión de operación y reversibilidad y estabilidad estructural, de manera que, algunos hidruros, pueden liberar y absorber hidrógeno en repetidas ocasiones sin una degradación significativa en su rendimiento.

A pesar de sus ventajas, los hidruros enfrentan también ciertos desafíos que limitan su aplicación a gran escala. La mayoría de los hidruros requieren una temperatura de operación elevada para la liberación del hidrógeno almacenado. Además, su cinética de absorción y desorción no es la más rápida; lo que dificulta su uso en aplicaciones que requieren una liberación rápida de hidrógeno. Pese a su gran capacidad volumétrica, la cantidad de hidrógeno almacenada en relación con el peso total del material no es siempre competitiva con otras tecnologías, como se puede ver en la Figura 3-12. Por último, la presencia de impurezas en el hidrógeno puede ser perjudicial para la capacidad de almacenamiento y la reversibilidad de algunos hidruros.

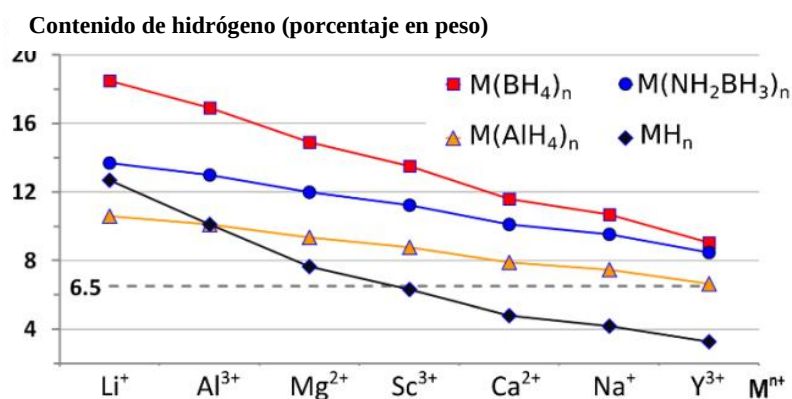


Figura 3-12 Comparación del contenido gravimétrico de diferentes hidruros metálicos [59]

Actualmente existen numerosos estudios en marcha para mejorar el rendimiento de los hidruros metálicos; en los que se busca paliar esos inconvenientes que se han mencionado anteriormente. Entre las investigaciones emergentes destacan la síntesis de nuevos compuestos con mayor capacidad

gravimétrica y la estructuración de materiales para aumentar la superficie de interacción con el hidrógeno y disminuir la temperatura de operación [59].

3.3.4 Hidrógeno comprimido en estado gaseoso

El almacenamiento de hidrógeno comprimido a alta presión es una de las técnicas más maduras y ampliamente utilizadas para el almacenamiento de hidrógeno. Esto no implica que su investigación haya cesado; pues numerosos estudios siguen buscando la manera de hacer esta alternativa de almacenamiento cada vez más eficiente. La Figura 3-13 muestra el crecimiento en el número de artículos científicos publicados acerca de la seguridad y almacenamiento en tanques de hidrógeno.

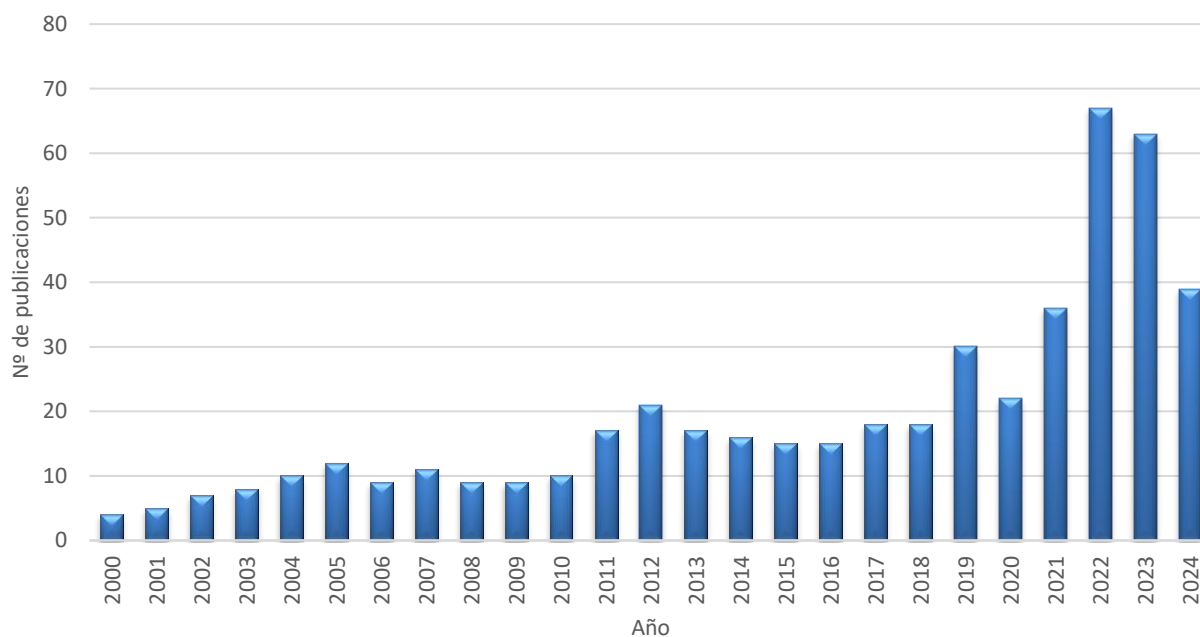


Figura 3-13 Número de publicaciones sobre almacenamiento y seguridad en tanques de hidrógeno en la base de datos Scopus

El hidrógeno en estado gaseoso se almacena en tanques de alta presión, típicamente entre 350 y 700 bar [60]. Este método permite mantener el hidrógeno en estado gaseoso a temperatura ambiente, facilitando así su uso en aplicaciones móviles y estacionarias. Desde finales del siglo XIX llevan realizándose primeros experimentos con hidrógeno comprimido, aunque no fue hasta la década de 1940 que se le dio un uso industrial. Con la llegada de los primeros vehículos de hidrógeno a finales del siglo XX y hasta día de hoy, esta técnica ha evolucionado significativamente hasta convertirse en una tecnología puntera en el almacenamiento de hidrógeno [60].

Este método ofrece así una madurez tecnológica que ninguna otra alternativa tiene; al ser una tecnología bien establecida con una infraestructura existente para su producción y distribución. Además, el proceso de compresión y almacenamiento es directo, de manera que la simplicidad operativa es mayor en comparación con otras alternativas. En la Figura 3-14 se muestran las ventajas y oportunidades que proporciona el almacenamiento de hidrógeno comprimido.

Sin embargo, este método también tiene sus limitaciones. El almacenamiento a alta presión implica riesgos asociados a posibles fugas o rupturas, requiriendo estrictas medidas de seguridad. Por ello, los tanques deben ser fabricados con materiales capaces de soportar altas presiones, lo que lleva consigo un incremento del coste y del peso.



Figura 3-14 Ventajas del hidrógeno comprimido (autoría propia, basado en [60])

En la actualidad existen cinco tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno comprimido; clasificados principalmente en función de los materiales utilizados y su capacidad para soportar altas presiones. La elección del tipo de tanque vendrá determinada por factores como la aplicación específica, requisitos de presión, consideraciones de peso y coste. Se numeran del tipo I al tipo V [19], como se puede ver en la Figura 3-15.

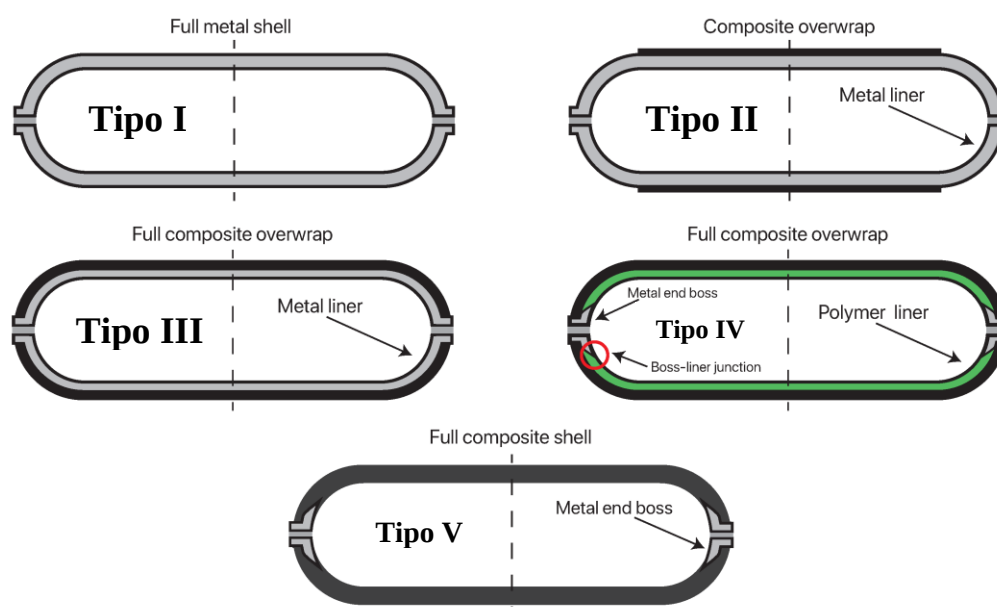


Figura 3-15 Tipos de tanques de hidrógeno y sus características[60]

- Tipo I: fabricados de metal en su totalidad generalmente acero. Soportan presiones de hasta 200 bar y son los más pesados y económicos, utilizándose principalmente en aplicaciones estacionarias (83\$/kg) [61].
- Tipo II: consisten en un revestimiento metálico interno reforzado con una envoltura de fibra de vidrio o carbono. Este diseño reduce el peso en comparación con los tanques Tipo I y permite soportar presiones de hasta 300 bar (86\$/kg) [61].

- Tipo III: cuentan con un revestimiento interno de metal (como aluminio) completamente envuelto en material compuesto de fibra de carbono. Son más ligeros que los tipos anteriores y pueden soportar presiones de hasta 700 bar (700\$/kg) [61].
- Tipo IV: presentan un revestimiento interno de polímero (plástico) rodeado por una envoltura completa de fibra de carbono. Son los más ligeros y pueden soportar presiones de hasta 700 bar. Sin embargo, son más costosos debido al uso extensivo de materiales compuestos (633\$/kg) [61].
- Tipo V: actualmente en desarrollo, estos tanques están contruidos completamente con materiales compuestos sin revestimiento metálico. Ofrecen una reducción de peso de hasta un 20% en comparación con los tanques Tipo IV, pero actualmente solo manejan hidrógeno a bajas presiones y requieren más investigación para su aplicación práctica.

La compresión implica aumentar la presión del gas para reducir su volumen, facilitando su almacenamiento y transporte; proceso que se realiza mediante compresores específicos. Es importante destacar que la compresión del hidrógeno requiere una cantidad significativa de energía, lo que puede afectar a la eficiencia general del sistema. El proceso de compresión está dividido en múltiples etapas para evitar así generar elevadas temperaturas. El hidrógeno es comprimido, generalmente, en tres a cinco etapas con intercambiadores de calor entre cada fase para disipar el calor generado [62]. Para liberar el hidrógeno se lleva a cabo un proceso mediante válvulas reductoras de presión, con sensores que aseguran que fluya de manera controlada hacia la aplicación final.

Investigaciones actuales se centran en mejorar la eficiencia y seguridad del almacenamiento de hidrógeno comprimido. Por ejemplo, se están desarrollando tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión que ofrecen un medio compacto y eficiente para almacenar gas hidrógeno comprimido [60]. Además, se están explorando métodos innovadores como el almacenamiento de hidrógeno comprimido bajo el agua, utilizando grava y tuberías en lagos y embalses, lo que podría ofrecer soluciones de almacenamiento a gran escala [63].

3.4 Criterios seleccionados para la comparación de alternativas

Para comparar las diferentes alternativas de almacenamiento, los criterios que se van a utilizar en el estudio de cada una de ellas son: seguridad, eficiencia del ciclo (carga y descarga), capacidad de almacenamiento (tanto gravimétrica como volumétrica), durabilidad y ciclo de vida, madurez tecnológica, coste del sistema, escalabilidad e impacto ambiental.

La selección de estos ocho criterios se fundamenta en una revisión profunda de la literatura científica; pues todos ellos se destacan recurrentemente como factores clave en la evaluación de sistemas de almacenamiento de hidrógeno. Además, abarcan los aspectos más importantes del tema que se quiere estudiar, incluyendo su funcionamiento, costos y viabilidad en diferentes aplicaciones, teniendo en cuenta también su viabilidad futura en cuestiones de impacto ambiental por posibles restricciones [64, 66, 67].

Por otro lado, la ponderación asignada a cada uno de los ocho criterios (Figura 3-16) se hace priorizando los artículos más valorados en la comunidad científica, en base al número de citas. Aunque no se ha realizado una consulta directa a expertos mediante métodos como encuestas o cuestionarios, esta metodología asegura que las decisiones subjetivas que se deben tomar para llevar a cabo los métodos de decisión se basan en conocimientos consolidados y validados por especialistas en el campo del almacenamiento de hidrógeno [67, 68, 69].



Figura 3-16 Ponderación de los criterios seleccionados para el análisis

Como se puede observar, la forma del polígono que se forma al realizar el gráfico radial no es uniforme ni simétrico, lo que sugiere que el análisis va a estar bastante influenciado por ciertos criterios clave frente a otros que serán menos importantes. Esto supondrá que las tecnologías que sobresalgan en seguridad, eficiencia y capacidad de almacenamiento serán favorecidas en el análisis multicriterio.

La seguridad es considerada el criterio de máxima prioridad, necesaria para poder obtener una economía basada en hidrógeno. Tras ella se encuentra la eficiencia, crucial para minimizar pérdidas energéticas y maximizar el rendimiento del sistema [67].

El siguiente criterio más importante es la capacidad de almacenamiento, que se valora altamente por la dificultad que supone almacenar hidrógeno debido a su baja densidad volumétrica. La longevidad y resistencia de los sistemas de almacenamiento es el cuarto criterio considerado más importante, ya que son fundamentales para garantizar la viabilidad económica y operativa. La madurez tecnológica mide la confianza que ofrece una tecnología para su implementación a gran escala, que es la finalidad que se busca en la industria, por lo que es otro de los criterios importantes. La normativa internacional es cada vez más restrictiva en cuanto las emisiones, promoviendo minimizarlas y buscar una economía circular [68, 69].

Por último, encontramos el coste, tanto de inversión inicial como de mantenimiento y la escalabilidad, que evalúa la capacidad de ser flexible a diferentes escalas de operación [68, 69].

3.4.1 Seguridad

La seguridad es un factor fundamental que debe tenerse muy en cuenta a la hora de almacenar hidrógeno. En este contexto, las condiciones operativas de cada técnica suelen ser las que más condicionan este criterio; especialmente la presión [69].

La seguridad evalúa el riesgo asociado al manejo, almacenamiento y operación de cada tecnología de almacenamiento. El hidrógeno comprimido es la alternativa que plantea mayores riesgos, debido a que debe almacenarse a presiones extremadamente altas (hasta 800 bar) [70], lo que puede provocar fugas explosivas y fallos estructurales en los tanques de almacenamiento, aumentando significativamente el riesgo de accidentes.

Por otro lado, los hidruros metálicos presentan ciertos riesgos debido a su alta reactividad química, ya que pueden liberar hidrógeno de manera incontrolada al entrar en contacto con el agua o el oxígeno del aire, lo que puede generar situaciones peligrosas si no se manipulan correctamente [59]. Sin embargo, almacenan hidrógeno en forma sólida y a bajas presiones, lo que implica una mayor seguridad.

Los MOFs, al liberar el hidrógeno a baja temperatura de manera rápida, pueden ser un desafío en el control del flujo de hidrógeno. No obstante, las condiciones operativas son moderadas.

Los compuestos de carbono destacan por su alta estabilidad química y mecánica, lo que los convierte en una de las opciones más seguras, ya que no presentan reacciones peligrosas con el ambiente ni con el hidrógeno almacenado.

Por todo esto, se ha decidido darle una mayor puntuación y valorar así como más seguro a los compuestos con base de carbono, con 9 puntos. Por otro lado, la alternativa más insegura se ha otorgado al hidrógeno comprimido, con 2 puntos. Entre medias se sitúan los MOFs con 6 puntos y los hidruros metálicos con 4.



Figura 3-17 Evaluación de la seguridad de las alternativas de almacenamiento

3.4.2 Eficiencia del ciclo

La eficiencia del ciclo hace referencia a la capacidad de cada tecnología para almacenar y liberar hidrógeno con la menor pérdida de energía posible.

En este aspecto, los hidruros metálicos presentan una alta eficiencia, ya que permiten la absorción y liberación del hidrógeno de manera relativamente controlada y con mínimas pérdidas energéticas, aunque requieren aporte térmico para la desorción.

Por otro lado, el hidrógeno comprimido ofrece una eficiencia de ciclo moderada, ya que permite recuperar el gas sin pérdidas significativas, pero el proceso de compresión y descompresión requiere una cantidad considerable de energía [71].

Los MOFs, a priori, tienen una eficiencia moderada, pues el hidrógeno es retenido en sus estructuras porosas mediante adsorción física, lo que facilita ciclos de carga y descarga rápidos, aunque con una menor densidad de almacenamiento. Sin embargo, para que estos ciclos sean efectivos, se requiere una temperatura de operación muy baja y una presión moderada; y a la hora de liberar el hidrógeno se debe aumentar la temperatura o disminuir la presión, lo que puede generar ineficiencias energéticas [56].

Los compuestos de carbono muestran una eficiencia baja, ya que las fuerzas de Van der Waals que retienen el hidrógeno son débiles y pueden generar pérdidas durante los ciclos de carga y descarga. Además, la densidad gravimétrica y volumétrica es baja en comparación con el resto de las alternativas.

Así, se han otorgado las mejores calificaciones a los hidruros metálicos y al hidrógeno comprimido, 7 y 5 respectivamente, 3 puntos a los MOFs y una calificación más baja, de 1 punto, a los compuestos con base de carbono.



Figura 3-18 Evaluación de la eficiencia del ciclo

3.4.3 Capacidad de almacenamiento

Este criterio mide la cantidad de hidrógeno que puede almacenar cada tecnología por unidad de volumen y peso. Los hidruros metálicos destacan en este aspecto, ya que tienen la mayor densidad volumétrica de almacenamiento, muy superior al resto, de $150 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$. En segundo lugar, se sitúa el hidrógeno comprimido, que es una alternativa muy capaz tanto en densidad gravimétrica como volumétrica, con datos de hasta el 13% en peso y $40 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$, respectivamente.

Los MOFs, gracias a su gran superficie específica y alta porosidad, permiten una buena capacidad de almacenamiento, especialmente gravimétrica. Sin embargo, su poca madurez e implementación en la industria y uso en aplicaciones reales hace que su nota esté por debajo de las dos alternativas ya mencionadas.

Por último, los compuestos de carbono, que tienen una capacidad de almacenamiento limitada, ya que la adsorción física del hidrógeno en su superficie es escasa debido a las débiles fuerzas de interacción.

Esto deja una clasificación de 9 puntos para los hidruros, 7 para el hidrógeno comprimido, 4 para los MOFs y 1 para los compuestos con base de carbono.



Figura 3-19 Evaluación de la capacidad de almacenamiento

3.4.4 Durabilidad y ciclo de vida

La durabilidad y el ciclo de vida de cada tecnología dependen de su estabilidad a lo largo de múltiples ciclos de carga y descarga. Los hidruros metálicos suelen ser estables, pero deben de ser utilizados con precaución, pues pueden perder la capacidad de adsorción por exposición a la humedad y fatigarse. Los MOFs, por su parte, pueden degradarse químicamente tras múltiples ciclos de absorción y desorción de hidrógeno, especialmente si no se encuentran estabilizados mediante procesos avanzados de fabricación [25, 57].

En contraste, los compuestos de carbono son altamente estables tanto química como mecánicamente, lo que los convierte en una opción muy duradera para almacenamiento de hidrógeno a largo plazo. No obstante, su eficiencia puede disminuir si se acumulan impurezas.

El hidrógeno comprimido, aunque teóricamente no presenta degradación del material, depende de la integridad estructural de los tanques de almacenamiento, que pueden sufrir fatiga mecánica debido a las altas presiones.

Así, las notas otorgadas han sido de 7 puntos para el hidrógeno comprimido y los compuestos de carbono, 3 para los MOFs y 5 para los hidruros.

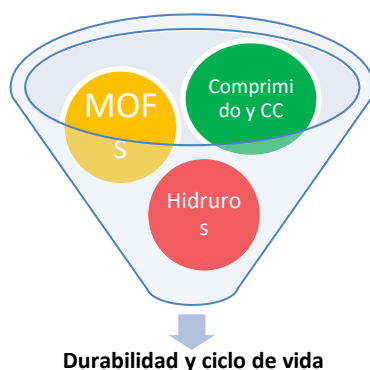


Figura 3-20 Evaluación de la durabilidad y el ciclo de vida

3.4.5 Madurez tecnológica

La madurez tecnológica indica el nivel de desarrollo y comercialización de cada sistema de almacenamiento. En este sentido, los hidruros metálicos son una tecnología consolidada con aplicaciones industriales y comerciales en marcha, lo que les otorga una alta madurez.

Los MOFs, por el contrario, aún se encuentran en una fase experimental, con investigaciones en curso para mejorar su estabilidad y eficiencia, lo que los posiciona como la opción menos madura tecnológicamente.

Los compuestos de carbono han sido estudiados ampliamente y presentan un nivel intermedio de desarrollo, con aplicaciones potenciales en almacenamiento de hidrógeno, pero aún con desafíos por resolver.

El hidrógeno comprimido es, sin duda, la alternativa más madura y ampliamente utilizada en la actualidad, con aplicaciones comerciales en movilidad y almacenamiento estacionario, lo que lo convierte en la opción más consolidada desde un punto de vista tecnológico [19].

Las notas otorgadas en este criterio han sido de 9 para el hidrógeno comprimido, 8 para los hidruros metálicos, 3 para los compuestos con base de carbono y 1 para los MOFs.

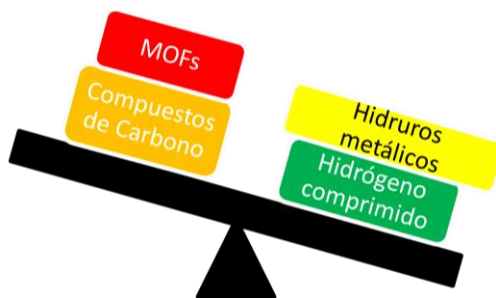


Figura 3-21 Evaluación de la madurez tecnológica

3.4.6 Coste del sistema

El coste del sistema considera tanto los gastos de producción como los de operación y mantenimiento. Los hidruros metálicos requieren materiales especializados y procesos de fabricación complejos, lo que incrementa significativamente su coste. Los MOFs también presentan costes elevados debido a la complejidad de su síntesis y a la necesidad de estabilizadores químicos.

Los compuestos de carbono, pese a ser éste un material muy abundante, son una tecnología muy especializada y, por tanto, cara.

El hidrógeno comprimido también tiene un coste alto debido a la necesidad de tanques de alta presión y estaciones de compresión, lo que implica una inversión significativa en infraestructura. No obstante, la alta madurez tecnológica hace que la oferta sea elevada y se abarate así su precio [62].

Por tanto, las calificaciones quedarían de tal forma: 5 puntos para el hidrógeno comprimido, 4 para los compuestos con base de carbono y 3 para los MOFs e hidruros metálicos



Figura 3-22 Evaluación del coste

3.4.7 Escalabilidad

La escalabilidad mide la viabilidad de cada tecnología para ser implementada a gran escala.

Los hidruros metálicos presentan limitaciones en este aspecto debido a su complejidad técnica y los requisitos de temperatura y presión para la desorción del hidrógeno.

En cuanto a los MOFs aún están en fase de desarrollo, y la falta de métodos de fabricación a gran escala dificulta su implementación en aplicaciones industriales.

Los compuestos de carbono, pese a la abundancia del compuesto, presentan una implementación a gran escala complicada debido a la alta especialización de los materiales.

El hidrógeno comprimido tiene una escalabilidad moderada, ya que, si bien la tecnología es madura, la infraestructura necesaria para su almacenamiento y distribución sigue representando un desafío técnico y económico [62].

Las calificaciones quedarían de tal manera: 2 puntos para los MOFs, 3 para los compuestos de carbono, 4 para los hidruros y 6 para el hidrógeno comprimido



Figura 3-23 Evaluación de la escalabilidad

3.4.8 Impacto ambiental

El impacto ambiental de cada tecnología se evalúa considerando la huella ecológica asociada a su producción y operación.

Los hidruros metálicos tienen un impacto medio-alto debido a la extracción y procesamiento de metales, que puede generar residuos peligrosos.

Los MOFs también presentan un impacto ambiental significativo, ya que su fabricación involucra procesos químicos con generación de subproductos tóxicos.

Los compuestos de carbono, en contraste, tienen un menor impacto ambiental, ya que su producción se realiza a partir de materiales abundantes y reciclables en muchos casos. Sin embargo, algunos procesos requieren catalizadores basados en metales pesados. Además, los nanotubos de carbono y ciertos materiales de grafeno pueden ser difíciles de degradar en el medio ambiente, lo que genera un problema de acumulación de residuos.

El hidrógeno comprimido tiene un impacto ambiental moderado, pudiendo llegar a ser incluso nulo, dependiendo de la fuente de producción del hidrógeno. Si se obtiene utilizando energías renovables, su impacto es bajo, pero si proviene de fuentes fósiles, su huella de carbono puede ser considerable [60]. Los últimos años e industrias apuestan por minimizar la huella de carbono, por lo que el impacto ambiental es cada vez menor.

Teniendo en cuenta esto, se ha otorgado una puntuación de 7 al hidrógeno comprimido, 5 a los compuestos con base de carbono, y 4 a hidruros metálicos y MOFs.



Figura 3-24 Evaluación impacto ambiental

En la Tabla 3-5 se muestra un resumen de cómo se comporta cada alternativa en función de los criterios seleccionados.

	Compuestos con base de carbono	MOFs	Hidruros metálicos	Hidrógeno comprimido
Densidad gravimétrica	~ 2%	Hasta 7,5%	Hasta 2%	Hasta 13%
Densidad Volumétrica	~ 20 kg H ₂ /m ³	32 kg H ₂ /m ³	~ 150 kg H ₂ /m ³	Hasta 40 kg H ₂ /m ³
Condiciones de operación	Temperaturas criogénicas y presiones moderadas	Temperaturas criogénicas (~ 77K) y presiones moderadas (hasta 70 bar)	Temperatura ambiente y presión atmosférica	Temperatura ambiente y presiones muy altas (hasta 800 bar)
Coste	Moderado	Elevado	Elevado	Bajo
Madurez tecnológica	Aplicaciones en desarrollo	En investigación avanzada	Utilizado en aplicaciones específicas pero con limitaciones	Tecnología madura y ampliamente implementada
Seguridad	Generalmente seguros	Requiere manejo cuidadoso	Moderado	Baja
Eficiencia	Muy baja	Baja	Alta	Moderada
Durabilidad y ciclo de vida	Alta	Limitada por degradación química	Moderada	Alta
Escalabilidad	Moderada	Baja	Moderada	Mayor
Impacto ambiental	Moderado	Moderado	Bajo	Depende de la manera de obtención de hidrógeno

Tabla 3-5 Resumen alternativas en función de los criterios

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la revisión de las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, la identificación de los criterios clave para su evaluación y el desarrollo de los métodos multicriterio; en este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante los métodos de decisión multicriterio AHP y TOPSIS.

Para ello, se han construido las correspondientes matrices de decisión y se han aplicado los cálculos necesarios para la obtención de las prioridades y rankings finales. El análisis comparativo entre ambos métodos proporciona una validación cruzada de los resultados y permite evaluar la coherencia de la alternativa óptima identificada. A continuación, se detallan las matrices utilizadas y el desarrollo de los cálculos pertinentes.

4.1 Resultados método AHP

En relación al desarrollo visto en el apartado 3.1, el primer paso para llevar a cabo el método AHP es la ponderación de los criterios a utilizar. En este caso, la ponderación es la mostrada en la Tabla 3-4, donde C1 se corresponde al criterio de seguridad, C2 eficiencia, C3 capacidad de almacenamiento, C4 durabilidad y ciclo de carga, C5 madurez tecnológica, C6 impacto ambiental, C7 coste y C8 escalabilidad. A su vez, las cuatro alternativas que se plantean se nombran A1, A2, A3 y A4, correspondientes a hidruros metálicos, MOFs, compuestos con base de carbono e hidrógeno comprimido en estado gaseoso, respectivamente. La matriz de ponderación de criterios se muestra en la Tabla 4-1.

Vector S	CRITERIOS
0,2222	Seguridad
0,1944	Eficiencia
0,1667	Capacidad almacenamiento
0,1389	Durabilidad
0,1100	Madurez tecnológica
0,0833	Impacto ambiental
0,0556	Coste
0,0278	Escalabilidad

$$\sum = 1$$

Tabla 4-1 Matriz de ponderación de criterios

4.1.1 Seguridad

Para dicho criterio, se muestran a continuación las calificaciones que recibieron cada una de las alternativas y la matriz de comparaciones pareadas.

Nota alternativas	C1	A1	A2	A3	A4
4	A1		0,3333	0,1667	3,0000
6	A2	3,0000		0,2500	5,0000
9	A3	6,0000	4,0000		8,0000
2	A4	0,3333	0,2000	0,1250	

Tabla 4-2 Matriz de comparaciones pareadas para C1

El siguiente paso consiste en la normalización de dicha matriz:

B=A*A	A1	A2	A3	A4	C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	1,9333	0,7917	9,0000	A1	0,0956	0,1043	0,1169	0,1023
A2	9,1667	4,0000	1,6250	21,0000	A2	0,2190	0,2157	0,2400	0,2386
A3	26,6667	11,6000	4,0000	54,0000	A3	0,6372	0,6255	0,5906	0,6136
A4	2,0167	1,0111	0,3556	4,0000	A4	0,0482	0,0545	0,0525	0,0455

$\Sigma =$ 41,8500 18,5444 6,7722 88,0000 155,1667

Tabla 4-3 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C1

A partir de la misma, se procede al cálculo del vector propio de cada alternativa para C1

	V (Vector Propio)
A1	0,1048
A2	0,2283
A3	0,6168
A4	0,0502

Tabla 4-4 Vectores propios de las alternativas para C1

Para verificar la consistencia del método, se llevaba a cabo el cálculo del vector fila, cociente, $\lambda_{\max}$ (3-3), índice de consistencia (3-4) y razón de consistencia (3-5):

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{\max} =$ 4,1471	IC (Índice de Consistencia) =	0,0490
0,4342	4,1446			
0,9476	4,1502		RC (Razón de Consistencia) =	5,45%
2,5599	4,1506			
0,2078	4,1430			

Tabla 4-5 Verificación de la consistencia del método para C1

Una vez aprobada la consistencia del método, ya que la razón de consistencia es inferior al 9% permitido por el tamaño de la matriz, como se vio en el apartado 3.1.4, se dan por válidos los valores obtenidos de los vectores propios, que se ven de manera más clara en la Figura 4-1 Importancia relativa de cada alternativa para C1, en la que se observa que los MOFs son la alternativa más segura y el hidrógeno comprimido la que más riesgos acarrea.

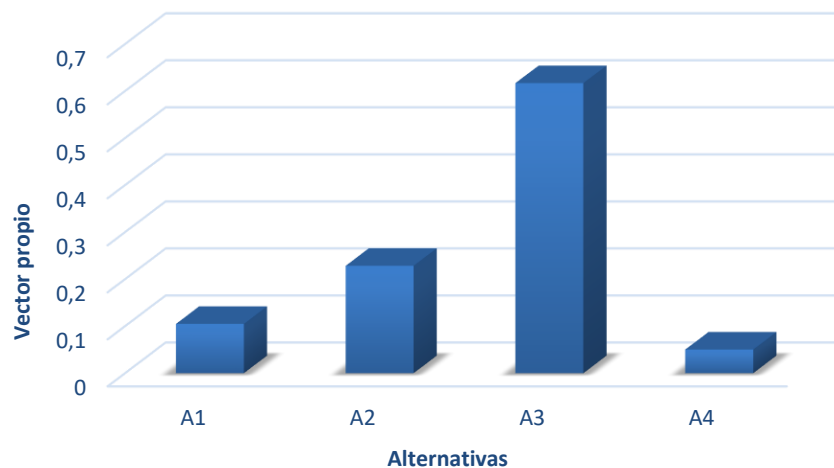


Figura 4-1 Importancia relativa de cada alternativa para C1

4.1.2 Eficiencia

A continuación, se presentan las valoraciones asignadas a cada alternativa para este criterio, junto con la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-6). Al igual que en criterio anterior, se procedió a normalizar la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-7) y se calcularon los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-8) y la razón de consistencia (Tabla 4-9).

Nota alternativas	C2	A1	A2	A3	A4
7	A1		5,0000	7,0000	3,0000
3	A2	0,2000		3,0000	0,3333
1	A3	0,1429	0,3333		0,2000
5	A4	0,3333	3,0000	5,0000	

Tabla 4-6 Matriz de comparaciones pareadas para C2

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	21,3333	44,0000	9,0667
A2	0,9397	4,0000	9,0667	1,8667
A3	0,4190	1,9810	4,0000	0,9397
A4	1,9810	9,3333	21,3333	4,0000

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A2	0,5450	0,5821	0,5612	0,5712
A2	0,1280	0,1091	0,1156	0,1176
A3	0,0571	0,0541	0,0510	0,0592
A4	0,2699	0,2547	0,2721	0,2520

$\Sigma =$ 7,3397 36,6476 78,4000 15,8730 138,2603

Tabla 4-7 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C2

V (Vector Propio)	
A1	0,5649
A2	0,1176
A3	0,0553
A4	0,2622

Tabla 4-8 Vectores propios de las alternativas para C2

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} =$
2,3268	4,1191	4,1170
0,4840	4,1154	
0,2277	4,1140	
1,0800	4,1194	

IC (Índice de Consistencia) =	0,0390
-------------------------------	--------

RC (Razón de Consistencia) =	4,33%
------------------------------	-------

Tabla 4-9 Verificación de la consistencia del método para C2

Se dan por válidos los resultados obtenidos al entrar en valor permitido la razón de consistencia, observándose en la Figura 4-2 que los hidruros metálicos son la alternativa con mayor eficiencia; mientras que los MOFs son los menos valorados en este aspecto.

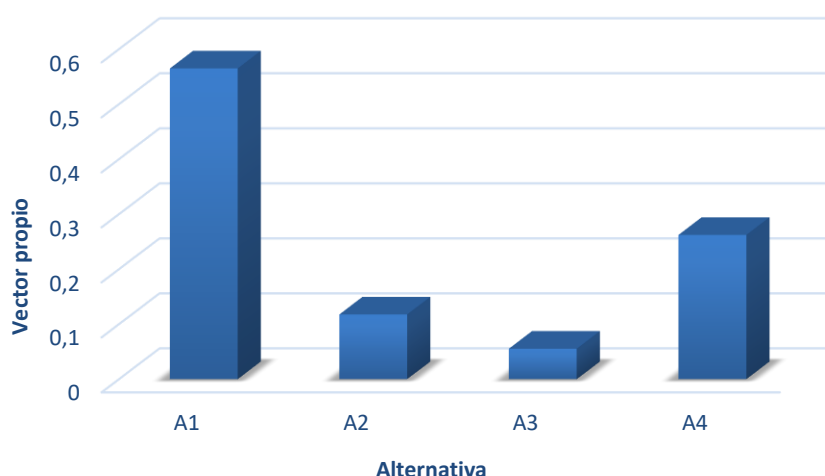


Figura 4-2 Importancia relativa de cada alternativa para C2

4.1.3 Capacidad de almacenamiento

Se muestran a continuación las puntuaciones otorgadas a cada alternativa para este criterio, así como la matriz de comparaciones por pares (Tabla 4-10). Se llevó a cabo la normalización de la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-11) y, posteriormente, se calcularon los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-12) junto con la razón de consistencia (Tabla 4-13).

Nota alternativas	C3	A1	A2	A3	A4
9	A1		6,0000	9,0000	3,0000
4	A2	0,1667		4,0000	0,2500
1	A3	0,1111	0,2500		0,1429
7	A4	0,3333	4,0000	7,0000	

Tabla 4-10 Matriz de comparaciones pareadas para C3

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	26,2500	63,0000	8,7857
A2	0,8611	4,0000	11,2500	1,5714
A3	0,3115	1,7381	4,0000	0,6815
A4	2,1111	11,7500	33,0000	4,0000
$\Sigma =$	7,2837	43,7381	111,2500	15,0387

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,5492	0,6002	0,5663	0,5842
A2	0,1182	0,0915	0,1011	0,1045
A3	0,0428	0,0397	0,0360	0,0453
A4	0,2898	0,2686	0,2966	0,2660

Tabla 4-11 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C3

V (Vector Propio)	
A1	0,5750
A2	0,1038
A3	0,0409
A4	0,2803

Tabla 4-12 Vectores propios de las alternativas para C3

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	λ_{max}= 4,1806	IC (Índice de Consistencia) =	0,0602
2,4072	4,1868		RC (Razón de Consistencia) =	6,69%
0,4335	4,1754			
0,1708	4,1720			
1,1738	4,1882			

Tabla 4-13 Verificación de la consistencia del método para C3

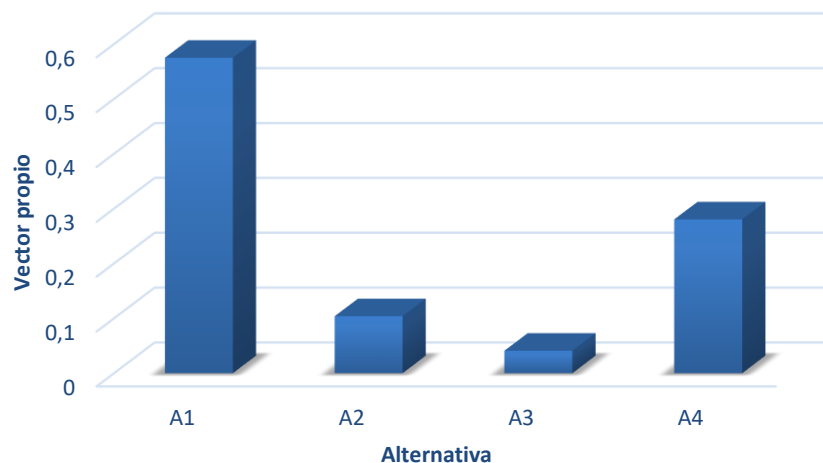


Figura 4-3 Importancia relativa de cada alternativa para C3

La Figura 4-3 muestra como los hidruros metálicos tienen una densidad de almacenamiento muy grande. En cambio, los MOFs, no son capaces de almacenar tanto hidrógeno como el resto de las alternativas; tanto volumétricamente como gravimétricamente.

4.1.4 Durabilidad y ciclo de carga

En las siguientes tablas se reflejan las evaluaciones de cada alternativa en relación con este criterio y la correspondiente matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-14). La matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-15) fue normalizada, tras lo cual se determinaron los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-16) y se obtuvo la razón de consistencia (Tabla 4-17).

Nota alternativas	C4	A1	A2	A3	A4
5	A1		3,0000	0,3333	0,3333
3	A2	0,3333		0,2000	0,2000
7	A3	3,0000	5,0000		1,0000
7	A4	3,0000	5,0000	1,0000	

Tabla 4-14 Matriz de comparaciones pareadas para C4

D=C*C	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	9,3333	1,6000	1,6000
A2	1,8667	4,0000	0,7111	0,7111
A3	10,6667	24,0000	4,0000	4,0000
A4	10,6667	24,0000	4,0000	4,0000

E=Dnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,1471	0,1522	0,1552	0,1552
A2	0,0686	0,0652	0,0690	0,0690
A3	0,3922	0,3913	0,3879	0,3879
A4	0,3922	0,3913	0,3879	0,3879

$$\Sigma = \begin{matrix} & 27,2000 & 61,3333 & 10,3111 & 10,3111 & 109,1556 \end{matrix}$$

Tabla 4-15 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C4

V (Vector Propio)	
A1	0,1524
A2	0,0679
A3	0,3898
A4	0,3898

Tabla 4-16 Vectores propios de las alternativas para C4

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	λ_{max} = 4,0435	IC (Índice de Consistencia) =	0,0145
0,6161	4,0429			
0,2747	4,0427			
1,5766	4,0442		RC (Razón de Consistencia) =	1,61%
1,5766	4,0442			

Tabla 4-17 Verificación de la consistencia del método para C4

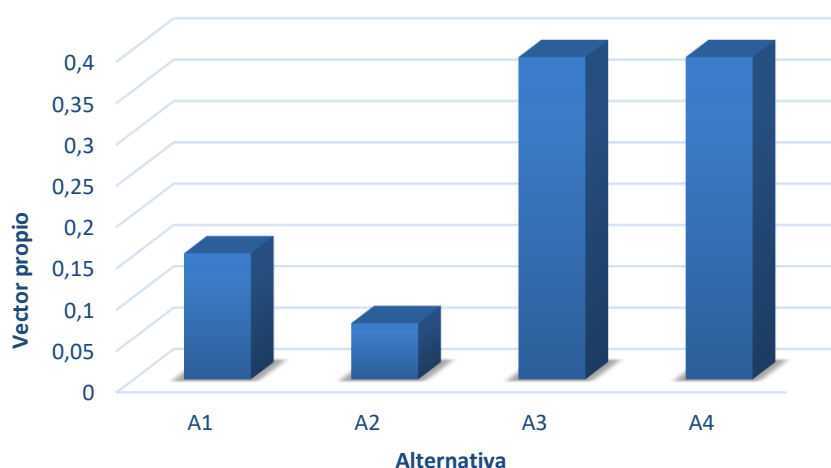


Figura 4-4 Importancia relativa de cada alternativa para C4

Tanto los MOFs como los tanques de hidrógeno comprimido presentan una gran durabilidad, lo que hace que ambos tengan el mayor vector propio en este criterio. En contraposición, los compuestos con base de carbono no destacan en este aspecto.

4.1.5 Madurez tecnológica

Para este criterio, se detallan a continuación las calificaciones asignadas a cada alternativa y la matriz de comparación entre ellas (Tabla 4-18). Primero, se normalizó la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-19) y, posteriormente, se calcularon tanto los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-20) como la razón de consistencia (Tabla 4-21).

Nota alternativas	C5	A1	A2	A3	A4
8	A1		8,0000	6,0000	0,5000
1	A2	0,1250		0,3333	0,1111
3	A3	0,1667	3,0000		0,1429
9	A4	2,0000	9,0000	7,0000	

Tabla 4-18 Matriz de comparaciones pareadas para C5

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	38,5000	18,1667	2,7460
A2	0,5278	4,0000	2,1944	0,3323
A3	0,9940	8,6190	4,0000	0,7024
A4	6,2917	55,0000	29,0000	4,0000

$$\Sigma = 11,8135 \quad 106,1190 \quad 53,3611 \quad 7,7808 \quad 179,0744$$

Tabla 4-19 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C5

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,3386	0,3628	0,3404	0,3529
A2	0,0447	0,0377	0,0411	0,0427
A3	0,0841	0,0812	0,0750	0,0903
A4	0,5326	0,5183	0,5435	0,5141

V (Vector Propio)	
A1	0,3487
A2	0,0416
A3	0,0826
A4	0,5271

Tabla 4-20 Vectores propios de las alternativas para C5

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max}=$	IC (Índice de Consistencia) =
1,4406	4,1313	4,1263	0,0421
0,1713	4,1215		
0,3407	4,1225		
2,1770	4,1301		

RC (Razón de Consistencia) =	4,68%
-------------------------------------	-------

Tabla 4-21 Verificación de la consistencia del método para C5

Una vez verificada la consistencia del método, se representan gráficamente (Figura 4-5) los resultados obtenidos para este criterio; en la que se observa que el hidrógeno comprimido es la alternativa que está más desarrollada e implementada en la industria, mientras que los compuestos con base de carbono y los MOFs siguen en fase de investigación.

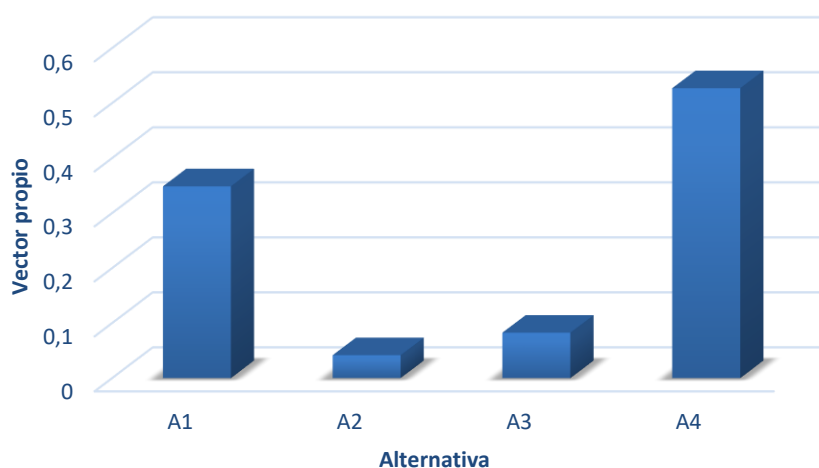


Figura 4-5 Importancia relativa de cada alternativa para C5

4.1.6 Impacto ambiental

A continuación, se presentan las puntuaciones que recibió cada alternativa en este criterio, junto con la matriz de comparación de pares (Tabla 4-22). Se realizó la normalización de la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-23), seguida del cálculo de los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-24) y de la razón de consistencia (Tabla 4-25).

Nota alternativas	C6	A1	A2	A3	A4
4	A1		1,0000	0,5000	0,2500
4	A2	1,0000		0,5000	0,2500
5	A3	2,0000	2,0000		0,3333
7	A4	4,0000	4,0000	3,0000	

Tabla 4-22 Matriz de comparaciones pareadas para C6

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	4,0000	2,2500	0,9167
A2	4,0000	4,0000	2,2500	0,9167
A3	7,3333	7,3333	4,0000	1,6667
A4	18,0000	18,0000	10,0000	4,0000

$\Sigma =$ 33,3333 33,3333 18,5000 7,5000 92,6667

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,1200	0,1200	0,1216	0,1222
A2	0,1200	0,1200	0,1216	0,1222
A3	0,2200	0,2200	0,2162	0,2222
A4	0,5400	0,5400	0,5405	0,5333

Tabla 4-23 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C6

V (Vector Propio)	
A1	0,1210
A2	0,1210
A3	0,2196
A4	0,5385

Tabla 4-24 Vectores propios de las alternativas para C6

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} =$ 4,0206	IC (Índice de Consistencia) =	0,0069
0,4863	4,0207			
0,4863	4,0207			
0,8829	4,0205			
2,1650	4,0206			

RC (Razón de Consistencia) 0,76%

Tabla 4-25 Verificación de la consistencia del método para C6

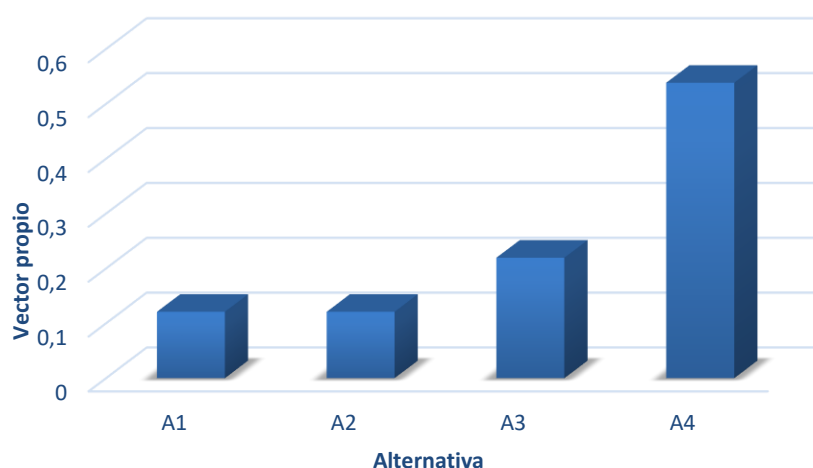


Figura 4-6 Importancia relativa de cada alternativa para C6

La Figura 4-6 muestra como el hidrógeno comprimido es la alternativa que más daño provoca al medio ambiente, aunque cada vez son más los estudios e investigaciones para reducir al máximo ese impacto. Por otro lado, tecnologías de almacenamiento más nuevas como los compuestos con base de carbono y los hidruros metálicos presentan un impacto ambiental mucho más reducido.

4.1.7 Coste

Se exponen a continuación las calificaciones de las distintas alternativas en función de este criterio, junto con la matriz de comparaciones entre ellas (Tabla 4-26). Se aplicó la normalización a la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-27), obteniendo los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-28) y calculando la razón de consistencia (Tabla 4-29).

Nota alternativas	C7	A1	A2	A3	A4
3	A1		1,0000	0,5000	0,3333
3	A2	1,0000		0,5000	0,3333
4	A3	2,0000	2,0000		0,5000
5	A4	3,0000	3,0000	2,0000	

Tabla 4-26 Matriz de comparaciones pareadas para C7

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	4,0000	2,1667	1,2500
A2	4,0000	4,0000	2,1667	1,2500
A3	7,5000	7,5000	4,0000	2,3333
A4	13,0000	13,0000	7,0000	4,0000

$\Sigma =$ 28,5000 28,5000 15,3333 8,8333 81,1667

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,1404	0,1404	0,1413	0,1415
A2	0,1404	0,1404	0,1413	0,1415
A3	0,2632	0,2632	0,2609	0,2642
A4	0,4561	0,4561	0,4565	0,4528

Tabla 4-27 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C7

V (Vector Propio)	
A1	0,1409
A2	0,1409
A3	0,2628
A4	0,4554

Tabla 4-28 Vectores propios de las alternativas para C7

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} =$	IC (Índice de Consistencia) =
0,5650	4,0104	4,0104	0,0035
0,5650	4,0104		
1,0541	4,0103		
1,8263	4,0104		
			RC (Razón de Consistencia) = 0,38%

Tabla 4-29 Verificación de la consistencia del método para C7

Habiendo sido aprobada la consistencia del método, se muestran gráficamente los resultados obtenidos en la Figura 4-7. El gran conocimiento y la implementación del hidrógeno comprimido hacen que su coste sea mucho menos que otras alternativas más modernas como los hidruros metálicos y los compuestos con base de carbono, cuya investigación y uso suponen aún un esfuerzo económico.

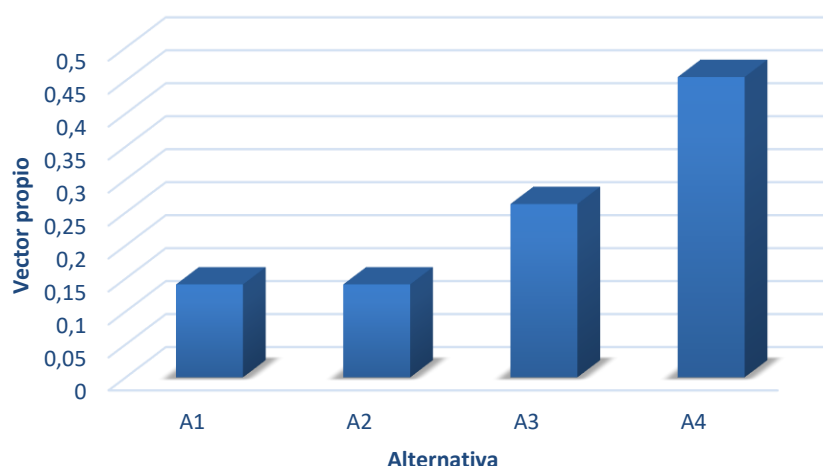


Figura 4-7 Importancia relativa de cada alternativa para C7

4.1.8 Escalabilidad

En este apartado se muestran las valoraciones de cada alternativa según este criterio, junto con la matriz de comparaciones por pares (Tabla 4-30). La normalización de la matriz de comparaciones pareadas (Tabla 4-31) fue realizada, permitiendo así el cálculo de los vectores propios de las alternativas (Tabla 4-32) y la determinación de la razón de consistencia (Tabla 4-33).

Nota alternativas	C8	A1	A2	A3	A4
4	A1		3,0000	2,0000	0,3333
2	A2	0,3333		0,5000	0,2000
3	A3	0,5000	2,0000		0,2500
6	A4	3,0000	5,0000	4,0000	

Tabla 4-30 Matriz de comparaciones pareadas para C8

B=A*A	A1	A2	A3	A4
A1	4,0000	11,6667	6,8333	1,7667
A2	1,5167	4,0000	2,4667	0,6361
A3	2,4167	6,7500	4,0000	1,0667
A4	9,6667	27,0000	16,5000	4,0000

$\Sigma =$ 17,6000 49,4167 29,8000 7,4694 104,2861

C=Bnorm	A1	A2	A3	A4
A1	0,2273	0,2361	0,2293	0,2365
A2	0,0862	0,0809	0,0828	0,0852
A3	0,1373	0,1366	0,1342	0,1428
A4	0,5492	0,5464	0,5537	0,5355

Tabla 4-31 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C8

V (Vector Propio)	
A1	0,2323
A2	0,0838
A3	0,1377
A4	0,5462

Tabla 4-32 Vectores propios de las alternativas para C8

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} =$ 4,0511	IC (Índice de Consistencia) =	0,0170
0,9411	4,0514			
0,3393	4,0507			
0,5580	4,0510			
2,2128	4,0513			

RC (Razón de Consistencia) = 1,89%

Tabla 4-33 Verificación de la consistencia del método para C8

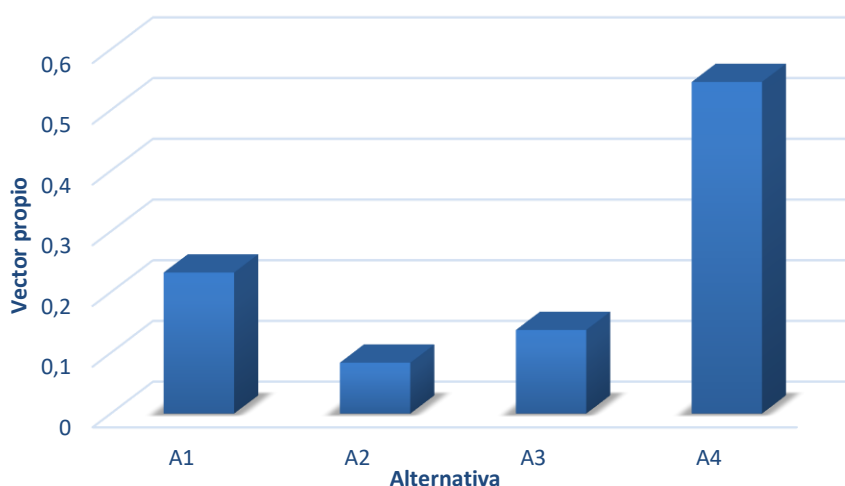


Figura 4-8 Importancia relativa de cada alternativa para C8

En este último criterio el hidrógeno comprimido se impone ante las demás alternativas al ser el más utilizable a gran escala en la industria. Por el contrario, los compuestos con base de carbono y los MOFs se muestran como alternativas con aplicaciones de menor escala.

4.1.9 Resultados finales

Una vez obtenidos los vectores propios de cada alternativa para cada criterio, se construye una matriz donde se plasman todos esos datos, la cual se multiplica por la matriz de ponderación de criterios (Tabla 4-34):

	Vector Propio								Vector S
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
A1	0,1048	0,5649	0,5750	0,1524	0,3487	0,1210	0,1409	0,2323	0,2222
A2	0,2283	0,1176	0,1038	0,0679	0,0416	0,1210	0,1409	0,0838	0,1944
A3	0,6168	0,0553	0,0409	0,3898	0,0826	0,2196	0,2628	0,1377	0,1667
A4	0,0502	0,2622	0,2803	0,3898	0,5271	0,5385	0,4554	0,5462	0,1389
X									0,1111
									0,0833
									0,0556
									0,0278

Tabla 4-34 Múltiplo de la matriz de vectores propios y la ponderación de criterios

El producto del vector propio de cada criterio por el vector S (la ponderación de cada uno de los criterios) permite obtener los resultados finales del método de análisis multicriterio AHP:

A1	0,3132	Hidruros Metálicos
A2	0,1252	MOFs
A3	0,2547	Compuestos con base carbono
A4	0,3069	Hidrógeno comprimido

Tabla 4-35 Resultados del método multicriterio AHP

En la Figura 4-9 se muestran los resultados obtenidos de manera gráfica.

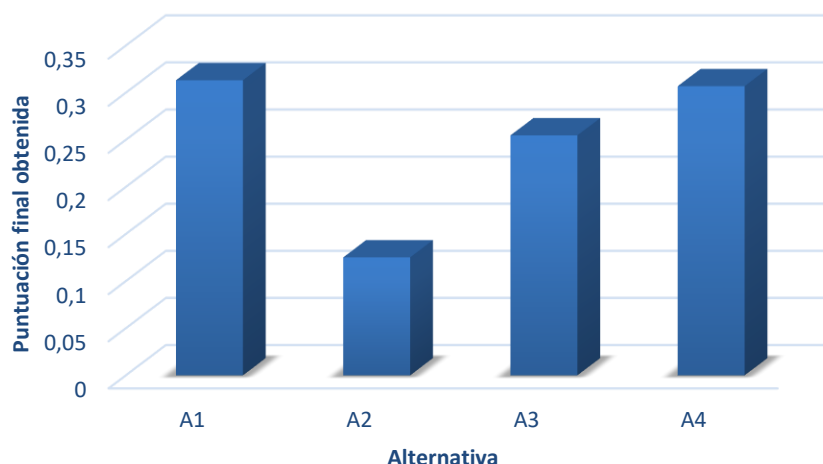


Figura 4-9 Representación gráfica de los resultados obtenidos en el método AHP

Los hidruros metálicos resultan como la alternativa más prometedora; con una puntuación cercana al hidrógeno comprimido. En tercer lugar se encuentran los MOFs y, en última posición, los compuestos con base de carbono. Aun sin ser la alternativa que más criterios cumple con la mayor calificación entre las alternativas, los hidruros metálicos resultan como la mejor alternativa debido a la polivalencia que muestran; ya que, en general, cumplen con todos los criterios a excepción del coste. Además, en criterios importantes como la eficiencia y la capacidad de almacenamiento, los hidruros metálicos cumplen con creces.

El hidrógeno comprimido, debido a su gran implementación en la industria, conocimiento de la tecnología y la eficiencia que se ha logrado alcanzar en los procesos, ha recibido la más alta calificación en cinco de los ocho criterios. No obstante, en criterios ponderados de mayor importancia como la seguridad, la eficiencia y la densidad de almacenamiento, el hidrógeno comprimido no cumple de manera tan satisfactoria como lo hacen los hidruros metálicos.

Por último se sitúan los MOFs y los compuestos con base de carbono. Al ser ambas tecnologías emergentes, las cuales se encuentran en fase de investigación, desarrollo y mejora, no pueden competir por el momento con el resto de las alternativas en la mayoría de las aplicaciones. Los MOFs, debido a su gran seguridad y siendo este el criterio de mayor ponderación se sitúa por encima de los compuestos con base de carbono.

4.2 Resultados método TOPSIS

De manera análoga al método anterior, se muestran en este apartado las matrices obtenidas al realizar los pasos explicados en el apartado 3.2 para evaluar las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno.

En primer lugar se construye la matriz de decisión (Tabla 4-36), utilizando las mismas calificaciones que se emplearon para llevar a cabo el método AHP y que se explican en el apartado 3.4, la cual se normaliza mediante la expresión (3-6) (Tabla 4-37) para poder desarrollar el método.

Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	4	7	9	5	8	4	3	4
A2	6	3	4	3	1	4	3	2
A3	9	1	1	7	3	5	4	3
A4	2	5	7	7	9	7	5	6
$\sum$ cuadrados =	137	84	147	132	155	106	59	65

Tabla 4-36 Matriz de decisión método TOPSIS

Normalizada	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	0,3417	0,7638	0,7423	0,4352	0,6426	0,3885	0,3906	0,4961
A2	0,5126	0,3273	0,3299	0,2611	0,0803	0,3885	0,3906	0,2481
A3	0,7689	0,1091	0,0825	0,6093	0,2410	0,4856	0,5208	0,3721
A4	0,1709	0,5455	0,5774	0,6093	0,7229	0,6799	0,6509	0,7442

Tabla 4-37 Matriz de decisión normalizada método TOPSIS

El siguiente paso consiste en la ponderación de criterios (Tabla 4-38), que es la misma que la utilizada en el método AHP, explicada en el apartado 3.1.5. Para este método, es necesario especificar si el criterio es positivo (a mayor valor mejor) o negativo (a menor valor mejor). En este caso, al haberse tenido en cuenta ya al dar las calificaciones, no va a ser necesario realizar ninguna diferencia entre criterios positivos y negativos en ninguna operación del método.

	Ponderación de criterios							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
PESO	0,2222	0,1944	0,1667	0,1389	0,1111	0,0833	0,0556	0,0278
TIPO	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Positivo	Negativo	Negativo	Positivo

Tabla 4-38 Ponderación de criterios método TOPSIS

Una vez obtenida esta matriz, se utiliza para obtener la matriz de decisión normalizada ponderada (Tabla 4-39).

Matriz de decisión normalizada ponderada								
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	0,0759	0,1485	0,1237	0,0604	0,0714	0,0324	0,0217	0,0138
A2	0,1139	0,0636	0,0550	0,0363	0,0089	0,0324	0,0217	0,0069
A3	0,1709	0,0212	0,0137	0,0846	0,0268	0,0405	0,0289	0,0103
A4	0,0380	0,1061	0,0962	0,0846	0,0803	0,0567	0,0362	0,0207
Norma euclídea	0,2222	0,1944	0,1667	0,1389	0,1111	0,0833	0,0556	0,0278
Máximo	0,1709	0,1485	0,1237	0,0846	0,0803	0,0567	0,0362	0,0207
Mínimo	0,0380	0,0212	0,0137	0,0363	0,0089	0,0324	0,0217	0,0069

Tabla 4-39 Matriz de decisión normalizada ponderada

De esta matriz se obtienen los ideales positivos y negativos para cada criterio, mostrados en la Tabla 4-40.

Cifras ideales	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Ideal Positivo	0,1709	0,1485	0,1237	0,0846	0,0803	0,0567	0,0362	0,0207
Ideal negativo	0,0380	0,0212	0,0137	0,0363	0,0089	0,0324	0,0217	0,0069

Tabla 4-40 Cifras ideales para cada criterio

Teniendo en cuenta estas cifras ideales, se calculan los vectores distancia a los mismos, tanto positivos (Tabla 4-41) como negativos (Tabla 4-42).

Vector diferencia con ideal positivo									
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Norma euclídea
A1	0,0949	0,0000	0,0000	0,0242	0,0089	0,0243	0,0145	0,0069	0,1026
A2	0,0570	0,0849	0,0687	0,0484	0,0714	0,0243	0,0145	0,0138	0,1536
A3	0,0000	0,1273	0,1100	0,0000	0,0535	0,0162	0,0072	0,0103	0,1777
A4	0,1329	0,0424	0,0275	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1422

Tabla 4-41 Vector diferencia con ideal positivo

Vector diferencia con ideal negativo									
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Norma euclídea
A1	0,0380	0,1273	0,1100	0,0242	0,0625	0,0000	0,0000	0,0069	0,1851
A2	0,0759	0,0424	0,0412	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0963
A3	0,1329	0,0000	0,0000	0,0484	0,0178	0,0081	0,0072	0,0034	0,1430
A4	0,0000	0,0849	0,0825	0,0484	0,0714	0,0243	0,0145	0,0138	0,1498

Tabla 4-42 Vector diferencia con ideal negativo

Por último, se obtienen los resultados de cada alternativa, conocidos como ratio de proximidad/lejanía aplicando la expresión (3-10).

Ratio de proximidad/lejanía		
A1	0,6435	Hidruros metálicos
A2	0,3853	MOFs
A3	0,4459	Compuestos Carbono
A4	0,5130	Hidrógeno comprimido

Tabla 4-43 Ratio de proximidad/lejanía método TOPSIS

Los resultados obtenidos tras la realización del método TOPSIS se ven reflejados en la Figura 4-10.

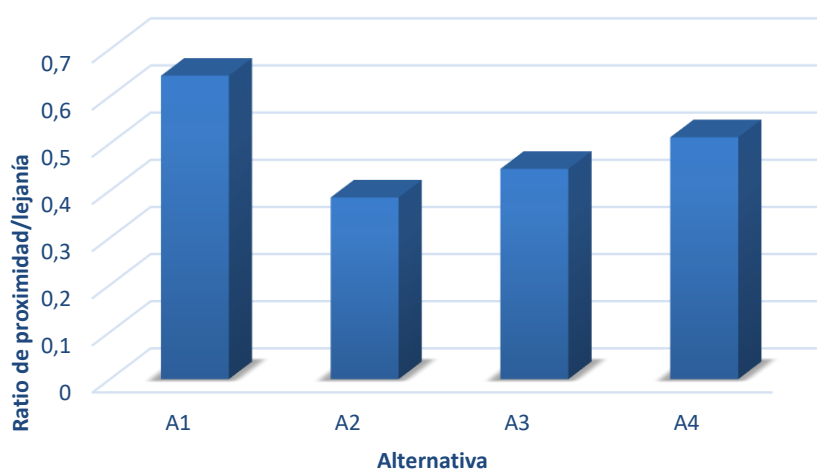


Figura 4-10 Resultados obtenidos método TOPSIS

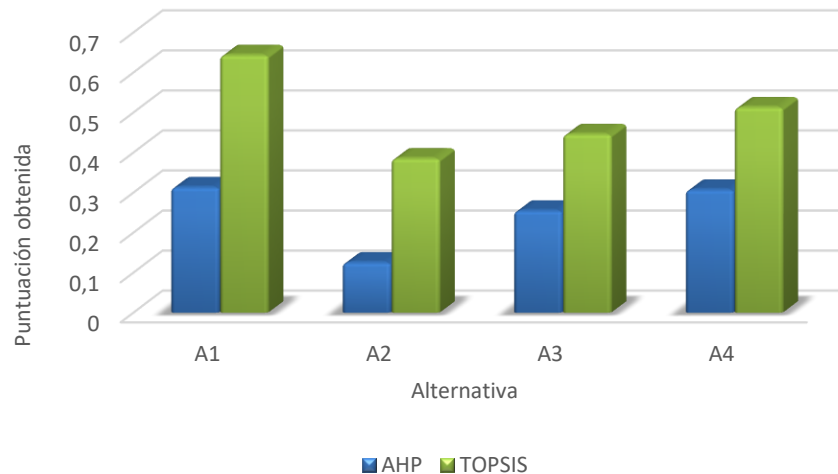


Figura 4-11 Comparativa de los resultados obtenidos en cada método

Debido a la diferencia en la metodología y los cálculos, los resultados finales del método TOPSIS son mayores que los del método AHP [72]. Esto se debe principalmente a la forma en la que ambos métodos normalizan y calculan los valores. En primer lugar, la forma en que se normalizan los valores es diferente en ambos métodos. AHP basa sus cálculos en comparaciones pareadas entre criterios y alternativas, obteniendo pesos relativos que suman 1. Esto significa que las puntuaciones reflejan la proporción de importancia de cada alternativa en función de los criterios seleccionados. En cambio, TOPSIS normaliza los valores utilizando la norma euclidiana, lo que genera una matriz de decisión estandarizada y ponderada sin restricciones de escala, permitiendo que las puntuaciones finales sean mayores [73].

Además, los resultados finales se calculan de manera distinta en cada método. En AHP, las puntuaciones representan la preferencia relativa de cada alternativa con respecto a las demás dentro del conjunto analizado, mientras que en TOPSIS, las puntuaciones se obtienen midiendo la distancia de cada alternativa a una solución ideal y una solución anti-ideal. Como consecuencia, en TOPSIS los valores no están limitados a una escala estricta, y pueden tomar valores más altos dependiendo de la dispersión de los datos [73].

Por último, la interpretación de las puntuaciones también es diferente. En AHP, las puntuaciones reflejan la importancia relativa dentro del conjunto de alternativas analizado, mientras que en TOPSIS, las puntuaciones indican qué tan cerca está cada alternativa de la mejor opción posible [73]. A pesar de todo ello, el ranking de puntuaciones sí que debería ser coincidente entre ambos métodos [74].

5 CASO DE ESTUDIO

5.1 Introducción al hidrógeno como posible alternativa de combustible en el sector marítimo

El hidrógeno se ha convertido en una opción cada vez más importante para hacer que el transporte sea más sostenible y reducir las emisiones contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), monóxido y dióxido de carbono (CO, CO₂) [75]. Su uso en pilas de combustible permite generar electricidad sin producir gases nocivos, lo que lo hace atractivo para distintos tipos de transporte, como coches, trenes, barcos y aviones. Sin embargo, todavía existen desafíos para su uso a gran escala, como la producción eficiente y la falta de infraestructuras adecuadas

En el transporte terrestre, los vehículos que usan hidrógeno han demostrado ser útiles, sobre todo en camiones y autobuses de larga distancia, ya que permiten repostar rápidamente y tienen una mayor autonomía en comparación con los eléctricos con batería [76]. A pesar de esto, su implementación es limitada debido a la falta de estaciones de hidrógeno y el alto coste de producción del hidrógeno verde

En la aviación, aunque los aviones de hidrógeno aún están en fase de pruebas, empresas como Airbus están investigando formas de usarlos en vuelos comerciales en el futuro. Actualmente, los estudios [77] analizan el uso de hidrógeno líquido en motores modificados o pilas de combustible.

La industria marítima ha sido históricamente un pilar clave para el crecimiento económico y social. Sin embargo, el aumento en la demanda de transporte marítimo y la prolongación de la vida útil de los buques están incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que actualmente representan entre un 2% y 3% de las emisiones globales y podrían aumentar hasta un 50% en 2050 [78]. A pesar de que el transporte marítimo es el modo de transporte de carga más eficiente en términos energéticos, se necesita un enfoque global para mejorar aún más su eficiencia y controlar sus emisiones.

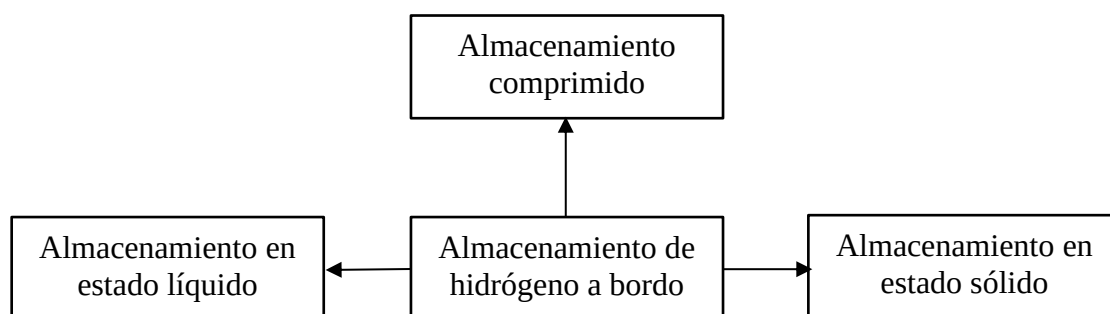


Figura 5-1 Técnicas de almacenamiento de hidrógeno a bordo (autoría propia, basado en [61])

El uso del hidrógeno y las pilas de combustible es una estrategia clave para la descarbonización del sector marítimo, pero aún enfrenta varios desafíos. Entre ellos, la necesidad de mejorar la escalabilidad y densidad de potencia de las pilas de combustible PEM, así como la viabilidad del almacenamiento de hidrógeno a bordo, especialmente en buques de gran tamaño. La seguridad es otro aspecto crítico, ya que el hidrógeno presenta riesgos diferentes a los de los combustibles convencionales y requiere infraestructuras específicas. Además, no existe aún un marco regulador adecuado. La viabilidad económica también es un obstáculo, debido a los altos costes del hidrógeno y la infraestructura necesaria. Finalmente, la falta de infraestructura en los puertos dificulta su adopción en el sector marítimo [79].

En este capítulo se aplicarán los métodos de análisis multicriterio ya utilizados en la realización de un estudio con la finalidad de obtener la mejor alternativa de almacenamiento de hidrógeno en el sector marítimo.

5.2 La pila de combustible

Una pila de combustible, también conocida como célula de combustible, es un dispositivo electroquímico capaz de generar electricidad a partir de una reacción química entre un combustible y un agente oxidante. A diferencia de una batería convencional, que almacena la energía en su interior y requiere recarga una vez agotada, la pila de combustible se alimenta de manera continua con los reactivos necesarios para producir electricidad de forma sostenida [80].

El principio de funcionamiento de una pila de combustible radica en la interacción del hidrógeno, que actúa como combustible, y el oxígeno, que se suministra en el cátodo, como se puede ver de manera simplificada en la Figura 5-2 y como se explica más adelante en el apartado 5.2.2 [80].



Figura 5-2 Entradas y salidas en una pila de combustible de hidrógeno

Las pilas de combustible presentan varias características que las hacen destacar frente a los métodos tradicionales de generación de energía. Una de sus principales ventajas es su alta eficiencia, ya que logran convertir una mayor proporción de la energía contenida en el hidrógeno en electricidad en comparación con los motores térmicos [80].

Otro aspecto relevante es el bajo mantenimiento que requieren, ya que, al no contar con partes móviles sujetas a desgaste, su vida útil es significativamente mayor que la de los motores de combustión. Además, su diseño modular permite que puedan adaptarse a diversas aplicaciones, desde pequeños dispositivos portátiles hasta grandes sistemas de propulsión en el transporte, siendo de facilidad su instalación [80].

No obstante, también presentan problemas que pueden hacer inutilizable a la pila de combustible. Para operar correctamente, requieren hidrógeno de alta pureza. La presencia de impurezas como el monóxido de carbono puede afectar negativamente a los catalizadores y reducir la eficiencia del sistema [80].

El correcto funcionamiento de una pila de combustible también depende de una gestión eficiente de la humedad y el calor generado durante la reacción. La regulación de estos factores influye directamente en su rendimiento y en la estabilidad de su operación a lo largo del tiempo. Por ello, el diseño de los sistemas de gestión térmica y de agua es un aspecto clave en la optimización de las pilas de combustible para distintas aplicaciones [80].

5.2.1 Antecedentes

La historia de la pila de combustible se remonta al siglo XIX. En 1838, el científico Christian Friedrich Schönbein descubrió que una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno en un electrolito ácido podía generar electricidad sin que los electrodos de platino sufrieran alteraciones químicas [80]. Sin embargo, fue William R. Grove quien en 1839 desarrolló la primera pila de combustible funcional, al darse cuenta de que el proceso descubierto por Schönbein era la reacción inversa de la electrólisis del agua. Grove diseñó un dispositivo que generaba electricidad de manera continua mediante este principio [80].

Casi un siglo después, en 1932, Francis Thomas Bacon retomó el concepto y realizó mejoras significativas. Sustituyó el platino por níquel y el electrolito ácido por una solución de potasa, logrando en 1959 una pila alcalina capaz de generar 5 kW de potencia [80]. Esta tecnología atrajo el interés de la NASA en la década de 1960, que la utilizó en los programas espaciales Géminis y Apolo para proporcionar electricidad y agua potable a las naves espaciales. Posteriormente, la crisis del petróleo de los años 70 impulsó el desarrollo de las pilas de combustible como alternativa energética, incentivando la investigación y perfeccionamiento de la tecnología [80].

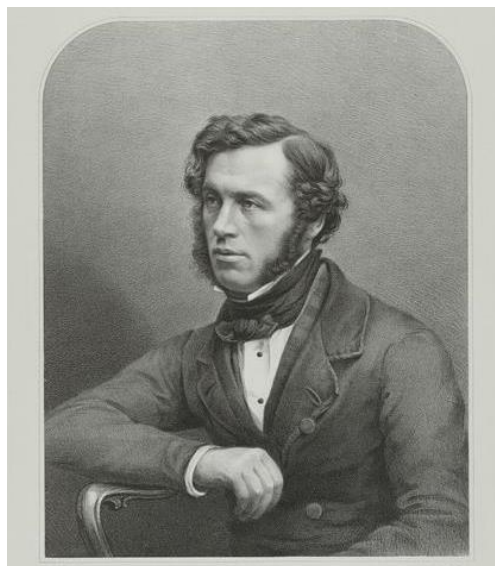


Figura 5-3 Sir William Robert Grove [81]

5.2.2 Funcionamiento

El funcionamiento de la pila de combustible se basa en la reacción que tiene el hidrógeno en el ánodo, descomponiéndose en protones y electrones. Los protones atraviesan un electrolito, mientras que los electrones, al no poder hacerlo, viajan a través de un circuito externo, generando electricidad en el proceso. Finalmente, en el cátodo, los protones y electrones se combinan con el oxígeno, formando agua como único subproducto [80].

La pila está compuesta por varios elementos clave, los cuales se muestran en la Figura 5-4: el ánodo y el cátodo, donde se producen los procesos que se mencionan en el anterior párrafo, el electrolito (una membrana especial que permite el paso de los protones pero impide el de los electrones) y las placas bipolares (facilitan la distribución del gas y la salida de la corriente generada [80]).

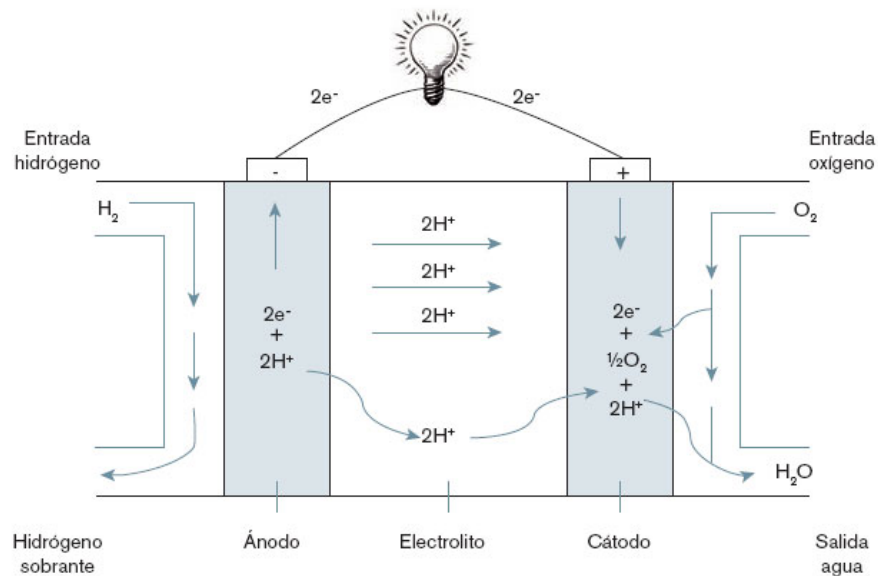


Figura 5-4 Esquema de funcionamiento básico de un pila de combustible [82]

5.2.3 Tipos de pilas de combustible

Existen diversos tipos de pilas de combustible, que se clasifican en función del electrolito empleado. Esto influye directamente en la temperatura de operación de la pila y requiere diversos grados de pureza de hidrógeno suministrado; haciéndolas más o menos idóneas para las distintas aplicaciones. A continuación, se muestra una tabla con las características principales de cada uno de los tipos de pila de combustible:

Tipo	Electrolito	Rendimiento	T ^a de operación (°C)	Aplicaciones
Pilas de Membrana Polimérica (PEMFC)	Polímero sólido	60%	60-90	Suministro energético para vehículos, máquinas portátiles y generación estacionaria.
Pilas de combustible Alcalinas (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	60%	90-100	Aplicaciones militares y espaciales.
Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	50-80%	175-200	Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles.
Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	60-90%	600-1000	Generación estacionaria
Pilas de Óxido Sólido (SOFC)	Óxido de zirconio sólido con adiciones de litio	60-90%	600-1000	Generación estacionaria

Tabla 5-1 Tipos de pilas de combustible. Fuente: APPICE

5.3 Almacenamiento de hidrógeno a bordo

Como se muestra en la Figura 5-1, existen diferentes alternativas de almacenar hidrógeno para su uso como combustible a bordo. A continuación, se explican dichas alternativas.

5.3.1 Hidrógeno comprimido

El almacenamiento de hidrógeno comprimido es el método más desarrollado y experimentado entre las distintas tecnologías. A 25 °C y 0,1 MPa, la densidad del hidrógeno es 0,0807 kg/m³ [83], lo que es significativamente menor que la de combustibles como el diésel; por lo que para aumentar su densidad energética una opción es comprimirlo; alcanzando hasta 56,49 kg/m³ a 700 bar [83]. El hidrógeno se mantiene a presiones muy altas, entre 350 y 700 bar, con densidades de 23,3 kg/m³ y 39,3 kg/m³, respectivamente. Este almacenamiento consta de dos componentes principales: tanques de almacenamiento y compresores [61].

Los tipos de tanques existentes para el almacenamiento de hidrógeno comprimido se explican en el apartado 3.3.4 y se muestran en la Figura 3-15. Los tanques más utilizados en aplicaciones comerciales son los de tipo I y II, ya que tienen costes más bajos. Los tipos III y IV ofrecen mayor resistencia a alta presión, pero su coste es significativamente más elevado debido al uso de fibra de carbono [61].

Los tanques de hidrógeno de alta presión han demostrado su eficacia en vehículos eléctricos de pila de combustible como el Toyota Mirai y el Honda Clarity, ofreciendo una densidad gravimétrica hasta 10 veces superior a la de los tanques de baja presión [61].



Figura 5-5 H₂ Barge 1, primer carguero fluvial propulsado por hidrógeno [84]

Esta tecnología lleva consigo riesgos como pueden ser incendios y explosiones; además de las limitaciones espaciales para la instalación de los tanques. Además, los tanques de hidrógeno en barcos con presiones superiores a 1 MPa deben ubicarse en cubierta, y en entornos marinos, la corrosión puede afectar las tuberías y válvulas [83].

Otro aspecto de seguridad clave es que, en caso de fuga, el hidrógeno comprimido puede expandirse rápidamente, creando mezclas explosivas con el aire (límite de explosión entre 4% y 77% en aire y hasta 95,2% en oxígeno). Además, durante el llenado y transferencia del hidrógeno, el aumento de temperatura por compresión adiabática puede generar tensiones térmicas y dañar la infraestructura [83].

En la actualidad, existen diferentes buques en distintas partes del mundo que almacenan el hidrógeno de manera comprimida para su uso como combustible, como se muestra en la Tabla 5-3. Entre ellos destaca el H₂ Barge 1, que se convirtió en 2023 el primer carguero fluvial en incorporar esta tecnología (Figura 5-5) [84].

5.3.2 Hidruros metálicos

Existen varios métodos para almacenar hidrógeno en materiales sólidos, pero los más prometedores para el entorno marino son los hidruros metálicos y los compuestos a base de boro; siendo los primeros los que se van a tratar en este apartado.

El almacenamiento de hidrógeno en forma de hidruros metálicos es una opción considerada en aplicaciones marítimas debido a su capacidad para aumentar la densidad de almacenamiento de hidrógeno hasta en un 200% en comparación con el hidrógeno licuado [83]. Sin embargo, presenta limitaciones significativas en cuanto a eficiencia gravimétrica, con una eficiencia de almacenamiento que oscila entre el 1% y el 8%, lo que implica que para almacenar 1 kg de hidrógeno se necesitan hasta 12,5 kg de material de hidruro metálico [83].

Su liberación puede ocurrir por termólisis (proceso endotérmico y reversible) o hidrólisis (proceso exotérmico e irreversible). La mayoría de las aplicaciones en almacenamiento de hidruros metálicos se centran en termólisis [61]. Esto hace de los hidruros metálicos una alternativa más segura, ya que el hidrógeno se libera de manera controlada mediante una reacción endotérmica, lo que significa que, en caso de daño en el tanque, el hidrógeno no se liberará de manera explosiva [83].

Uno de los hidruros más estudiados es el hidruro de magnesio (MgH_2), ya que el magnesio es abundante y económico. Ofrece una capacidad de almacenamiento de hidrógeno del 7,6% en peso y una densidad de $1,45 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, su uso enfrenta desafíos debido a la formación de una capa de MgH_2 en el material, lo que ralentiza la absorción de hidrógeno. Para mejorar su rendimiento, es necesario operar a temperaturas superiores a $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [61].

Los hidruros metálicos no han sido ampliamente implementados en buques comerciales debido a su baja eficiencia gravimétrica y los requerimientos térmicos para la liberación del hidrógeno. No obstante, continúan siendo objeto de estudio en proyectos de propulsión naval con hidrógeno; especialmente en proyectos de submarinos con propulsión independiente de aire (AIP por sus siglas en inglés), debido a su estabilidad y la capacidad de liberar hidrógeno de manera controlada [83], habiendo sido ya implementados en el submarino Tipo 212 alemán (Figura 5-6) [85].



Figura 5-6 Submarino alemán Tipo 212 navegando en superficie [86]

5.3.3 Hidrógeno líquido

El almacenamiento criogénico no es un concepto ajeno a la industria marítima, ya que se ha utilizado en el transporte de gas natural licuado (GNL) con los llamados metaneros (Figura 5-7) y en la reutilización de los gases evaporados en motores diésel marinos. De hecho, el GNL se considera una alternativa viable en la transición hacia un transporte marítimo más ecológico [61].



Figura 5-7 Buque propulsado por GNL [87]

La base del almacenamiento de hidrógeno en estado líquido es reducir la temperatura a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es su temperatura de ebullición, con técnicas como la vaporización de nitrógeno [83]. La ventaja de la licuefacción es que permite alcanzar altas densidades de hidrógeno a presiones atmosféricas, logrando una densidad de 70 kg/m^3 , lo que es 775 veces mayor que en su forma gaseosa [61]. No obstante, sigue siendo menor que la del diésel, lo que obliga a utilizar tanques más grandes o a aumentar la frecuencia de repostaje [88].

Para mantener la temperatura adecuada y almacenar el hidrógeno en estado criogénico, se debe minimizar la transferencia de calor; ya que la evaporización tiene dos efectos negativos: aumento de la presión dentro del tanque y pérdida de la energía utilizada en la licuefacción del hidrógeno. Para evitar esto, se tiende a utilizar tanques esféricos, como los de la Figura 5-9, ya que tienen mayor relación superficie-volumen y se utilizan láminas de aluminio o fibra de vidrio como materiales de aislamiento [61].

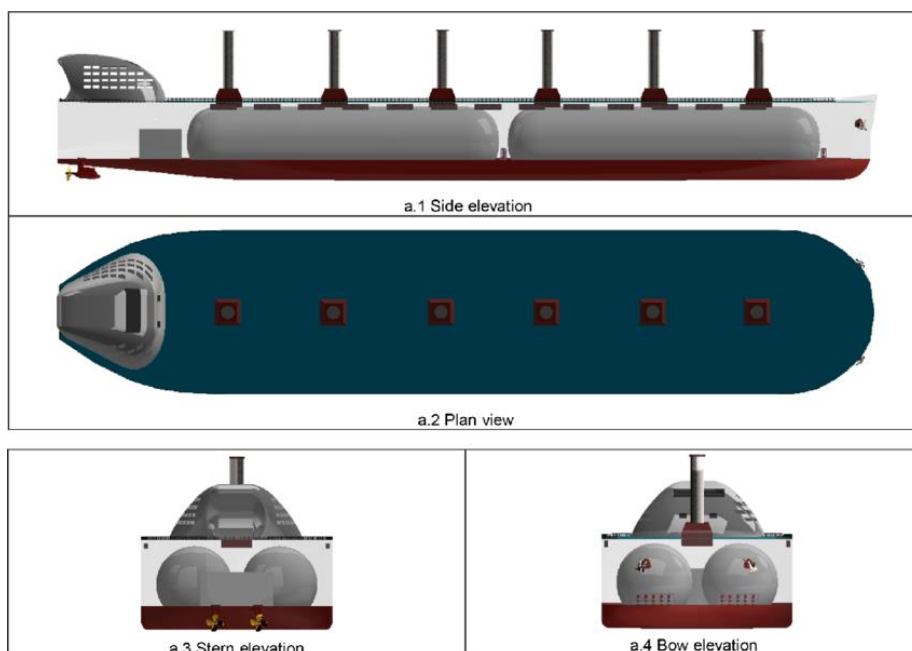


Figura 5-8 Diseño 3D de un barco mercante propulsado por hidrógeno líquido [89]

La licuefacción aumenta la densidad energética del hidrógeno, pero también conlleva pérdidas de energía durante el proceso, que pueden llegar hasta el 35% de la energía total del hidrógeno licuado [83]. Otras fuentes hablan de que la tasa de pérdida diaria varía entre el 1% y 5% [88].



Figura 5-9 Futuro buque GAIA de hidrógeno [90]

Aunque existen varias tecnologías de licuefacción de hidrógeno, cada proceso es relativamente complejo y requiere equipos costosos. Además, solo el hidrógeno de alta pureza puede ser licuado, lo que incrementa aún más los costes del proceso de producción de hidrógeno. Otro inconveniente de esta tecnología es que todas las partes del sistema de almacenamiento de hidrógeno líquido que están en contacto directo con él deben resistir temperaturas extremadamente bajas. Se debe prestar especial atención a la formación de hielo, ya que podría causar la ruptura de tuberías, válvulas y tanques [83].

A día de hoy existen buques cuya propulsión se basa en hidrógeno líquido como el MF Hydra (Figura 5-10) que se convirtió en 2023 en el primer ferry en incorporar este tipo de propulsión.



Figura 5-10 Ferry MF Hydra [91]

Se muestra en la Tabla 5-2 una comparativa entre los diferentes métodos de almacenar hidrógeno que se van a tener en cuenta en este estudio. Cabe destacar que los compuestos con base de carbono y los MOFs, al ser alternativas que aún se encuentran en fase de investigación y desarrollo, no están todavía implementadas en el ámbito marítimo; motivo por el que no aparecen en este estudio.

Varios países están desarrollando activamente barcos impulsados por hidrógeno [92], destacando Japón y Europa como líderes en este ámbito con varias embarcaciones demostrativas operativas, algunas de gran tamaño. China comenzó más tarde en este sector y ha tenido períodos de estancamiento. Sin embargo, desde 2019, con el respaldo gubernamental, ha acelerado su desarrollo en energía de hidrógeno [92].

TIPO DE ALMACENAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
COMPRIMIDO	- Tecnología madura	- Densidad energética y almacenamiento limitados - Problemas de seguridad por presurización y explosión
LÍQUIDO	- Mayor densidad energética	- Requiere temperaturas extremadamente bajas - Pérdidas de energía por licuefacción - Problemas de seguridad - Debe controlarse la vaporización
HIDRUROS METÁLICOS	- Mayor densidad energética - Mayor seguridad	- Baja eficiencia de almacenamiento gravimétrico

Tabla 5-2 Comparativa de almacenamiento de hidrógeno a bordo

Se muestran a continuación los diferentes buques propulsados por hidrógeno; tanto los que están en desarrollo (Tabla 5-4) como los que ya operan en la mar (Tabla 5-3).

Nombre	País	Propulsión	Almacenamiento	Tipo	Eslora (m)	Manga (m)
Wind Hunter	Japón	Energía eólica + open fuel cells	Hidrógeno comprimido	Velero experimental	12	-
EXXON FC31	Japón	Celdas de combustible (PEMFC)	Hidrógeno comprimido	Yate	12.4	3.4
Hashin Binan	Japón	Hidrógeno-diésel + motor	Hidrógeno comprimido	Ferry	19.4	5.4
Energy Observer	Francia	Energía eólica + fotovoltaica + celdas de combustible	Hidrógeno comprimido	Catamarán experimental	31	-
MF Hydra	Noruega	Celdas de combustible (PEMFC)	Hidrógeno líquido	Ferry	82.4	17.5
H2R-Evolution	Francia	Hidrógeno + baterías de iones de litio	Hidrógeno comprimido	Velero experimental	48	-
Sun Xun Hydrogen Ship No. 1	China	Celdas de combustible	Hidrógeno comprimido	Buque de trabajo	40.9	10.4
Jiaolong No. 1	China	Motores de metanol-hidrógeno	Hidrógeno comprimido	Buque de pasajeros	-	-
Xinhai No. 1	China	Celdas de combustible	Hidrógeno comprimido	Crucero pequeño	12	4

Tabla 5-3 Buques operados por hidrógeno en la actualidad [92]

Nombre	País	Propulsión	Almacenamiento	Tipo	Eslora (m)	Manga (m)
Ulstein SX190	Noruega	Hidrógeno + diésel	Hidrógeno líquido	Buque de instalación offshore	93.4	18.4
Hydrogen Viking	Noruega	Motores modificados para hidrógeno	Hidrógeno comprimido	Crucero	-	-
Searide 66	Inglaterra	Celdas de combustible + energía solar	Hidrógeno comprimido	Catamarán de recreo	31	12.8
Gotland Horizon	Suecia	Celdas de combustible + baterías de iones de litio	Hidrógeno comprimido	Crucero	-	-
Li Lake	China	Celdas de combustible	Hidrógeno comprimido	Yate	13.9	-
Xifei New Energy No. 1	China	Celdas de combustible + batería de iones de litio	Hidrógeno comprimido	Crucero	23.65	5.5
Li Lake Future	China	Celdas de combustible	Hidrógeno comprimido	Buque de transporte	20.5	5.2

Tabla 5-4 Buques en desarrollo que serán propulsados por hidrógeno [92]

5.4 Criterios utilizados para el estudio

El sector marítimo presenta desafíos significativamente mayores en comparación con el terrestre debido a las condiciones extremas y los riesgos inherentes a la navegación. Mientras que en tierra los sistemas de almacenamiento de hidrógeno pueden instalarse en infraestructuras estables y controladas, en el mar todo está en constante movimiento, sujeto a vibraciones, impactos y variaciones de temperatura y humedad. Además, el acceso a mantenimiento y reparaciones es mucho más limitado en un barco que en una instalación terrestre, lo que obliga a que los sistemas sean altamente fiables y resistentes [78].

La seguridad también es un factor importante, ya que un fallo en un sistema de almacenamiento de hidrógeno en una embarcación puede derivar en incendios o explosiones en un entorno donde la evacuación es compleja y los equipos de emergencia tienen recursos limitados. A esto se suma la necesidad de optimizar el espacio y el peso, dado que las embarcaciones deben equilibrar el almacenamiento de combustible con la carga útil y otros sistemas esenciales [79, 95].

En consonancia con todo esto y partiendo de la base de las alternativas utilizadas hasta ahora, se ha decidido adecuarlas para que se acerquen más a la realidad del estudio. De tal forma, se utilizarán los criterios de seguridad, autonomía (como combinación de la capacidad de almacenamiento y la eficiencia que se utilizaron en el anterior estudio), impacto ambiental, coste e implementación (en sustitución de la madurez tecnológica). Quedan así los criterios que no serán incluidos en este estudio y si lo fueron en el anterior la durabilidad y el ciclo de vida, debido a que el remplazo de los sistemas de almacenamiento es factible dentro de los ciclos de mantenimiento del barco y la escalabilidad, que no tiene sentido utilizarla ya que cada buque tiene unos requisitos específicos.

5.4.1 Seguridad

De manera análoga al apartado 3.4.1, la seguridad a la hora de almacenar hidrógeno se toma como un factor principal. Esta importancia se acrecienta más si cabe en el ámbito marítimo, debido a las condiciones operativas únicas de los buques; donde un escape o una fuga de hidrógeno en alta mar podría generar una acumulación peligrosa de gas en espacios confinados, aumentando el riesgo de ignición.

Para asignar las calificaciones en este criterio se tienen en cuenta factores como los riesgos de fuga y explosiones, las condiciones de almacenamiento o la facilidad de detección y control de incidentes; sin dejar a un lado la normativa existente que regula la seguridad a bordo [70, 96].

Teniendo en cuenta esto, las calificaciones asignadas son de 7 puntos para los hidruros metálicos, debido a su almacenamiento a baja presión y forma sólida, 6 para el hidrógeno comprimido por las elevadas presiones y 5 al hidrógeno líquido por las temperaturas criogénicas extremas.

Pese a los claros riesgos que parecen presentar el hidrógeno comprimido y líquido, es de destacar que la tecnología está bastante avanzada en ese aspecto y los protocolos de seguridad han avanzado notablemente en los últimos años [70, 95].

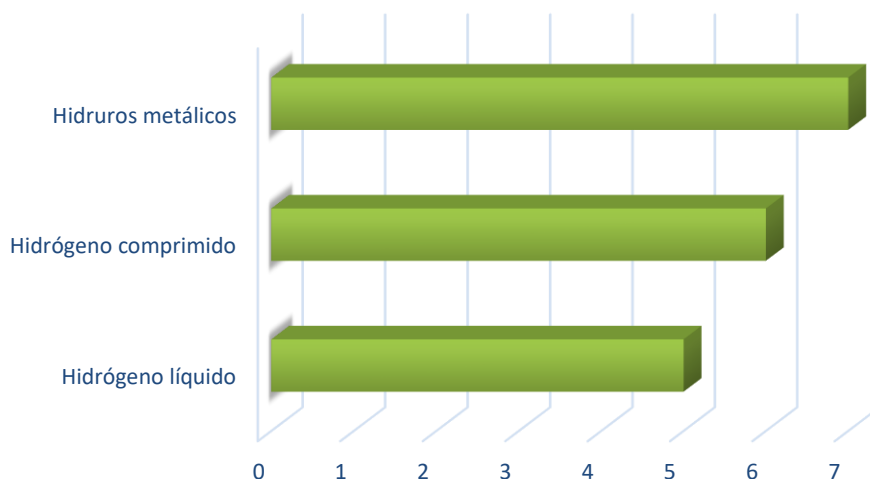


Figura 5-11 Evaluación de la seguridad de las alternativas

5.4.2 Autonomía

Se considera la autonomía como una combinación entre la capacidad de almacenamiento y la eficiencia de las alternativas, definidas ya en los apartados 3.4.2 y 3.4.3. En la mar no existen estaciones de repostaje de hidrógeno como las terrestres y todavía no se han desarrollado los denominados buques “gasolineras” para proveer de hidrógeno en la mar. Por tanto, se hace necesario que el hidrógeno almacenado permita a los buques recorrer distancias mínimas sin riesgo a quedarse a la deriva por falta de combustible.

El hidrógeno comprimido requiere tanques grandes debido a su baja densidad volumétrica; pero su eficiencia energética es considerablemente alta.

En cuanto al hidrógeno líquido, permite una mayor densidad de almacenamiento que el comprimido y una eficiencia un poco menor debido a las pérdidas por evaporación.

Por último, los hidruros metálicos tienen una alta densidad de almacenamiento pero supone un aumento del desplazamiento del buque muy significativo ya que son muy pesados, lo que disminuye la autonomía [95].

De esta forma, se han asignado las siguientes calificaciones: 7 puntos al hidrógeno líquido, 5 al hidrógeno comprimido y 3 a los hidruros metálicos.



Figura 5-12 Evaluación de la autonomía de las alternativas de almacenamiento

5.4.3 Impacto ambiental

Como se menciona en el apartado 1.1, el hidrógeno ha emergido como un vector energético clave en la transición hacia un modelo energético más sostenible. Es muy importante el desarrollo de alternativas cuyas emisiones sean mínimas para contribuir en el cuidado del planeta. Por ello y de igual manera que en el apartado 3.4.8 se considera el impacto ambiental como criterio de estudio de las alternativas de almacenamiento de hidrógeno a bordo.

En este contexto, se han otorgado 7 puntos al hidrógeno comprimido debido a que las emisiones generadas en la compresión de este son moderadas y los tanques son fabricados de materiales reciclables. Por otro lado, el hidrógeno líquido obtiene una calificación de 4, ya que la licuefacción supone una alta huella de carbón, además del gasto energético que supone y la menor reciclabilidad de los materiales que componen los tanques. Por último, los hidruros metálicos son calificados con 6 puntos, ya que no requieren gasto energético, tan sólo para liberar el hidrógeno. No obstante, son materiales que requieren procesos de reciclaje muy específicos [97, 98].



Figura 5-13 Evaluación del impacto ambiental de las alternativas

5.4.4 Coste

El dinero es siempre un limitante para todo tipo de operaciones. En este caso, se incluyen los gastos de la inversión inicial (fabricación e instalación), los operativos (mantenimiento, repostaje...) y las adaptaciones que deben sufrir los barcos y los puertos para implementar los diferentes sistemas.

El hidrógeno comprimido requiere un coste inicial menor que el de los demás, ya que es una tecnología madura de la que hay oferta; los costes operativos son bajos y una infraestructura de repostaje sería más accesible que la de las otras tecnologías [98].

En cuanto a los hidruros metálicos, suponen una inversión inicial alta, ya que los materiales son muy costosos [92]. Sin embargo, la infraestructura es muy limitada, a día de hoy no existe un sistema de repostaje de hidruros como tal.

Por último, el hidrógeno líquido supone un elevado coste de instalación, ya que requiere tanques criogénicos y materiales especiales, además de costes operativos altos por la necesidad de la refrigeración continua. La infraestructura es costosa y escasa, siendo difícil la adaptación de puertos a este tipo de repostaje a gran escala en un futuro cercano [96].

Teniendo en cuenta todo esto, las calificaciones son de 4 puntos para el hidrógeno líquido, 5 para los hidruros metálicos y 7 para el hidrógeno comprimido.

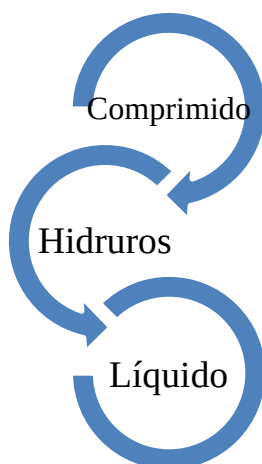


Figura 5-14 Evaluación del coste de las alternativas

5.4.5 Implementación

El criterio de implementación evalúa la facilidad y viabilidad de adaptar una tecnología de almacenamiento de hidrógeno al sector marítimo, considerando requisitos de infraestructura, compatibilidad con buques y cumplimiento normativo.

El hidrógeno líquido requiere cambios estructurales muy significativos en los buques debido a los tanques criogénicos y, como se ha dicho en el apartado 5.4.4, la infraestructura es escasa. En cuanto a los hidruros, requieren cambios estructurales en los buques menos significativos ya que los tanques son más pequeños aunque muy pesados, lo que complica la operación. Además, requieren calor para liberar el hidrógeno. Por último, el hidrógeno comprimido es la tecnología más adaptable a los buques existentes, ya que solo requiere tanques de alta presión y el hidrógeno se libera de manera sencilla [99].

Así, se han otorgado 2 puntos a hidruros metálicos, 6 para el hidrógeno líquido y 7 al hidrógeno comprimido.

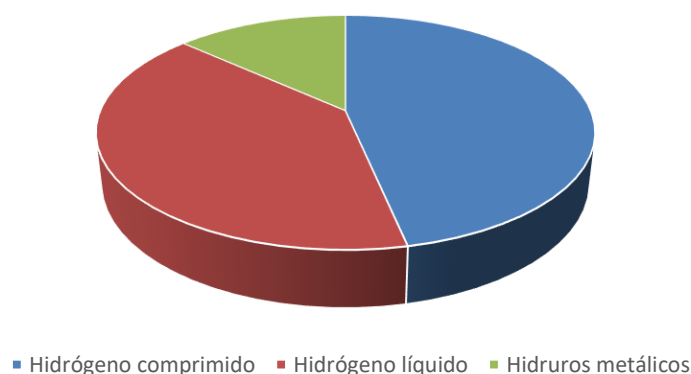


Figura 5-15 Evaluación de la implementación de las alternativas

5.5 Método AHP

El procedimiento para llevar a cabo este método se explica en el apartado 3.1. En cuanto a la ponderación de criterios, se ha tomado una decisión similar al estudio anterior, de tal forma que la seguridad se tomará como el criterio más importante, seguido de la autonomía, que como se explica en el apartado 5.4.2 hace referencia a los criterios de capacidad y eficiencia del primer estudio. Posteriormente se encuentran el impacto ambiental, el coste y, por último, la implementación.

Se muestran a continuación los vectores propios obtenidos para los distintos criterios multiplicado por la ponderación de criterios (Tabla 5-5), obteniendo así los resultados finales (Tabla 5-6), mientras que las matrices de comparaciones pareadas, sus normalizaciones y las consistencias se encuentran en el Anexo III: Matrices de comparaciones pareadas, normalización de estas y consistencias de los criterios utilizados para el método AHP aplicado al caso de estudio (destacar que, al ser ahora la matriz de 3x3, la razón de consistencia debe ser menor al 5% para que el método se considere válido, como se refleja en la Tabla 3-2). Se muestra también una representación gráfica de los resultados obtenidos en la Figura 5-16.

Vector Propio						X	Vector S	CRITERIOS
	C1	C2	C3	C4	C5			
A1	0,5396	0,1047	0,3196	0,1365	0,0811		0,3333	Seguridad
A2	0,2970	0,2583	0,5584	0,6250	0,5769		0,2667	Autonomía
A3	0,1634	0,6369	0,1220	0,2385	0,3420		0,2000	Impacto ambiental
							0,1333	Coste
							0,0667	Implementación
							$\Sigma = 1,0000$	

Tabla 5-5 Múltiplo de la matriz de vectores propios y la ponderación de criterios

Resultado	A1	0,2953	Hidruros Metálicos
	A2	0,4013	Hidrógeno comprimido
	A3	0,3033	Hidrógeno líquido

Tabla 5-6 Resultados finales método AHP caso de estudio

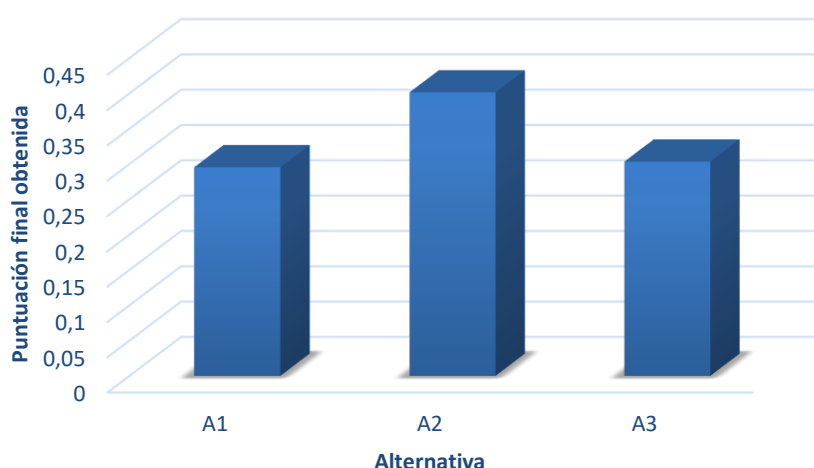


Figura 5-16 Representación gráfica de los resultados obtenidos en el método AHP

Los resultados obtenidos reflejan una clara preferencia por el hidrógeno comprimido como la mejor alternativa de almacenamiento para el sector marítimo, seguido del hidrógeno líquido y, en último lugar, los hidruros metálicos. El hidrógeno comprimido, gracias a su equilibrio entre viabilidad técnica, implementación y coste, se muestra como la alternativa más viable, coincidiendo con lo que la realidad refleja, como se muestra en la Tabla 5-3, donde se ve que su uso ya está ampliamente desarrollado en diversas aplicaciones marítimas [92].

Por otro lado, el hidrógeno líquido ocupa la segunda posición principalmente debido a su alta autonomía, ya que su elevada densidad energética lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones de largo alcance [95]. Sin embargo, su coste de almacenamiento y las dificultades operativas relacionadas con la gestión de temperaturas criogénicas han afectado su evaluación general, impidiendo que superara al hidrógeno comprimido en términos de viabilidad práctica.

Finalmente, los hidruros metálicos han sido la alternativa con menor puntuación, lo que se debe en gran medida a su limitada implementación y su impacto en la autonomía del sistema [95]. A pesar de que ofrecen un almacenamiento más seguro al operar a bajas presiones, su elevado peso y la lenta liberación de hidrógeno han condicionado su aplicabilidad en buques; no así en otras ramas del sector marítimo como pueden ser los submarinos, como refleja el apartado 5.3.2.

5.6 Método TOPSIS

Este método se ha realizado de manera análoga al estudio anterior, explicado detalladamente en el apartado 3.2. La ponderación de criterios es la misma que para el método AHP, al igual que las calificaciones obtenidas por cada alternativa en cada criterio.

En primer lugar se construye la matriz de decisión (Tabla 5-7) la cual se normaliza (Tabla 5-8) para poder desarrollar el método.

Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
A1	7	3	6	2	4
A2	6	5	7	7	7
A3	5	7	4	6	5
$\sum$ cuadrados =	110	83	101	89	90

Tabla 5-7 Matriz de decisión método TOPSIS

Normalizada	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,6674	0,3293	0,5970	0,2120	0,4216
A2	0,5721	0,5488	0,6965	0,7420	0,7379
A3	0,4767	0,7683	0,3980	0,6360	0,5270

Tabla 5-8 Matriz de decisión normalizada método TOPSIS

El siguiente paso consiste en la ponderación de criterios (Tabla 5-9). Una vez hecho, se procede a construir la matriz de decisión normalizada ponderada (Tabla 5-10)

	Ponderación de criterios				
	C1	C2	C3	C4	C5
PESO	0,3333	0,2667	0,2000	0,1333	0,0667
TIPO	Positivo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo

Tabla 5-9 Ponderación de criterios método TOPSIS

Matriz de decisión normalizada ponderada					
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,2225	0,0878	0,1194	0,0283	0,0281
A2	0,1907	0,1464	0,1393	0,0989	0,0492
A3	0,1589	0,2049	0,0796	0,0848	0,0351
Norma euclídea	0,3333	0,2667	0,2000	0,1333	0,0667
Máximo	0,2225	0,2049	0,1393	0,0989	0,0492
Mínimo	0,1589	0,0878	0,0796	0,0283	0,0281

Tabla 5-10 Matriz de decisión normalizada ponderada

Por último, una vez localizadas las cifras ideales, tanto negativas como positivas (Tabla 5-11), se procede a hallar el vector diferencia con ambos ideales (Tabla 5-12 y Tabla 5-13)

Cifras ideales	C1	C2	C3	C4	C5
Ideal Positivo	0,2225	0,2049	0,1393	0,0989	0,0492
Ideal negativo	0,1589	0,0878	0,0796	0,0283	0,0281

Tabla 5-11 Cifras ideales para cada criterio

Vector diferencia con ideal positivo						
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	Norma euclídea
A1	0,0000	0,1171	0,0199	0,0707	0,0211	0,1398
A2	0,0318	0,0585	0,0000	0,0000	0,0000	0,0666
A3	0,0636	0,0000	0,0597	0,0141	0,0141	0,0895

Tabla 5-12 Vector diferencia con ideal positivo

Vector diferencia con ideal negativo						
Alternativas/Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	Norma euclídea
A1	0,0636	0,0000	0,0398	0,0000	0,0000	0,0750
A2	0,0318	0,0585	0,0597	0,0707	0,0211	0,1159
A3	0,0000	0,1171	0,0000	0,0565	0,0070	0,1302

Tabla 5-13 Vector diferencia con ideal negativo

Por último, empleando la fórmula que se explica en el apartado 3.2.5, se halla el ratio de proximidad/lejanía (Tabla 5-14); que se ve reflejado gráficamente en la Figura 5-17; así como una comparativa de los resultados obtenidos por ambos métodos.

Ratio de proximidad/lejanía		
A1	0,3492	Hidruros metálicos
A2	0,6351	Hidrógeno comprimido
A3	0,5928	Hidrógeno líquido

Tabla 5-14 Ratio de proximidad/lejanía método TOPSIS

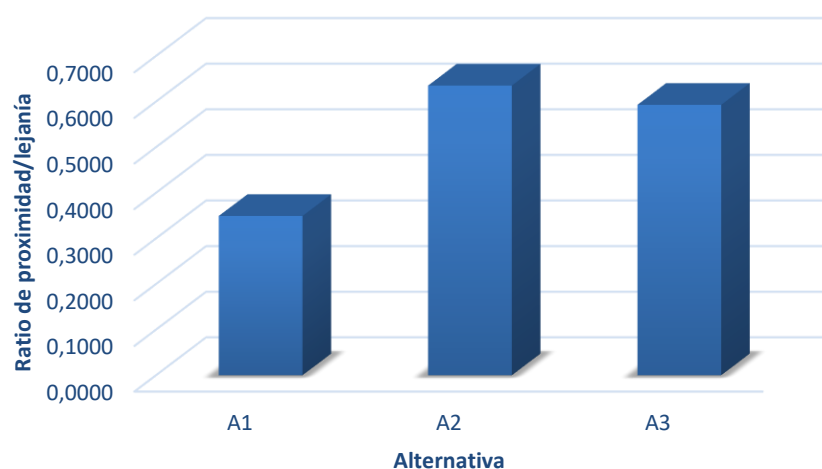


Figura 5-17 Resultados obtenidos método TOPSIS

De igual manera que se reflejaba en la anterior aplicación de los métodos, se muestra como los resultados obtenidos por el método TOPSIS son más elevados, debido a las diferencias de cálculo y metodología entre métodos. No obstante, se mantiene el ranking de clasificación entre las alternativas.

Los resultados del método TOPSIS tienen una mayor dispersión en los resultados finales, con una diferencia más marcada entre las alternativas. El hidrógeno comprimido se sigue consolidando como la mejor opción, seguida del hidrógeno líquido; cerrando así la clasificación los hidruros metálicos.

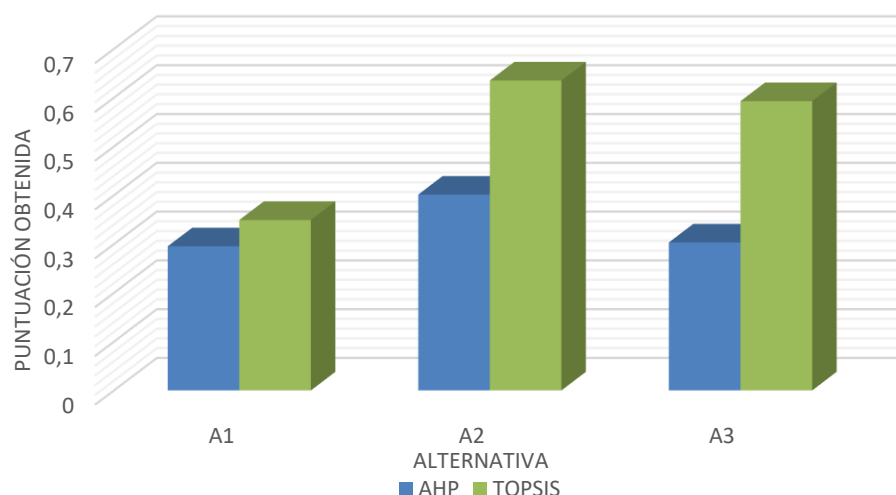


Figura 5-18 Comparativa de los resultados obtenidos en cada método para el caso de estudio

Estos resultados son un reflejo de la realidad, como se comenta en el análisis de los resultados obtenidos por el método AHP. Cabe destacar que el método TOPSIS da un mejor resultado al hidrógeno líquido; lo que indica que su viabilidad podría ser mayor de lo que reflejaba el análisis jerárquico. La combinación de estos métodos proporciona una visión más completa del problema y refuerza la solidez de las conclusiones obtenidas.

En la Tabla 5-3 se observa que la mayoría de los buques propulsados por hidrógeno operativos utilizan hidrógeno comprimido como método de almacenamiento, seguido por el hidrógeno líquido [92]. Por otro lado, no se ha encontrado ningún buque que esté operado por hidruros metálicos, reforzando así los resultados obtenidos con la bibliografía.

Otros artículos [98] afirman que la cadena industrial del almacenamiento de hidrógeno a alta presión está más desarrollada y es más asequible, por lo que se espera que supere a otras opciones de almacenamiento de hidrógeno. Para aumentar la seguridad y estabilidad durante su uso, es necesario desarrollar una técnica eficiente de optimización y pruebas en la conexión entre los tanques de almacenamiento de hidrógeno a alta presión y las estructuras de los barcos.

En general, los estudios [97, 96, 99] concluyen en que la implementación del hidrógeno en el sector marítimo será clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsar la protección ambiental y dirigir la industria marítima hacia un futuro más ecológico. La investigación continua, la inversión y la alineación de políticas serán esenciales para desbloquear todo el potencial del hidrógeno como el combustible del futuro para el sector marítimo.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con el estudio realizado por Bongjim Gim y Jong Wook Kim [66], los cuales utilizan el método AHP para analizar las diferentes alternativas de almacenamiento de hidrógeno para automóviles en Corea. En dicho estudio, los autores comparan el hidrógeno comprimido a 700 y 350 bar, el hidrógeno líquido, los hidruros metálicos y los hidruros químicos desde las perspectivas de eficiencia, coste, ciclo de vida, seguridad e infraestructura.

Otros trabajos similares como el de Nasser Al Rizeiqi [65], en el que se analizan las diferentes tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en Omán también obtiene de resultado al hidrógeno comprimido como la mejor opción y explica que el hidrógeno líquido, al no tener una infraestructura bien establecida en Omán recibe un resultado menor del que podría haber obtenido por sus otras cualidades [65]. Esto demuestra que la ponderación de criterios es un factor clave para este tipo de análisis.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Este trabajo utiliza los métodos de análisis multicriterio AHP y TOPSIS para evaluar las distintas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno. Se realizan dos estudios diferenciados: en primer lugar, se hace el estudio al almacenamiento de hidrógeno de manera genérica, teniendo en cuenta criterios como la seguridad, la eficiencia, la capacidad de almacenamiento, el impacto ambiental, la madurez tecnológica, la escalabilidad y el coste. Posteriormente, se realiza un estudio enfocado al sector marítimo, adaptando los criterios al mismo de tal forma que algunos como la seguridad, el coste y el impacto ambiental permanecen y otros se adaptan al sector, como la eficiencia y la capacidad de almacenamiento, que se fusionan para evaluar la autonomía y la escalabilidad, que se evalúa ahora como implementación.

En el primer estudio se comparan los hidruros metálicos, los MOFs, el hidrógeno comprimido y los compuestos con base de carbono, resultando como mejor valorados los hidruros metálicos, seguidos muy de cerca por el hidrógeno comprimido. Estas dos alternativas destacan en criterios importantes como la seguridad en el caso de los hidruros y la capacidad de almacenamiento por parte del hidrógeno comprimido. Las dos siguientes alternativas son los compuestos con base de carbono y los MOFs, respectivamente, habiendo obtenido una calificación más baja por la falta de infraestructura y conocimientos por parte de los expertos, ya que son tecnologías relativamente nuevas que aún están en fase de investigación.

En el segundo estudio se analizan el hidrógeno comprimido, el hidrógeno líquido y los hidruros metálicos, al ser éstas las tres únicas tecnologías utilizadas en el sector. El hidrógeno comprimido ha resultado ser la mejor opción de almacenamiento, seguida de cerca por el hidrógeno líquido en el método TOPSIS. Los hidruros metálicos necesitan aún adaptarse mejor al sector marítimo, pues aún no cumplen los requisitos específicos que se necesitan al operar en la mar, como la autonomía, estando muy perjudicados en este aspecto por su peso.

Este trabajo ha permitido profundizar en el conocimiento general acerca del hidrógeno, un elemento importante para la transición energética y la descarbonización de múltiples sectores industriales. Además, la combinación de ambos métodos ha demostrado que la evaluación de alternativas no puede basarse únicamente en criterios aislados, sino que es necesario establecer una estructura lógica de comparación que contemple múltiples perspectivas; en este caso logística, medioambiental, técnica y de seguridad.

Vale la pena mencionar que la clasificación de las tecnologías de almacenamiento puede reformularse en función de cualquier desarrollo tecnológico. Este trabajo espera contribuir a acelerar el crecimiento de la economía del hidrógeno verde, ya que estudia las tecnologías de almacenamiento de

hidrógeno a gran escala disponibles, teniendo así un impacto directo y positivo en la transición hacia una energía limpia en el país.

6.2 Líneas futuras

El presente estudio abre la puerta a diversas líneas de investigación que podrían mejorar y ampliar el análisis realizado. A continuación, se destacan algunas de las más relevantes:

- Realización de un análisis económico detallado, haciendo un estudio más profundo sobre los costes operativos y de infraestructura del hidrógeno en el sector marítimo, permitiendo así validar mejor la viabilidad de cada alternativa.
- Encuestas a personal experto en la materia de manera directa para realizar la ponderación de criterios, aportando así mayor rigurosidad y objetividad al análisis multicriterio.
- Incorporación de métodos híbridos de decisión multicriterio, combinando estos métodos con otras metodologías como ELECTRE o PROMETHEE (mencionados en el apartado 2.4.2.4), pudiendo proporcionar así una visión aún más robusta del problema para la mejora en la toma de decisiones.
- Investigación sobre el almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos, dado que esta tecnología no ha sido implementada por el momento en buques de gran porte. Consistiría en realizar un estudio acerca de cómo podría mejorarse dicha alternativa para hacerla competitiva en el sector, analizando aleaciones avanzadas que reduzcan las limitaciones actuales en términos de autonomía y liberación del hidrógeno.
- Estudio acerca del impacto de la regulación internacional; cómo la evolución de las normativas marítimas sobre combustibles alternativos podrían alterar la viabilidad de cada alternativa.
- Optimización de la infraestructura portuaria, disponibilidad de estaciones de abastecimiento de hidrógeno en los puertos como factor clave para la adopción de esta tecnología. El estudio abarcaría las necesidades de infraestructura y su viabilidad económica con el fin de transicionar hacia un transporte marítimo más sostenible.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. de Simón-Martín, B.-R. Cortés-Nava, R. Rodríguez-Parra, y F. C. Lorenzo, «El papel del hidrógeno verde en la transición energética de la industria», *DYNA*, vol. 96, n.º 2, Art. n.º 2, 2021.
- [2] José Ignacio Linares Hurtado y Beatriz Yolanda Moratilla Soria, *El hidrógeno y la energía*, Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas.
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), «HOJA DE RUTA DEL HIDRÓGENO: UNA APUESTA POR EL HIDRÓGENO RENOVABLE». Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), octubre de 2020.
- [4] D. M. Eterovic Martí, «Avances y desafíos en torno a la regulación del hidrógeno verde en Chile», *Rev. Derecho Apl. - LLM UC*, n.º 10, 2022, doi: 10.7764/rda.10.49971.
- [5] Karina Suárez Alcántara, *Un poco de todo sobre el hidrógeno*, vol. 70. 2019.
- [6] «Paracelso, el médico que fue alquimista». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/paracelso_18769
- [7] Jordi Llorca, *El hidrógeno y nuestro futuro energético*, Universidad Politècnica de Catalunya. 2010.
- [8] Enric Junyent Guinart, «Hidrógeno. Estudio de sus propiedades y diseño de una planta de licuado.» diciembre de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/13884/Hidr%c3%b3geno%20PFC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] M. H. Brijaldo, C. Castillo, y G. Pérez, «Principales Rutas en la Producción de Hidrógeno», *Ing. Compet.*, vol. 23, n.º 2, p. e30111155, may 2021, doi: 10.25100/iyv.v23i2.11155.
- [10] F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, y D. Ferrero, *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies*. Academic Press, 2019.
- [11] Clara Fernández-Bolaños Badía, «ENERGÉTICA DEL HIDRÓGENO CONTEXTO, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVA DE FUTURO». marzo de 2005.
- [12] «Métodos de producción de hidrógeno y sus colores». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores>
- [13] L. Pérez, «Métodos de almacenamiento del hidrógeno - SynerHy». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
- [14] «Aplicaciones de hidrógeno en la industria y movilidad», TÜV SÜD. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/cadena-valor-hidrogeno/aplicaciones-hidrogeno>
- [15] «Almacenamiento – H2Chile». Accedido: 6 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h2chile.cl/almacenamiento/>
- [16] U. Remme, «Global Hydrogen Review 2024», 2024.

- [17] Y. Qiu, H. Yang, L. Tong, y L. Wang, «Research Progress of Cryogenic Materials for Storage and Transportation of Liquid Hydrogen», *Metals*, vol. 11, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 2021, doi: 10.3390/met11071101.
- [18] Luis David Celaya García, Miguel Ernesto Gutiérrez Rivera, Elías Rigoberto Ledesma Orozco, y Francisco Javier Zavala González, «Diseño de un tanque de almacenamiento de hidrógeno tipo II usando propiedades equivalentes», *Memorias de divulgación científica y tecnológica de la ingeniería mecánica en México*, pp. 158-163, 21 de septiembre de 2022.
- [19] TresCantos, «Almacenamiento de Hidrógeno», ARIEMA. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- [20] «Hidruros complejos – Alanatos – Hidrógeno». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://almacenamientodehidrogeno.com.mx/hidruros-complejos-alanatos/>
- [21] «Almacenamiento de Hidrógeno en Hidruros Sólidos - Norvento - Norvento». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.norvento.com/blog/almacenamiento-de-hidrogeno-en-hidruros-solidos/>
- [22] Z. Qian *et al.*, «Ab Initio Screening of Doped Mg(AlH₄)₂ Systems for Conversion-Type Lithium Storage», *Materials*, vol. 12, n.º 16, p. 2599, ago. 2019, doi: 10.3390/ma12162599.
- [23] «Almacenamiento de hidrógeno en estado sólido», GRZ Technologies. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grz-technologies.com/es/wiki/almacenamiento-de-hidrogeno-en-estado-solido/>
- [24] «Elegir el mejor método de almacenamiento de hidrógeno». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-almacenamiento-hidrogeno-cicenergigune>
- [25] «Revolución en la Energía Limpia: Líquidos Orgánicos Portadores de Hidrógeno», AIMPLAS. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aimplas.es/blog/liquidos-organicos-portadores-hidrogeno/>
- [26] «Tecnologías clave para los vectores orgánicos líquidos de hidrógeno». Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cicenergigune.com/es/blog/tecnologias-vectores-organicos-liquidos-hidrogeno-lohc-ekarrih2>
- [27] exmadmin, «Exolum inicia la primera demostración mundial de transporte y almacenamiento de hidrógeno verde en infraestructuras existentes a través de líquidos portadores de hidrógeno (LOHC)», Exolum. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://exolum.com/noticia/exolum-inicia-la-primera-demostracion-mundial-de-transporte-y-almacenamiento-de-hidrogeno-verde-en-infraestructuras-existentes-a-traves-de-liquidos-portadores-de-hidrogeno-lohc/>
- [28] J. A. Villajos Collado, «Adsorción de hidrógeno en materiales mof: estrategias para la inclusión de centros de adsorción preferente», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad Rey Juan Carlos, 2017. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=180934&utm_
- [29] C. A. C. Cauich, M. I. I. R. M. Medina, y M. I. G. R. Gutiérrez, «Mecanismos de almacenamiento de hidrógeno en materiales nanoestructurados para aplicaciones en vehículos de transporte», *Ingeniería*, vol. 23, n.º 3, pp. 15-27, 2019.
- [30] M. C. E. Iturbe y E. A. G. del V. Campoamor, «MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO», *Denarius*, n.º 10, Art. n.º 10, jun. 2005.
- [31] T. López-Marrero y A. González-Toro, «Evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la planificación y la toma de decisiones acerca del uso de terrenos».
- [32] «Estudio comparativo de la aplicación de 5 métodos multicriterio de decisión al caso de selección de personal docente», *ResearchGate*, oct. 2024, doi: 10.4067/S0718-33052023000100223.
- [33] Gabriela Arteaga, Jaime García, Jesús Tejeda, y Raúl Rodríguez, «Estrategia alternativa para la priorización de proyectos de infraestructura». octubre de 2019. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en:

- https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Estrategia_alternativa_para_la_priorizaci%C3%B3n_de_proyectos_de_infraestructura_es.pdf
- [34] S. Márquez-Peláez y J. E. Balbino, «Guía para la elaboración de recomendaciones basada en análisis de decisión multicriterio».
- [35] M. J. M. Ayora, «Proceso analítico jerárquico y TOPSIS aplicados a la selección de una cámara digital».
- [36] «Clasificación de los métodos de toma de decisión multicriterio multiatributo – El blog de Víctor Yepes». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/26/clasificacion-metodos-madm/>
- [37] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, J. V. Martí, y V. Yepes, «A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design», *Sustainability*, vol. 8, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2016, doi: 10.3390/su8121295.
- [38] S. Hajkowicz y K. Collins, «A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management», *Water Resour. Manag.*, vol. 21, n.º 9, pp. 1553-1566, 2007.
- [39] J. Hernández-Vásquez., J. Solano De La Rosa y F. Ferreira-Medina “Modelo multicriterio AHP-TOPSIS: una estrategia para evaluar alternativas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables”, *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 9, n.º 2, 175-191, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.9.2.4482>.
- [40] L. F. Morales, «AHP-TOPSIS PARA LA SELECCIÓN DE PROYECTOS ESTRATÉGICOS DE INVERSIÓN APLICADO A UN GRUPO EMPRESARIAL DEL VALLE DEL CAUCA», 2015.
- [41] C. R. Pérez, «Evaluación de Proveedores Mediante Técnicas Multicriterio de Ayuda a la Toma de Decisiones en Python».
- [42] S. A. Berumen y F. L. Redondo, «La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el ahp) en un entorno de competitividad creciente», 2007.
- [43] T. L. Saaty, «BASIC THEORY OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS: HOW TO MAKE A DECISION».
- [44] N. González y PrevenControl, «AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST», PrevenControl. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/>
- [45] M. S. Luna y S. L. Segura, «Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeronáutica».
- [46] M. S. Garcia-Cascales y M. T. Lamata, «NUEVA APROXIMACIÓN AL MÉTODO TÓPSIS DIFUSO CON ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS», 2010.
- [47] T. Rimza *et al.*, «Carbon-Based Sorbents for Hydrogen Storage: Challenges and Sustainability at Operating Conditions for Renewable Energy», *ChemSusChem*, vol. 15, n.º 11, p. e202200281, 2022, doi: 10.1002/cssc.202200281.
- [48] A. I. Osman *et al.*, «Innovations in hydrogen storage materials: Synthesis, applications, and prospects», *J. Energy Storage*, vol. 95, p. 112376, ago. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112376.
- [49] H. Shen, H. Li, Z. Yang, y C. Li, «Magic of hydrogen spillover: Understanding and application», *Green Energy Environ.*, vol. 7, n.º 6, pp. 1161-1198, dic. 2022, doi: 10.1016/j.gee.2022.01.013.
- [50] V. B. Parambath, R. Nagar, K. Sethupathi, y S. Ramaprabhu, «Investigation of Spillover Mechanism in Palladium Decorated Hydrogen Exfoliated Functionalized Graphene», *J. Phys. Chem. C*, vol. 115, n.º 31, pp. 15679-15685, ago. 2011, doi: 10.1021/jp202797q.
- [51] «Almacenamiento de H2 en materiales MOF - Energía y Sostenibilidad». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2021/05/04/134785>
- [52] I. Suelves, J. L. Pinilla, S. Llobet, D. Torres, M. J. Lázaro, y R. Moliner, «Producción de hidrógeno y materiales de carbono nanoestructurados.», *Bol Grupo Esp. Carbón*, dic. 2014.
- [53] Miguel Ángel de la Casa Lillo, «Fibras de carbón y carbones activados: caracterización y aplicaciones en separación y almacenamiento de gases», Universiad de Alicante, 1999.

- [54] G. Sdanghi, R. L. S. Canevesi, A. Celzard, M. Thommes, y V. Fierro, «Characterization of Carbon Materials for Hydrogen Storage and Compression», *C*, vol. 6, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2020, doi: 10.3390/c6030046.
- [55] A. L. Sutton, J. I. Mardel, y M. R. Hill, «Metal-Organic Frameworks (MOFs) As Hydrogen Storage Materials At Near-Ambient Temperature», *Chem. – Eur. J.*, vol. 30, n.º 44, p. e202400717, 2024, doi: 10.1002/chem.202400717.
- [56] M. G. Orcajo, J. A. Botas, G. Calleja, y M. Sánchez-Sánchez, «Materiales MOF para el almacenamiento de hidrógeno», *An. Quím. RSEQ*, vol. 108, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2012.
- [57] D. B. Monsalve, «ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO MEDIANTE HIDRUROS METÁLICOS: SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN», 2017.
- [58] Juan José Borrás, «Tema 8-2: Compuestos de hidrógeno». 3 de diciembre de 2006. [En línea]. Disponible en: https://www.uv.es/borrasj/ingenieria_web/temas/bloque_2/tema_8_hidrogeno/tema_8_b_hidruos.pdf
- [59] L. J. Bannenberg *et al.*, «Metal (boro-) hydrides for high energy density storage and relevant emerging technologies», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 45, n.º 58, pp. 33687-33730, nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.119.
- [60] A. Magliano, C. Perez Carrera, C. M. Pappalardo, D. Guida, y V. P. Berardi, «A Comprehensive Literature Review on Hydrogen Tanks: Storage, Safety, and Structural Integrity», *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2024, doi: 10.3390/app14209348.
- [61] Omer Berkehan Inal, Caglar Dere, y Cengiz Deniz, «Onboard Hydrogen Storage for Ships: An Overview», presentado en 5 th International Hydrogen Technologies Congress (IHTEC-2021), may 2021. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/351982637_Onboard_Hydrogen_Storage_for_Ships_An_Overview
- [62] J.-Q. Li, J.-C. Li, K. Park, S.-J. Jang, y J.-T. Kwon, «An Analysis on the Compressed Hydrogen Storage System for the Fast-Filling Process of Hydrogen Gas at the Pressure of 82 MPa», *Energies*, vol. 14, n.º 9, Art. n.º 9, ene. 2021, doi: 10.3390/en14092635.
- [63] J. D. Hunt *et al.*, «Hydrogen storage with gravel and pipes in lakes and reservoirs», *Nat. Commun.*, vol. 15, n.º 1, p. 7723, sep. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-52237-1.
- [64] Adrián Hernández Fernández, «Hidrógeno verde y almacenamiento energético: estado del arte.», Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2023. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/75295/1/TFG_ADRIAN_HERNANDEZ_FERNANDEZ.pdf
- [65] Rizeiqi Nasser Al, Azzouz Amirah, y Liew Peng Yen, «Multi-Criteria Evaluation of Large-Scale Hydrogen Storage Technologies in Oman using the Analytic Hierarchy Process», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 106, pp. 1117-1122, dic. 2023, doi: 10.3303/CET23106187.
- [66] Bongjin Gim y Jong Wook Kim, «Multi-criteria evaluation of hydrogen storage systems for automobiles in Korea using the fuzzy analytic hierarchy process», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, n.º 15, pp. 7852-7858, may 2014.
- [67] X. Qie, R. Zhang, Y. Hu, X. Sun, y X. Chen, «A Multi-Criteria Decision-Making Approach for Energy Storage Technology Selection Based on Demand», *Energies*, vol. 14, n.º 20, Art. n.º 20, ene. 2021, doi: 10.3390/en14206592.
- [68] M. B. Barreto, C. A. A. Vasco, E. Y. O. Montoya, y C. Bermudez, «Análisis multicriterio de la producción de hidrógeno verde para el almacenamiento de energía fotovoltaica: una escuela rural colombiana como caso de estudio.» [En línea]. Disponible en: <https://repository.icesi.edu.co/server/api/core/bitstreams/2ecbd6b6-e357-4714-9924-06f7b3664d7e/content>
- [69] Asociación nacional de normalización y de bienes de equipo y seguridad industrial, «Guía técnica: Seguridad del Hidrógeno», C/ Príncipe de Vergara, 132, 9ª, 28002 – Madrid, marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://industria.gob.es/Calidad->

Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/tecnologia-hidrogeno/BuenasPracticas/Guia-Seguridad-H2-BEQUINOR.pdf

- [70] Z. Xie, Q. Jin, G. Su, y W. Lu, «A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges», *Energies*, vol. 17, n.º 16, Art. n.º 16, ene. 2024, doi: 10.3390/en17164070.
- [71] «Compresión de hidrógeno», GRZ Technologies. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grz-technologies.com/es/wiki/compresion-de-hidrogeno/>
- [72] S. Chaube *et al.*, «An Overview of Multi-Criteria Decision Analysis and the Applications of AHP and TOPSIS Methods», *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 9, n.º 3, pp. 581-615, jun. 2024, doi: 10.33889/IJMEMS.2024.9.3.030.
- [73] F. R. Lima Junior, L. Osiro, y L. C. R. Carpinetti, «A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection», *Appl. Soft Comput.*, vol. 21, pp. 194-209, ago. 2014, doi: 10.1016/j.asoc.2014.03.014.
- [74] M. M. D. Widiarta, T. Rizaldi, D. P. S. Setyohadi, y H. Y. Riskiawan, «Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods (AHP, TOPSIS, SAW & PROMENTHEE) for Employee Placement», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 953, p. 012116, ene. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/953/1/012116.
- [75] A. Roy y S. Pramanik, «A review of the hydrogen fuel path to emission reduction in the surface transport industry», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 49, pp. 792-821, ene. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.010.
- [76] S. Singh *et al.*, «Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 623-633, nov. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.040.
- [77] S. Verhelst y T. Wallner, «Hydrogen-fueled internal combustion engines», *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, n.º 6, pp. 490-527, dic. 2009, doi: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
- [78] B. P. Sullivan, G. M. M. Ansaloni, A. Bionda, y M. Rossi, «A life cycle perspective to sustainable hydrogen powered maritime systems – functional and technical requirements», *Int. J. Prod. Lifecycle Manag.*, vol. 14, n.º 2/3, p. 282, 2022, doi: 10.1504/IJPLM.2022.125822.
- [79] G. Di Ilio *et al.*, «Towards the design of a hydrogen-powered ferry for cleaner passenger transport», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 95, pp. 1261-1273, dic. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.08.434.
- [80] J. Ruiz Gómez, «Diseño y fabricación de una pila de combustible de hidrógeno de baja potencia», sep. 2010, Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/10544>
- [81] «Sir William Robert Grove (1811-1896): Lithograph by Bosley | Science Museum Group Collection». Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co66465/sir-william-robert-grove-1811-1896-lithograph-by-bosley>
- [82] «Pilas de combustible, electricidad para el futuro inmediato», TÉCNICA INDUSTRIAL. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnicaindustrial.es/pilas-de-combustible-electricidad-para-el-fut/>
- [83] I. Panić, A. Cuculić, y J. Čelić, «Color-Coded Hydrogen: Production and Storage in Maritime Sector», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2022, doi: 10.3390/jmse10121995.
- [84] «El H₂ Barge 1, el primer carguero fluvial en el mundo propulsado por hidrógeno», VA DE BARCOS. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vadebarcos.net/2024/03/30/el-h2-barge-1-el-primer-carguero-fluvial-en-el-mundo-propulsado-por-hidrogeno/>
- [85] Carlos LOSCERTALES SAIZ, «SISTEMA AIP. U-212», *Temas profesionales*, pp. 479-492, abril de 2012.
- [86] «Clase 212, el submarino alemán que quiere Ucrania para hundir la flota de Putin en el Mar Negro», *El Español*. Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.elespanol.com/omicrono/defensa-y-espacio/20230201/clase-submarino-aleman-ucrania-putin-mar-negro/737676265_0.html

- [87] «Aumenta la demanda de los buques de GNL», Cadena de Suministro. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.cadenadesuministro.es/noticias/aumenta-la-demanda-de-los-buques-de-gnl_1107453_102.html
- [88] ABS, CE DELFT, y ARCSILEA, «Potential of hydrogen as fuel for shipping». 31 de agosto de 2024. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/5062-potential-of-hydrogen-as-fuel-for-shipping.html>
- [89] A. Nfnr Alkhaledi, S. Sampath, y P. Pilidis, «Techno environmental assessment of Flettner rotor as assistance propulsion system for LH2 tanker ship fuelled by hydrogen», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 55, p. 102935, feb. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2022.102935.
- [90] R. V. Caro, «El hidrógeno en el ámbito marítimo: posibilidades del buque de hidrógeno», Fundación Exponav en Ferrol. Accedido: 7 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/el-hidrogeno-en-el-ambito-maritimo-posibilidades-del-buque-de-hidrogeno/>
- [91] M. CleanTech, «World's first: MF Hydra sails on liquid hydrogen», Maritime CleanTech. Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://maritimecleantech.no/2023/03/31/worlds-first-mf-hydra-sails-on-liquid-hydrogen/>
- [92] Z. Wang, M. Li, F. Zhao, Y. Ji, y F. Han, «Status and prospects in technical standards of hydrogen-powered ships for advancing maritime zero-carbon transformation», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 62, pp. 925-946, abr. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.083.
- [93] Talal Elammas, «Hydrogen fuel cells for marine applications: Challenges and opportunities», *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, vol. 9. pp. 38-43, 29 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.allengineeringjournal.in/assets/archives/2023/vol9issue1/9006-641.pdf>
- [94] Rodrigo Vásquez TorresGIZ, Fichtner, Ed., «Hidrógeno - cadenas de valor y legislación internacional.» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 1 de abril de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2021/12/Cadena-de-valor-H2-y-regulacion-internacional.pdf>
- [95] R. Jayabal, «Hydrogen energy storage in maritime operations: A pathway to decarbonization and sustainability», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 109, pp. 1133-1144, mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.207.
- [96] S. A. Alavi-Borazjani, S. Adeel, y V. Chkoniya, «Hydrogen as a Sustainable Fuel: Transforming Maritime Logistics», *Energies*, vol. 18, n.º 5, p. 1231, mar. 2025, doi: 10.3390/en18051231.
- [97] Francielle Carvalho, Liudmila Osipova, y Yuanrong Zhou, «Life-cycle greenhouse gas emissions of hydrogen as a marine fuel and cost of producing green hydrogen in Brazil». marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/03/maritime-brazil-hydrogen-costs-mar23.pdf>
- [98] J.-Q. Li *et al.*, «A review of methods to study the fatigue life of nodes connecting marine composite hydrogen storage tanks to ships under the action of external forces», *J. Energy Storage*, vol. 72, p. 108367, nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108367.
- [99] Dr. S. Thangalakshmi y Dr. Rajoo Balaji, «Potential Challenges of Hydrogen as a Fuel for International Maritime Transport», *Mar. Eng. Rev. India*, dic. 2023, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Thangalakshmi-Prakash/publication/376413661_Potential_Challenges_of_Hydrogen_as_a_Fuel_for_International_Maritime_Transport/links/6577de1c6610947889b9bec0/Potential-Challenges-of-Hydrogen-as-a-Fuel-for-International-Maritime-Transport.pdf

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo de este estudio ha permitido evaluar distintas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno y su aplicabilidad en diversos contextos, considerando sus impactos en términos ambientales, económicos y sociales. Desde el punto de vista ambiental, el uso de hidrógeno como vector energético podría contribuir notablemente a la descarbonización del transporte, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos asociados a la combustión de combustibles fósiles.

A nivel económico, la transición hacia sistemas de propulsión basados en hidrógeno presenta retos y oportunidades. En la fase inicial, los costos de desarrollo, infraestructura y producción de hidrógeno pueden ser elevados, especialmente si se prioriza el hidrógeno verde obtenido a partir de electrólisis con energías renovables. Sin embargo, a largo plazo, se espera que los costos de operación y mantenimiento se reduzcan debido a la mayor eficiencia y menor desgaste de los sistemas basados en celdas de combustible. Además, la implementación de estas tecnologías podría incentivar la inversión en infraestructura para el suministro y almacenamiento de hidrógeno en puertos, generando nuevas oportunidades de negocio y empleo en la economía del hidrógeno.

En el ámbito social, la adopción de tecnologías de almacenamiento de hidrógeno puede tener efectos positivos en la salud pública al reducir la contaminación atmosférica en zonas portuarias y costeras, donde las emisiones de los barcos contribuyen significativamente a problemas respiratorios y cardiovasculares. Asimismo, la transición hacia energías limpias podría fomentar la formación y especialización de la mano de obra en tecnologías del hidrógeno, promoviendo el desarrollo de capacidades técnicas en sectores como la ingeniería naval, la energía renovable y la logística del hidrógeno.

En conclusión, la implementación de tecnologías de almacenamiento de hidrógeno representa un paso clave hacia la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico. No obstante, su adopción requiere superar barreras tecnológicas y económicas, así como desarrollar un marco regulador y logístico adecuado para garantizar su viabilidad y seguridad a largo plazo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En este Trabajo de Fin de Grado, se han abordado cuestiones que pueden tener implicaciones éticas y sociales, especialmente en relación con el impacto ambiental de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, la sostenibilidad del sector marítimo y la necesidad de transición hacia fuentes de energía más limpias. La evaluación multicriterio realizada en este estudio busca promover el desarrollo responsable de estas tecnologías, considerando tanto sus beneficios como sus limitaciones en términos de seguridad, viabilidad económica y accesibilidad tecnológica.

Asimismo, la implementación de soluciones basadas en hidrógeno en el ámbito naval plantea desafíos éticos, como la equidad en el acceso a estas tecnologías, la responsabilidad ambiental en la producción de hidrógeno y la gestión de los residuos derivados de su almacenamiento. La adopción de decisiones basadas en criterios objetivos y en un análisis integral de las consecuencias sociales y económicas es fundamental para garantizar que la transición energética se realice de manera justa y sostenible.

Otro aspecto relevante es el impacto socioeconómico que lleva consigo la transición energética. La adopción de nuevas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en la industria marítima puede generar cambios significativos en la estructura del empleo, ya que se requerirá formación especializada para los trabajadores del sector y una reconfiguración de la cadena de suministro. Esto plantea la necesidad de políticas de apoyo para facilitar la reconversión laboral y garantizar que la transición a un modelo más sostenible no genere desigualdades económicas ni deje atrás a sectores vulnerables.

ANEXO III: MATRICES DE COMPARACIONES PAREADAS, NORMALIZACIÓN DE ESTAS Y CONSISTENCIAS DE LOS CRITERIOS UTILIZADOS PARA EL MÉTODO AHP APLICADO AL CASO DE ESTUDIO

C1: Seguridad

Nota alternativas	C1	A1	A2	A3
7	A1		2,0000	3,0000
6	A2	0,5000		2,0000
5	A3	0,3333	0,5000	

Tabla A3- 1 Matriz de comparaciones pareadas para C1

B=A*A	A1	A2	A3	
A1	3,0000	5,5000	10,0000	
A2	1,6667	3,0000	5,5000	
A3	0,9167	1,6667	3,0000	
$\Sigma =$	5,5833	10,1667	18,5000	34,2500

C=Bnorm	A1	A2	A3
A1	0,5373	0,5410	0,5405
A2	0,2985	0,2951	0,2973
A3	0,1642	0,1639	0,1622

Tabla A3- 2 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C1

	V (Vector Propio)
A1	0,5396
A2	0,2970
A3	0,1634

Tabla A3- 3 Vectores propios de las alternativas para C1

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max} =$	IC (Índice de Consistencia)=
1,6238	3,0092	3,0092	0,0046
0,8936	3,0092		
0,4918	3,0092		

RC (Razón de Consistencia)=	0,79%
-----------------------------	-------

Tabla A3- 4 Verificación de la consistencia del método para C1

C2: Autonomía

Nota alternativas	C2	A1	A2	A3
3	A1		0,3333	0,2000
5	A2	3,0000		0,3333
7	A3	5,0000	3,0000	

Tabla A3- 5 Matriz de comparaciones pareadas para C2

B=A*A	A1	A2	A3	
A1	3,0000	1,2667	0,5111	
A2	7,6667	3,0000	1,2667	
A3	19,0000	7,6667	3,0000	
$\Sigma =$	29,6667	11,9333	4,7778	46,3778

C=Bnorm	A1	A2	A3
A1	0,1011	0,1061	0,1070
A2	0,2584	0,2514	0,2651
A3	0,6404	0,6425	0,6279

Tabla A3- 6 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C2

	V (Vector Propio)
A1	0,1047
A2	0,2583
A3	0,6369

Tabla A3- 7 Vectores propios de las alternativas para C2

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max}= 3,0385$	IC (Índice de Consistencia) =	0,0193
0,3182	3,0381			
0,7849	3,0384		RC (Razón de Consistencia) =	3,32%
1,9356	3,0389			

Tabla A3- 8 Verificación de la consistencia del método para C2

C3: Impacto ambiental

Nota alternativas	C3	A1	A2	A3
6	A1		0,5000	3,0000
7	A2	2,0000		4,0000
4	A3	0,3333	0,2500	

Tabla A3- 9 Matriz de comparaciones pareadas para C3

B=A*A	A1	A2	A3
A1	3,0000	1,7500	8,0000
A2	5,3333	3,0000	14,0000
A3	1,1667	0,6667	3,0000
$\Sigma =$	9,5000	5,4167	25,0000

C=Bnorm	A1	A2	A3
A1	0,3158	0,3231	0,3200
A2	0,5614	0,5538	0,5600
A3	0,1228	0,1231	0,1200

Tabla A3- 10 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C3

	V (Vector Propio)
A1	0,3196
A2	0,5584
A3	0,1220

Tabla A3- 11 Vectores propios de las alternativas para C3

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max}= 3,0183$	IC (Índice de Consistencia) =	0,0091
0,9647	3,0183			
1,6855	3,0184		RC (Razón de Consistencia) =	1,58%
0,3681	3,0182			

Tabla A3- 12 Verificación de la consistencia del método para C3

C4: Coste

Nota alternativas	C4	A1	A2	A3
4	A1		0,2500	0,5000
7	A2	4,0000		3,0000
5	A3	2,0000	0,3333	

Tabla A3- 13 Matriz de comparaciones pareadas para C4

B=A*A	A1	A2	A3
A1	3,0000	0,6667	1,7500
A2	14,0000	3,0000	8,0000
A3	5,3333	1,1667	3,0000

$\Sigma =$ 22,3333 4,8333 12,7500 39,9167

Tabla A3- 14 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C4

	V (Vector Propio)
A1	0,1365
A2	0,6250
A3	0,2385

Tabla A3- 15 Vectores propios de las alternativas para C4

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max}=$ 3,0183	IC (Índice de Consistencia) =	0,0091
0,4120	3,0182			
1,8865	3,0184		RC (Razón de Consistencia) =	1,58%
0,7198	3,0183			

Tabla A3- 16 Verificación de la consistencia del método para C4

C5: Implementación

Nota alternativas	C5	A1	A2	A3
2	A1		0,1667	0,2000
7	A2	6,0000		2,0000
6	A3	5,0000	0,5000	

Tabla A3- 17 Matriz de comparaciones pareadas para C5

B=A*A	A1	A2	A3
A1	3,0000	0,4333	0,7333
A2	22,0000	3,0000	5,2000
A3	13,0000	1,8333	3,0000

$\Sigma =$ 38,0000 5,2667 8,9333 52,2000

Tabla A3- 18 Normalización de la matriz de comparaciones pareadas para C5

C=Bnorm	A1	A2	A3
A1	0,0789	0,0823	0,0821
A2	0,5789	0,5696	0,5821
A3	0,3421	0,3481	0,3358

	V (Vector Propio)
A1	0,0811
A2	0,5769
A3	0,3420

Tabla A3- 19 Vectores propios de las alternativas para C5

T (Vector fila total)	Q (Cociente)	$\lambda_{max}=$ 3,0291	IC (Índice de Consistencia) =	0,0145
0,2457	3,0288			
1,7475	3,0293		RC (Razón de Consistencia) =	2,51%
1,0360	3,0291			

Tabla A3- 20 Verificación de la consistencia del método para C4