



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Trabajo de Fin de Grado

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO PARA
VEHÍCULOS EVTOL. AUTOMATIZACIÓN Y
ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE REPOSTAJE.

HYDROGEN STORAGE SYSTEM FOR EVTOL VEHICLES.
AUTOMATION AND
STANDARDISATION OF THE REFUELLING PROCESS.

Autor: Ángel Sánchez González
Tutor: Dr. David Borge Díez
Tutor Empresarial (Capgemini S.A.): Néstor Velaz Acera

(Septiembre, 2022)

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL
Trabajo de Fin de Grado

ALUMNO: Ángel Sánchez González

TUTOR: Dr. David Borge Díez y Néstor Velaz Acera

TÍTULO: Sistema de Almacenamiento de Hidrógeno para Vehículos eVTOL. Automatización y Estandarización del Proceso de Repostaje.

TITLE: Hydrogen Storage System for eVTOL Vehicles. Automation and Standardisation of the Refuelling Process.

CONVOCATORIA: Septiembre, 2022

RESUMEN:

El crecimiento de las ciudades junto con la contaminación y la necesidad de reducirla, hace que surjan posibles futuras exigencias en cuanto al transporte sostenible. De ello surge el ZATA, un VTOL eléctrico de pila de hidrógeno diseñado por Capgemini. Debido a los problemas que tiene aún esta tecnología surge la necesidad de un sistema de almacenamiento de hidrógeno que sea viable para este tipo de vehículos y se procede a diseñarlo junto con una automatización de la recarga del mismo y una comparativa con otras posibilidades para ello. La alternativa que se desarrolla en este trabajo es el cambio de las bombonas vacías al final de una misión por bombonas llenas, y la comparativa se hace con un sistema similar al de las hidrogenas de los coches de pila de hidrógeno. Partiendo de la base del diseño del ZATA, su estructura, parte propulsiva y datos calculados de consumo de electricidad y de un modelado de la pila de hidrógeno, se diseña el sistema de almacenamiento del hidrógeno de forma que se equilibren peso, tamaño y simplicidad. Se calcula el volumen de hidrógeno a 700 bar necesario y la forma de conectarlo con la célula, buscando en diferentes catálogos de fabricantes los elementos básicos del sistema, como son las bombonas, las válvulas, las mangueras y roscas de conexión. Se diseña en CAD las bombonas y el sistema de enganche para las roscas para automatizarlo, decidiendo que el método sea un tornillo sin fin-corona, de forma que el proceso sea rápido y no sea necesaria la interacción humana. Con la parte interior diseñada, se procede al diseño de la automatización del sistema exterior, el cual se decide que sea similar a los de cambios de baterías automatizados en coches eléctricos, llegando así la aeronave de diseño a una estación de recambio, y mediante un brazo robótico que se mueva sobre un raíl, la aeronave se abra, agarre los tanques y en ese momento entra en funcionamiento el sistema interior, de forma que las bombonas quedan libres, el brazo las deposita en un almacén, recoge unas llenas y las lleva a la aeronave, donde el sistema exterior las vuelve a enganchar en el eVTOL, quedando éste listo para una nueva misión.

ABSTRACT:

The growth of cities together with pollution and the need to reduce it, raises possible future requirements in terms of sustainable transport. From this arises the ZATA, a hydrogen cell electric VTOL designed by Capgemini. Due to the problems that this technology still has, the need arises for a hydrogen storage system that is viable for this type of vehicle and we proceed to design it together with an automated refuelling system and a comparison with other possibilities for this purpose. The alternative developed in this work is the exchange of empty tanks at the end of a mission for full tanks, and the comparison is made with a system similar to the hydrogen stations for fuel cell cars. Based on the design of the ZATA, its structure, propulsion part and calculated electricity consumption data and modelling of the hydrogen fuel cell, the hydrogen storage system is designed to balance weight, size and simplicity. The volume of hydrogen at 700 bar required and the way to connect it to the cell is calculated, searching in different manufacturers' catalogues for the basic elements of the system, such as cylinders, valves, hoses and connection threads. The cylinders and the coupling system for the threads are designed in CAD to automate it, deciding that the method should be a worm screw-crown, so that the process is quick and human interaction is not necessary. With the interior part designed, we proceed to the design of the automation of the exterior system, which is decided to be similar to those of automated battery changes in electric cars, so that the aircraft design arrives at a refuelling station, and a robotic arm moves on a rail, the aircraft opens, grabs the tanks and at that moment the interior system comes into operation, so that the cylinders are free, the arm deposits them in a warehouse, picks up the full ones and takes them to the aircraft, where the exterior system reattaches them to the eVTOL, leaving it ready for a new mission.

Palabras clave: Hidrógeno, eVTOL, Célula de combustible, Aerotaxi, Automatización, CAD, Movilidad Urbana, UAM.

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

1. Índice de Contenido

Contenido

1	Introducción.....	15
2	Objetivos	18
3	Estado del Arte.....	19
3.1	Barreras tecnológicas.....	19
3.1.1	Densidad volumétrica del hidrógeno.....	19
3.1.2	Potencia específica de las pilas de combustible.....	20
3.1.3	BLEVE	21
3.2	¿Cómo se produce el hidrógeno?	22
3.2.1	Motor de combustión interna con hidrógeno como combustible	24
3.2.2	Propulsión eléctrica con pila de combustible	25
3.3	Comparativa con combustibles tradicionales en aviación	25
3.4	Cómo se almacena el hidrógeno.....	27
3.4.1	Métodos físicos de almacenamiento.....	28
3.4.2	El hidrógeno en España	32
3.4.3	Tanques GNC en automoción	33
3.5	ZATA.....	34
3.5.1	Modelado matemático de la PEMFC	41
4	Sistema Interior	45
4.1	Depósitos	45
4.2	Válvulas.....	49
4.3	Mangueras	52
4.4	Conexión manguera-válvula.....	54
5	Sistema exterior	63
6	Ventajas e inconvenientes frente a otros métodos.....	67

6.1	Rellenado en la aeronave	67
6.1.1	Seguridad.	67
6.1.2	Espacio.....	67
6.1.3	Económicos	68
6.1.4	Versatilidad.....	68
7	Conclusiones.....	70
8	Futuros trabajos	72
9	Agradecimientos	73
10	Referencias Bibliográficas	74

Índice de Figuras

Figura 3-1 - Comparativa de densidad energética volumétrica y gravimétrica del hidrógeno y otros combustibles [7].	20
Figura 3-2 - Obtención del hidrógeno [13].	24
Figura 3-3 - Impacto climático total de las tecnologías de propulsión convencionales y alternativas en el sector de la aviación [18].	27
Figura 3-4 - Diagrama de densidad-temperatura del hidrógeno [18].	29
Figura 3-5 - Factor de compresibilidad de varios gases en función de la presión en bar [20].	31
Figura 3-6 - Factor de compresibilidad (Z) del Hidrógeno en función de su presión y temperatura [21].	32
Figura 3-7 - Perspectiva ZATA	34
Figura 3-8 - Vista lateral del ZATA	34
Figura 3-9 - Planta del ZATA	35
Figura 3-10 - Potencia necesaria en función del tiempo de la misión.	37
Figura 3-11 - Distribución de potencia de las PEMFC a los motores.	38
Figura 3-12 - Especificaciones Ballard FCveloCity HD100 [24].	39
Figura 3-13 - Ballard FCveloCity HD100 [24].	40
Figura 3-14 - Consumo medio de hidrógeno del ZATA en mg/s durante la misión.	43
Figura 3-15 - Consumo total de hidrógeno en mg respecto al tiempo del ZATA.	43
Figura 4-1 - Esquema sencillo comparativo de los tipos de tanques de posibles a utilizar [27].	46
Figura 4-2 - Características de los tanques tipo IV de Steelhead Composites según su presión.	47
Figura 4-3 - Alzado del ZATA con los tanques en el interior.	48
Figura 4-4 - Planta del ZATA con los tanques en el interior.	48
Figura 4-5 - Perfil del ZATA con los tanques en el interior.	49
Figura 4-6 - Perspectiva de la válvula OTV700 de ROTAREX con sus partes indicadas [28].	50
Figura 4-7 - Plano de la planta de la válvula OTV700 de ROTAREX [28].	51
Figura 4-8 - Plano del perfil de la válvula OTV700 de ROTAREX [28].	52
Figura 4-9 - Manguera 2440P-04V32 de Parker [29].	53

Figura 4-10 - Vista del interior de la manguera 2440P-04V32 de Parker y sus partes [29].	53
Figura 4-11 - Esquema de denominaciones en detalle de los elementos del tornillo sin fin [33].	58
Figura 4-12 - Esquema de detalle de los elementos de la corona [33].	58
Figura 4-13 – Esquema de elementos en detalle del sistema tornillo sin fin-corona [33].	59
Figura 4-14 – Perspectiva del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.	60
Figura 4-15 - Vista lateral del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.	61
Figura 4-16 – Perfil del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.	62
Figura 5-1 – Estación de cambio de baterías de coches eléctricos NIO [35].	63
Figura 5-2 - Esquema simplificado del sistema de recarga de bombonas para el ZATA.	64
Figura 5-3 – El sistema deposita las bombonas vacías en un depósito preparado para ello.	65
Figura 5-4 - Esquema de recarga de la aeronave ZATA.	66
Figura 6-1 - Camión XCIENT Fuel Cell de Hyundai [37].	69

Índice de Tablas

Tabla 3-1 - Comparativa de potencia específica de célula de combustible con motores varios [9].....	20
Tabla 3-2- Características generales de los motores del ZATA	36
Tabla 3-3- Potencia empleada por cada motor del ZATA	36
Tabla 3-4- Uso de cada PEMFC respecto a cada motor del ZATA en la misión..	37
Tabla 3-5- Consumo de las PEMFC del ZATA durante la misión.....	44
Tabla 3-6- Consumo total y medio del ZATA en la misión	44
Tabla 4-1- Dimensionamiento de los tanques de hidrógeno del ZATA	45
Tabla 4-2- Características principales de la manguera 2440P-04V32 de Parker [29].	54
Tabla 4-3- Tabla de especificaciones de la rosca [30].	55
Tabla 4-4- Tabla indicadora del par de apriete de la rosca del catálogo 4300 de Parker [30].....	56

Glosario de abreviaturas y acrónimos

Símbolo	Descripción	Unidades
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion - Expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición	-
CO₂	Molécula de dióxido de carbono	-
EASA	European Union Aviation Safety Agency - Agencia Europea de Seguridad Aérea	-
EEUU	Estados Unidos	-
eVTOL	electric Vertical Take-Off and Landing – Despegue y Aterrizaje Vertical eléctrico	-
FAA	Federal Aviation Administration – Administración Federal de Aviación	-
H₂	Molécula de hidrógeno	-
ISO	International Organization for Standardization - Organización Internacional de Normalización	-
MTOW	Maximum Take-Off Weight – Masa Máxima al Despegue	kg
NO_x	Óxidos de nitrógeno	-
PEMFC	Proton-exchange membrane fuel cell - Célula de combustible de membrana de intercambio de protones	-
PIB	Producto Interior Bruto	€
UAM	Urban Air Mobility – Movilidad Aérea Urbana	-
VTOL	Vertical Take-Off and Landing – Despegue y Aterrizaje Vertical	-
WEF	World Economic Forum – Foro Económico Mundial	-

En Ecuaciones		
Símbolo	Descripción	Unidades
Z	Factor de compresibilidad	-
M	Módulo	mm
n	Entradas del tornillo sin fin	-
N	Número de dientes	-
c	Espacio entre dientes	mm
d	Diámetro interior	mm
de	Diámetro exterior	mm
dp	Diámetro primitivo	mm
e	Espesor del filete	mm
f	Extremos sin rosca	mm
h	Altura del filete	mm
l	Altura del pie del del diente	mm
L	Altura de la cabeza del filete	mm
LR	Longitud roscada	mm
p	Paso	mm
r	Radio de la cabeza	mm
T	Ancho del fondo del filete	mm
α	Ángulo del filete	°
β	Ángulo beta del tornillo sin fin	°
δ	Delta	°
A	Ancho de la corona	mm
DE	Diámetro exterior	mm
DP	Diámetro primitivo	mm
D1	Diámetro mayor y sobre aristas	mm
E	Distancia entre centros	mm
H	Altura del diente	mm

P	Paso	mm
r	Radio de la Cabeza	mm
R	Concavidad Periférica	mm

1 Introducción

En la actualidad, más de 4.000 millones de personas, es decir, más de la mitad de la población mundial, viven en las ciudades. Son el epicentro de la actividad económica, ya que más del 80% del PIB mundial se genera en las ciudades, según el Banco Mundial [1].

Las ciudades son también comunidades vibrantes que ofrecen a sus residentes acceso a una diversidad de actividades culturales y sociales.

Pero a medida que aumenta la densidad urbana, se produce una degradación de la calidad de vida, incluyendo la pobreza, la mala calidad del aire y del agua, los problemas de eliminación de residuos y un elevado consumo de energía. Un factor importante que contribuye al deterioro de la calidad del aire es la expansión urbana y la dependencia del motor de combustión interna para la gran mayoría de los vehículos que transportan personas y mercancías. En EE.UU., los vehículos son responsables del 29% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero, más que la producción de electricidad (28%) y la producción industrial (22%), según la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos [2]. En la Unión Europea el transporte representa el 30% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero, de las cuales 72% proviene del transporte por carretera [3].

En cualquier megaciudad del mundo la situación será la misma. Los desplazamientos al trabajo se han convertido en una importante pérdida de tiempo para millones de personas en todo el mundo. En Londres, el viajero medio pasa 227 horas al año atrapado en tráfico, viajando a una velocidad de sólo 11 km/h. Y la congestión del tráfico urbano probablemente empeorará. Para 2050, se prevé que la población mundial crezca en más de 2.000 millones, hasta llegar a casi 10.000 millones, y casi el 70% de nosotros vivirá en un entorno urbano [4].

La búsqueda de tecnologías y modelos de transporte mejores y más sostenibles para mejorar los tiempos de desplazamiento y acelerar el transporte de mercancías por la ciudad. Coches eléctricos, e-scooters, plataformas de ride-hailing, y los trenes de alta velocidad formarán parte de nuestra red de transporte multimodal. Para seguir el ritmo del crecimiento de las ciudades, se tienen que crear nuevos medios de transporte que pasan de idea al mundo real.

La movilidad aérea urbana (UAM) nos ofrece una nueva forma de ir al trabajo y transportar mercancías con aviones eléctricos de despegue y aterrizaje vertical (eVTOL). Al igual que el helicóptero, esta nueva clase de aeronave se sitúa en un punto intermedio entre los aviones comerciales y los drones teledirigidos, configurados para transportar grandes cargas y personas.

Los eVTOLs utilizan baterías en lugar de combustible para la propulsión y son más maniobrables, menos complejos y más eficientes que los helicópteros, además de no contaminar directamente en su uso por la ausencia de un motor térmico que queme gases. Están diseñados para volar a una altitud inferior a la de los aviones comerciales y serán pilotados o autónomos.

En la actualidad, hay más de 100 proyectos VTOL en desarrollo en todo el mundo, sin embargo, pasar de la fase de desarrollo a la de prueba y a la comercial de un eVTOL es una tarea difícil, especialmente en cuanto a inversión. Los casos de uso para la movilidad aérea incluyen la entrega de paquetes y cargas, el transporte de personas sobre la expansión urbana en taxis aéreos y las lanzaderas de los aeropuertos, así como servicios interurbanos de pasajeros, y aplicaciones específicas como las ambulancias aéreas, búsqueda y rescate, y extinción de incendios.

Gran parte de la inversión en eVTOL hasta la fecha se ha centrado en el diseño y aspecto de la aeronave, cómo se propulsa y cómo funciona, así como en cómo hacerla tan o más segura que la aviación comercial y en cómo crear una gran experiencia para el cliente.

Los criterios de diseño son:[4]

- Carga de pago

El rango abarca desde vehículos unipersonales (100 kg) hasta 9 personas más equipaje (960 kg). Tanto EASA y FAA están recomendando establecer el MTOW para eVTOLs en 3175 kg.

- Seguridad

Para poder operar sobre áreas pobladas, los eVTOLs deberán ser al menos tan seguros como las aeronaves de aviación general. Aun así, debido al rápido crecimiento en el número de eVTOLs operando en las ciudades, las regulaciones deberán imponer estándares de seguridad más restrictivos que los que se aplican a aviación general.

- Ruido

La contaminación acústica, tanto en frecuencia como en nivel de decibelios, es un serio problema para la operación de eVTOLs en entornos urbanos. Uber, por ejemplo, requiere que los eVTOLs sean 15 dB menos ruidosos que los helicópteros ligeros existentes, que es alrededor de 70 dB a 500 ft frente a los 85 dB de un helicóptero típico.

- Costes

Como parte de la “movilidad como servicio”, los eVTOLs serán gestionados por proveedores del servicio, y seguramente no se vendan a clientes privados. Los proveedores del servicio de movilidad comprarán flotas de eVTOLs que serán parte de un negocio de servicio bajo demanda, reduciendo así los costes de producción por vehículo y rebajando el coste por kilómetro, facilitando así el éxito comercial de los eVTOLs.

2 Objetivos

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal el diseño de un sistema de almacenaje de hidrógeno y la automatización de la recarga de para una aeronave eVTOL de célula de combustible de la que se disponen datos de consumo y componentes básicos.

De este modo se pretende en primer lugar calcular el volumen necesario de hidrógeno a la presión adecuada, búsqueda, elección y adaptación de sistema de almacenamiento y de alimentación a la célula de combustible.

En segundo lugar, se quiere idear un sistema para automatizar el recambio de bombonas de hidrógeno en la aeronave sin necesidad de interacción humana, centrándonos especialmente en los componentes interiores que irían acoplados a la aeronave.

Además, se pretende comparar ligeramente el sistema elegido de recarga de hidrógeno en la aeronave respecto a otros sistemas ya existentes que se podrían adaptar.

Finalmente, y con el objetivo de dar continuidad al trabajo, se propondrán trabajos futuros tal que se puedan ampliar conocimientos en el área de trabajo y la tecnología aplicable en él.

3 Estado del Arte

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, es el elemento químico más ligero, estando formado tan solo por un protón y un electrón, y es estable en forma de molécula diatómica (H_2) [5].

En condiciones ambientales normales se encuentra en estado gaseoso, y es insípido, incoloro e inodoro.

En la Tierra es muy abundante, constituye aproximadamente el 75 % de la materia del Universo, pero se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua, o al carbono, formando compuestos orgánicos. Por tanto, no es un elemento que pueda tomarse directamente de la naturaleza si no que hay que procesarlo para obtenerlo y que sea viable como combustible.

3.1 Barreras tecnológicas

Cuando se plantean saltos tecnológicos como los eVTOL, surgen dudas y problemas a solucionar antes de hacerlos viables. Tienen problemas como todas las tecnologías, especialmente al momento de aplicarlas a la aeronáutica, donde el tamaño y el peso son claves, pero puede llegar a ser posible solventarlos o al menos reducirlos con suficiente investigación.

3.1.1 Densidad volumétrica del hidrógeno

El hidrógeno tiene una gran densidad energética por unidad de masa, siendo uno de los combustibles con mayores cifras con 39,5 kWh/kg, que, comparándolo con el petróleo, que ostenta una cifra de 13,1 kWh/kg, deja ver una gran ventaja en este aspecto en favor del hidrógeno [6].

El problema viene cuando hablamos de su energía volumétrica, que siendo de tan sólo 2,2 kW/m³ frente a los 10445,3 kWh/m³ del petróleo, lo que nos deja un resultado tal que, a igual volumen, el hidrógeno contiene solo 0,00021 veces la energía que puede almacenar el petróleo, por lo cual es necesario cambiar esas condiciones normales, por ejemplo, aumentando la presión, de forma que esa capacidad energética aumente, a pesar de tener el mismo volumen. Por ejemplo, a 700 bar, la presión elegida para el diseño de este trabajo, la densidad energética volumétrica del hidrógeno es de 1333,44 kWh/m³ [7].

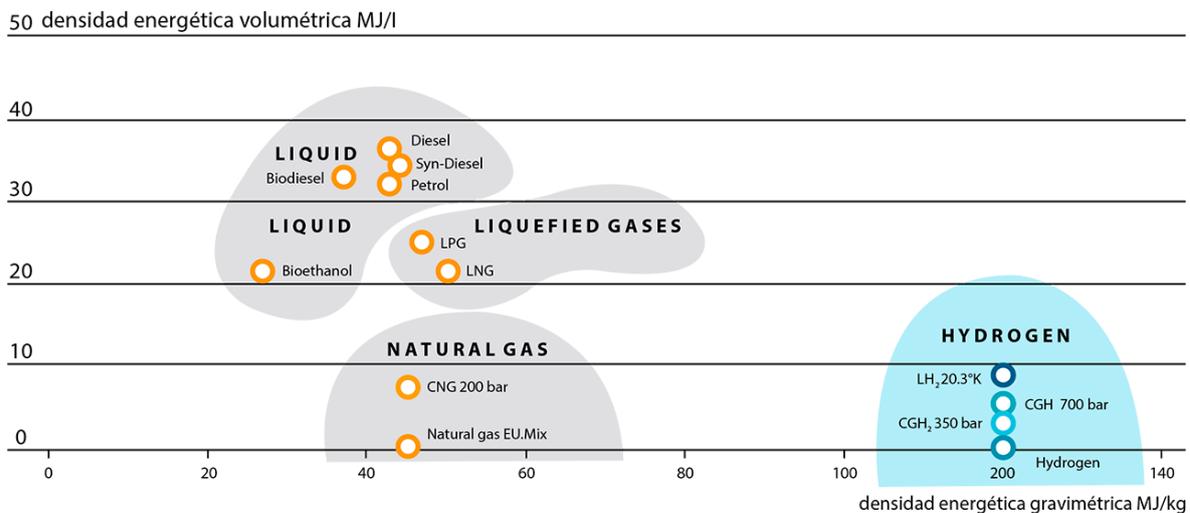


Figura 3-1 - Comparativa de densidad energética volumétrica y gravimétrica del hidrógeno y otros combustibles [7].

Como se puede observar en la Figura 3-1, el hidrógeno (zona azul) tiene la mayor densidad energética gravimétrica de entre los diversos combustibles mostrados mientras que una de las menores densidades energéticas volumétricas.

3.1.2 Potencia específica de las pilas de combustible

Uno de los grandes problemas de los vehículos de pila de hidrógeno, es que su potencia específica es baja comparada con las de los motores de combustión, generando una cantidad menor de W por kg de peso. Aunque se está aumentando estas cifras a medida que se investiga, produciendo entre 200 y 300 W/kg las células de combustible de primera generación, y entre 300 y 400 W/kg las de segunda generación [8]. A pesar de ser un aumento considerable, sigue quedando retrasado respecto a los motores de combustión interna, como queda ejemplificado en la tabla 3-1:

Tabla 3-1 - Comparativa de potencia específica de célula de combustible con motores varios [9]

Tipo de motor	Potencia (W) / Masa(kg)	Potencia específica (W/kg)
Célula de combustible	100000 / 280	357
Motor de coche	149140 / 168	888

Motor a reacción	39447523 / 352	152530
------------------	----------------	--------

3.1.3 BLEVE

Un BLEVE es un tipo de explosión mecánica. El nombre procede de sus siglas en inglés “Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”, que se traduciría como Expansión Explosiva de Vapor de un Líquido en Ebullición” [10].

Es un caso especial de estallido de un recipiente en el que hay una sustancia a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados.

En nuestro caso no es prácticamente aplicable ya que ocurre con gases licuados o líquidos a alta presión y temperatura.

Un BLEVE puede producirse sin necesidad de reacciones químicas ni fenómenos de combustión, y no es aplicable tan solo al hidrógeno, podría producirse incluso en calentadores de agua o calderas de vapor, básicamente podría ocurrir en cualquier líquido almacenado en un recipiente hermético.

Usualmente ocurren por un incendio en el exterior del recipiente, especialmente en un nivel por encima del líquido interno, debilitando la resistencia del tanque y acabando en una rotura del mismo, dando lugar a un escape súbito del contenido, lo que provoca la transformación de éste a un estado gaseoso, y dado que el hidrógeno es altamente inflamable, da lugar a una bola de fuego que ocurre por una deflagración de la masa de vapor liberada.

Una de las características fundamentales de las BLEVE es la expansión explosiva de toda la masa de líquido, aumentando su volumen más de 200 veces y proyectando de forma repentina fragmentos del recipiente a distancias considerables.

Tras el estallido, la gran masa evaporada asciende en el exterior, arrastrando finas partículas de líquido y entrando en combustión en forma de hongo, con la gran bola de fuego superior tras un instante y al haberse producido la difusión en el aire por debajo del límite superior de inflamabilidad. Esta bola de fuego se irá expandiendo a medida que va ardiendo la totalidad de masa de vapor liberada.

Dado que para que se produzca una BLEVE, es necesario que el gas esté en estado líquido sobrecalentado y haya una bajada súbita de la presión en el interior

del recipiente, almacenando el hidrógeno en estado gaseoso, se evita este fenómeno.

3.2 ¿Cómo se produce el hidrógeno?

Existen distintos métodos de producción de hidrógeno. Se puede producir a partir de distintas materias primas, distintas fuentes de energía y por distintos procedimientos.

Según sean la materia prima y la fuente energética utilizada para producirlo, según la Asociación Española del Hidrógeno [11] se podrá hablar de:

- Hidrógeno Gris: Se denomina así al hidrógeno producido a partir de fuentes de energía fósiles como el gas natural, el petróleo o el carbón. Según algunos métodos de clasificación como el proyecto certifHy [12], se incluye en esta categoría todo el hidrógeno producido a partir de cualquier fuente que no pueda garantizar su origen renovable. Existen varias formas de producir hidrógeno de este tipo, pero los más habituales son:
 - Reformado con vapor del gas natural (método mayoritario en el mundo actualmente).
 - Gasificación del carbón.
- Hidrógeno Azul: Se genera de fuentes de origen fósil con pocas emisiones contaminantes asociadas, como puede ser sistemas que tengan métodos de captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero a los alrededores.
- Hidrógeno Turquesa: Es un término reciente y prácticamente sin uso. Está asociado a producción de hidrógeno basada en fuentes de energía sin emisiones contaminantes de la mano, como por ejemplo la pirólisis del gas natural, que produce hidrógeno y carbono sólido.
- Hidrógeno Verde: Es el hidrógeno que se produce a partir de fuentes de energía renovables y que generan bajas o incluso nulas emisiones contaminantes. Para que pueda catalogarse como hidrógeno verde, tanto la fuente de energía como la materia prima deben haberse obtenido de fuentes renovables. Algunos métodos de obtención de Hidrógeno Verde son:
 - Electrólisis de agua: Es el más conocido y consiste en separar una molécula de agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, aplicando una corriente eléctrica en un electrolizador.

- Reformado con vapor de biogases, bioalcoholes o residuos orgánicos.
- Fotocatálisis.
- Termólisis de agua.
- Producción por microorganismos

La producción de hidrógeno se puede clasificar también según su lugar de producción, teniendo así grandes instalaciones para abastecer a una gran cantidad de lugares y población, o bien pequeñas unidades de producción distribuidas cerca del punto de uso, pudiendo ser incluso áreas remotas, que de la otra manera no sería rentable llevarles el hidrógeno.

Cuando el hidrógeno es producido usando fuentes de energía renovables y se aprovecha para la alimentación eléctrica de las pilas de combustible de alta eficiencia, los beneficios medioambientales del hidrógeno son aún mayores. Además, el hidrógeno puede ser producido y almacenado utilizando los excedentes de energía producida por las energías renovables, como la solar, la eólica, la hidráulica, etc.

La cantidad de energía que puede ser liberada por un kilogramo de hidrógeno es muy grande, pudiendo ser hasta casi el triple que la gasolina o el gas natural [13]. Además, la liberación de esa energía se hace de forma completamente limpia, emitiendo tan sólo vapor de agua a la atmósfera, nada de dióxido de carbono, lo que en la situación actual de calentamiento global es imprescindible.

En la Figura 3-2 se pueden observar los diversos orígenes posibles y métodos de obtención del hidrógeno de forma resumida.

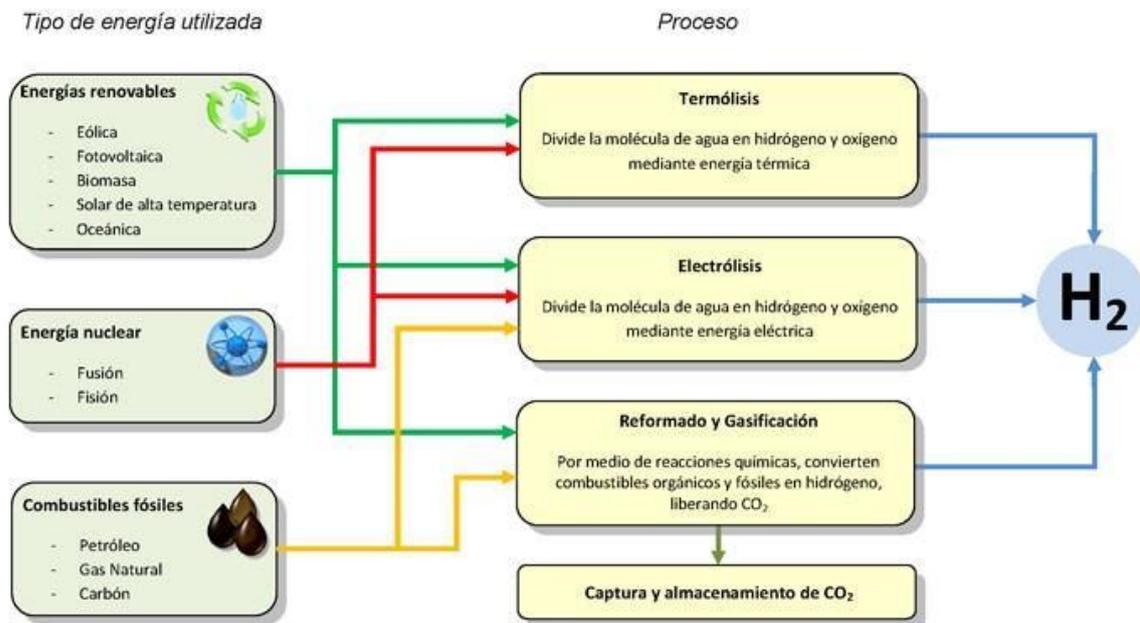


Figura 3-2 - Obtención del hidrógeno [13].

Existen diversas formas de aprovechar la energía del hidrógeno para la propulsión con el mismo. A continuación, procedemos a resumir algunas de ellas:

3.2.1 Motor de combustión interna con hidrógeno como combustible

Funciona de forma similar a un motor de gasolina de cuatro tiempos, usando un diseño de cuatro fases para la admisión, compresión, ignición y escape [14].

La principal diferencia respecto a un motor de gasolina radica en que en lugar de liberar gases tóxicos como CO₂, tan solo produce agua como producto principal de su combustión.

Aunque aún produce algunas emisiones de NO_x como resultado del calor, son muy inferiores a las de un motor gasolina.

Bien es cierto que las relaciones de riqueza aire-combustible, compresión, tiempo y energía son muy diferentes, ya que por ejemplo el hidrógeno podría llegar a tener una relación 180:1, lo que comparando con lo que estamos acostumbrados en los motores actuales de combustión interna es muy bajo, pero una relación de compresión mucho más alta ya que tiene un índice de octano más alto [15].

3.2.2 Propulsión eléctrica con pila de combustible

Es una tecnología con altísimo potencial que ofrece a una gama de industrias, incluida la automoción, la aviación y la transmisión pesada, considerables beneficios de eficiencia energética y descarbonización. Hoy en día, la tecnología de hidrógeno se utiliza para diversos fines, que incluyen proporcionar capacidad de respaldo de emergencia para instalaciones críticas como hospitales, reemplazando la red eléctrica, o también para instalaciones esenciales como centros de datos o servidores.

Los siguientes son algunos de los principales beneficios más importantes de las pilas de combustible:

- Las pilas de combustible, a diferencia de las baterías, no requieren recarga y pueden seguir generando energía siempre que haya una fuente de combustible (hidrógeno) disponible.
- Las pilas de combustible individuales se pueden "apilar" para crear sistemas más grandes que puedan generar más energía, lo que permite la escalabilidad. Las pilas de pilas de combustible se pueden acoplar para formar sistemas de varios megavatios a gran escala, mientras que una sola pila de combustible es capaz de generar suficiente electricidad para potenciar una aplicación específica.
- Las pilas de combustible son silenciosas y confiables ya que no tienen partes móviles.

3.3 Comparativa con combustibles tradicionales en aviación

El hidrógeno tiene una energía específica tres veces mayor que la del combustible para aviones común, pero tiene una densidad energética menor. Lo ideal sería utilizar tanques de 700 bar para aviación ya que se puede comprimir más cantidad de hidrógeno en el mismo espacio, siendo éste una de las variables más importantes a la hora de diseñar y construir una aeronave.

El peso es uno de los principales obstáculos a la hora de idear un vuelo con hidrógeno como fuente de energía principal, dado que se necesita usar tanques muy reforzados que aguanten las presiones del hidrógeno gaseoso de forma que haya una buena cantidad del mismo en un pequeño espacio, o bien usar tanques

lo más ligeros posible capaces de mantener el hidrógeno líquido, es decir por debajo de su punto de ebullición de 20 Kelvin.

La densidad del hidrógeno líquido es mayor que la de la gasolina de aviación [16], sin embargo, debido al peso añadido de los sistemas de contención y mantenimiento de condiciones necesarios para el hidrógeno, esta balanza aún cae del lado de la gasolina de aviación [17], aunque se prevén mejoras en estos aspectos.

Pero la reducción de emisiones es tan solo parte del problema, ya que hay que tener en cuenta el impacto de todo el ciclo de producción y vida del producto en cuestión, en este caso de las aeronaves.

En el informe del WEF elaborado en colaboración con el Acelerador del Impacto de la Aviación de la Universidad de Cambridge, se pone de manifiesto la comparativa siguiente (Figura 3-3) del impacto las tecnologías de propulsión actuales con las alternativas en el sector que nos ocupa.

Bien es cierto que a día de hoy los métodos de almacenamiento físicos son los más utilizados de los que más conocimiento se tiene, ya que son bastante similares a los empleados con otros gases de uso común, aunque aún plantean ciertos problemas que no se tienen con otro tipo de materiales, por lo que la investigación sigue siendo fundamental.

En este estudio nos centraremos más en los métodos de almacenamiento físicos del hidrógeno.

3.4.1 Métodos físicos de almacenamiento.

Tratamos ahora los métodos físicos de almacenamiento, en los que las moléculas de hidrógeno están en su forma libre, lo que significa que existen sin que sean absorbidos por otro material o se unan a otras sustancias.

Buscando un equilibrio entre presiones que sean soportables por los tanques en los que se almacenen con temperaturas que sean relativamente fáciles de conseguir y mantener, se intenta maximizar la capacidad gravimétrica (relación entre masa de hidrógeno almacenada y masa total del dispositivo, incluyendo el hidrógeno y el contenedor), así como la capacidad volumétrica (masa de hidrógeno por unidad de volumen).

En el diagrama siguiente pueden verse las regiones correspondientes a hidrógeno líquido, hidrógeno criocomprimido e hidrógeno comprimido gaseoso en una relación de temperatura frente a densidad, siendo la zona morada el hidrógeno líquido, la verde el hidrógeno en estado criocomprimido y la amarilla en estado gaseoso comprimido.

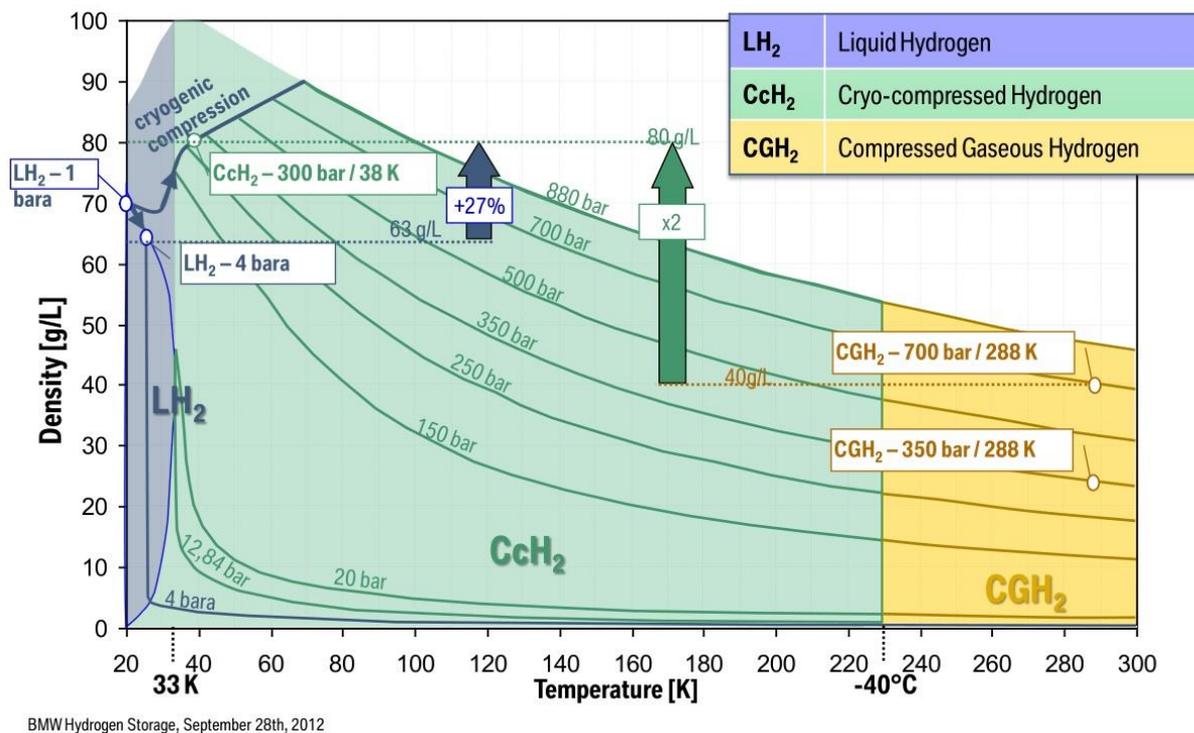


Figura 3-4 - Diagrama de densidad-temperatura del hidrógeno [18].

Como se puede observar en la Figura 3-4, el hidrógeno líquido y el hidrógeno criocomprimido, presentan una densidad más grande que el hidrógeno comprimido gaseoso, por lo que podría parecer más interesante, de primeras, emplear estos métodos para el sistema que estamos diseñando, pero debido a otros problemas que se plantean en esos casos, como la necesidad de mantenerlo a una temperatura tan baja, el método más investigado y usado en la actualidad es el de hidrógeno comprimido gaseoso, siendo este el que usaremos en este trabajo.

Actualmente se suele presurizar el hidrógeno (por ejemplo, en coches de pila de hidrógeno, aunque están poco extendidos) a 700 bar en tanques especiales, aumentando esta cifra hasta incluso 1000 bar en las denominadas “hidrogeneras”. Debido a estas altas presiones, los tanques en los que se almacena el hidrógeno deben estar preparados para soportar altas tensiones, así como una gran cantidad de ciclos a fatiga por la carga y descarga continua del depósito con la presurización y despresurización, y por tanto esfuerzo, que ello conlleva.

Dado que las moléculas de hidrógeno son tan pequeñas (el átomo de hidrógeno tiene un radio atómico de 78 pm [19] y la molécula está formada por dos átomos), éstas pueden permear a través de muchos materiales, teniendo así fugas de la

sustancia, por lo que hay que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar los depósitos para almacenarlo.

Calcular la capacidad de los tanques directamente con la ecuación de los gases ideales sería un error, ya que los gases reales tienden a comportarse como ideales de forma fiable a presiones muy bajas, sin embargo, cuando la presión aumenta o la temperatura disminuye de forma significativa, el gas deja de comportarse como ideal.

Para conocer el comportamiento del gas a altas presiones, utilizamos el factor de compresibilidad, que relaciona el comportamiento del gas a una presión real con el comportamiento ideal.

$$Z = \frac{p * v}{R * T} \quad (3-1)$$

Siendo:

- P : la presión.
- \underline{v} : $M*v$, donde M es la masa atómica y v el volumen.
- \underline{R} : $R*M$, donde R es una constante específica del gas expresada en kJ/kg*K en el Sistema Internacional y M la masa atómica.

Por lo que obtenemos:

$$Z = \frac{p * v}{R * T} \quad (3-2)$$

Es decir:

$$P * v = ZRT \quad (3-3)$$

Por lo que podemos expresarlo también como:

$$Z = \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \quad (3-4)$$

En la figura 3-5 se puede observar el factor de compresibilidad del hidrógeno comparado con los del Nitrógeno, Oxígeno y CO₂.

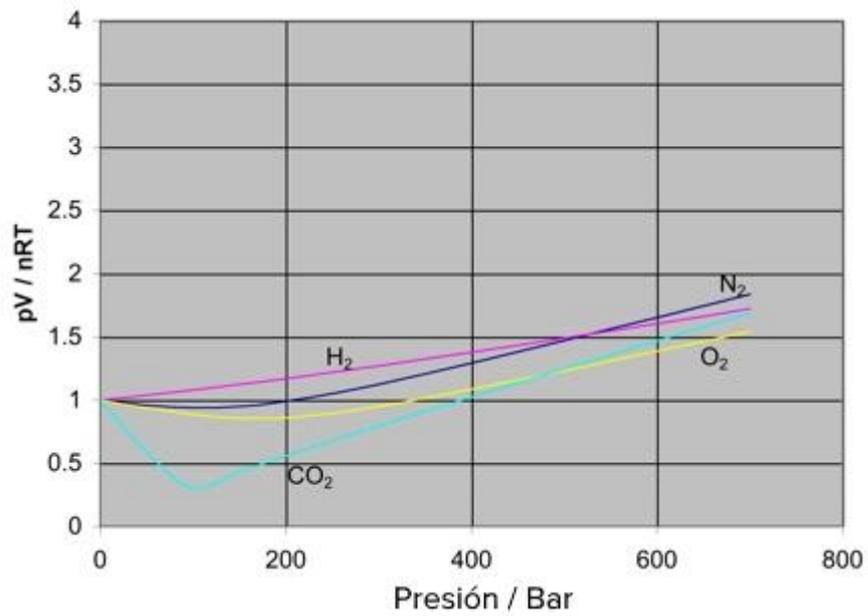


Figura 3-5 - Factor de compresibilidad de varios gases en función de la presión en bar [20].

En la Figura 3-6 se puede observar el comportamiento del del factor de compresibilidad del hidrógeno frente a la presión a la que se somete:

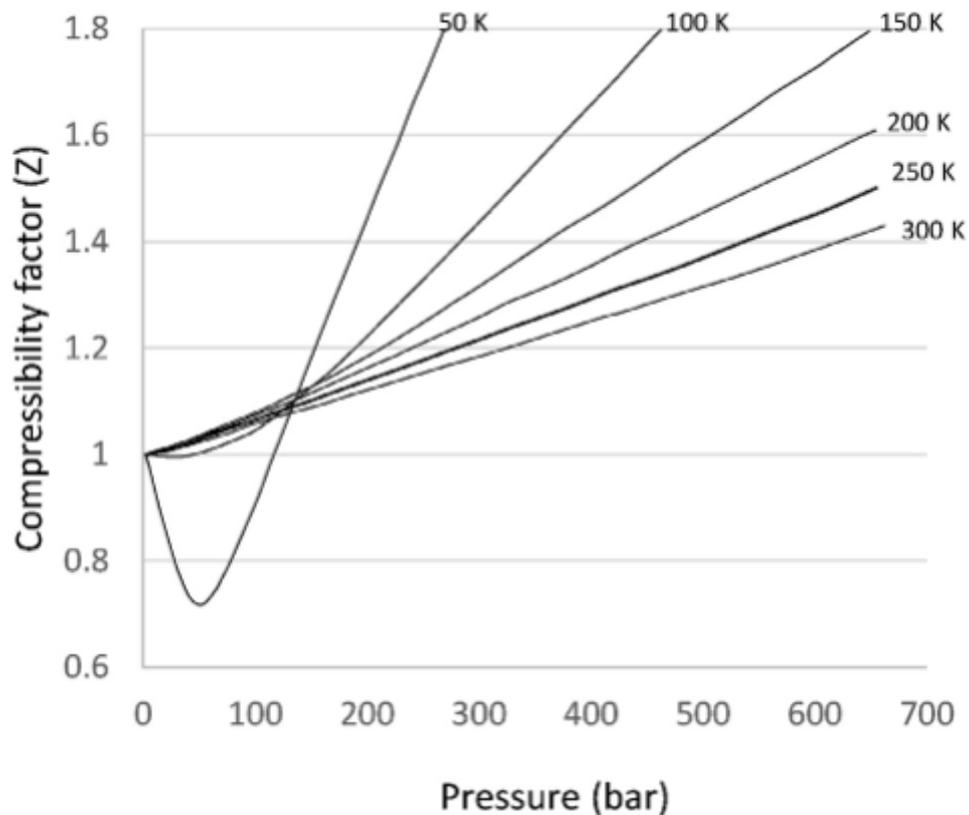


Figura 3-6 - Factor de compresibilidad (Z) del Hidrógeno en función de su presión y temperatura [21].

Dado que el diseño lo realizaremos para tanques a 700 bar, usaremos $Z=1,449$.

3.4.2 El hidrógeno en España

El Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico publicó el 9 de Octubre de 2020 la “Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el Hidrógeno Renovable” [22].

Se trata de un plan con el que el Gobierno pretende impulsar el uso de esta energía sostenible, que consideran clave para una neutralidad climática en el país y un sistema eléctrico 100% renovable con fecha límite para establecerse en 2050. Este documento plantea que el despliegue del hidrógeno verde incentivará el progreso de cadenas de valor que contribuyan a la generación de empleo y de actividad económica, impulsando así una economía verde.

Se incluyen objetivos nacionales a 2030 de implantación de hidrógeno, como 4 GW de potencia instalada de electrolizadores o un hito intermedio en 2024 de entre 300 y 600 MW de potencia instalada [23].

De esta manera, se prevén reducciones de gases de efecto invernadero en 4, millones de toneladas equivalentes de CO₂, así como se analiza el potencial de hidrógeno entre 2030 y 2050, concluyendo que España tiene la capacidad de generar un proyecto de país alrededor del hidrógeno verde, impulsando la industria nacional, la generación de empleo y el crecimiento tecnológico.

3.4.3 Tanques GNC en automoción

Se pueden buscar similitudes en nuestro proyecto con los sistemas de GNC que utilizan algunos automóviles a día de hoy, buscando abaratar costes en relación a un automóvil gasolina o diésel y contaminar menos.

También se pueden encontrar parecidos en la lista de componentes específicos encontrada en la Regulación N° 110 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UN/ECE) que estos sistemas llevan y que el nuestro deberá llevar:

- Depósito(s) completamente estancos ante el hidrógeno.
- Accesorios del tanque.
- Regulador de presión.
- Válvula automática.
- Válvula manual.
- Dispositivo de admisión de gas.
- Regulador de flujo de gas.
- Línea de combustible (flexible y/o sólida).
- Unidad de llenado.
- Válvula de no retorno.
- Válvula de descarga o sobrepresión.
- Válvula de alivio (activada por temperatura).
- Filtro.
- Sensores e indicadores de presión y temperatura.
- Válvula de exceso de flujo.
- Unidad de control electrónica.
- Compartimento estanco al gas.
- Válvula de servicio.
- Sujeciones.
- Ventilación.

3.5 ZATA

La aeronave sobre la que se hará el trabajo será ZATA, VTOL eléctrico conceptual diseñado por CAPGEMINI, pensada como un aerotaxi RPAS.

La estructura básica se puede ver en las Figuras 3-7 y 3-8.

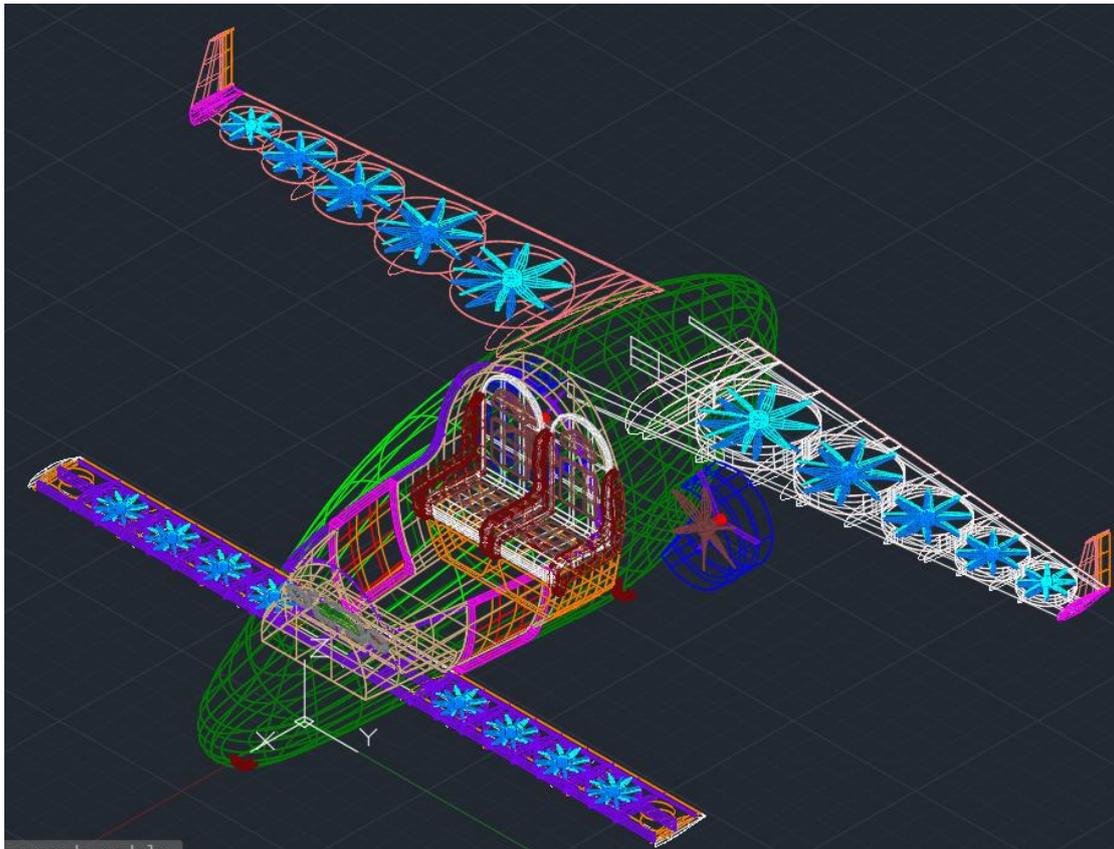


Figura 3-7 - Perspectiva ZATA

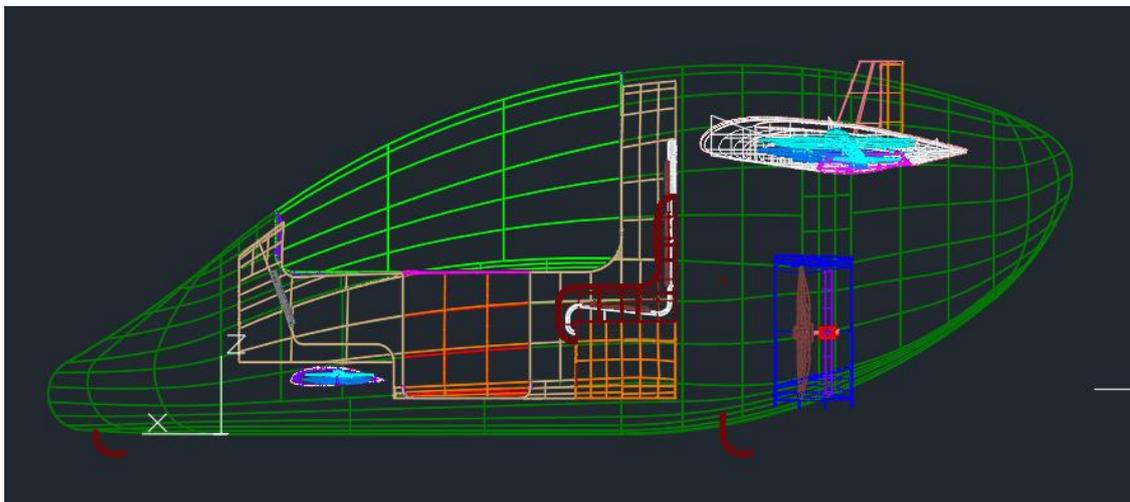


Figura 3-8 - Vista lateral del ZATA

Es una aeronave biplaza eléctrica con dos grupos de motores:

- **Motores de crucero:** son dos y se emplean para la propulsión horizontal hacia adelante. Son los que funcionan la mayor parte del tiempo.
- **Motores de despegue:** se subdividen a su vez en 2:
 - **Canard delantero:** Un total de 8 motores, 4 a cada lado del fuselaje
 - **Ala principal:** 10 motores en total, divididos en 5 parejas

La distribución se puede observar en la Figura 3-9.

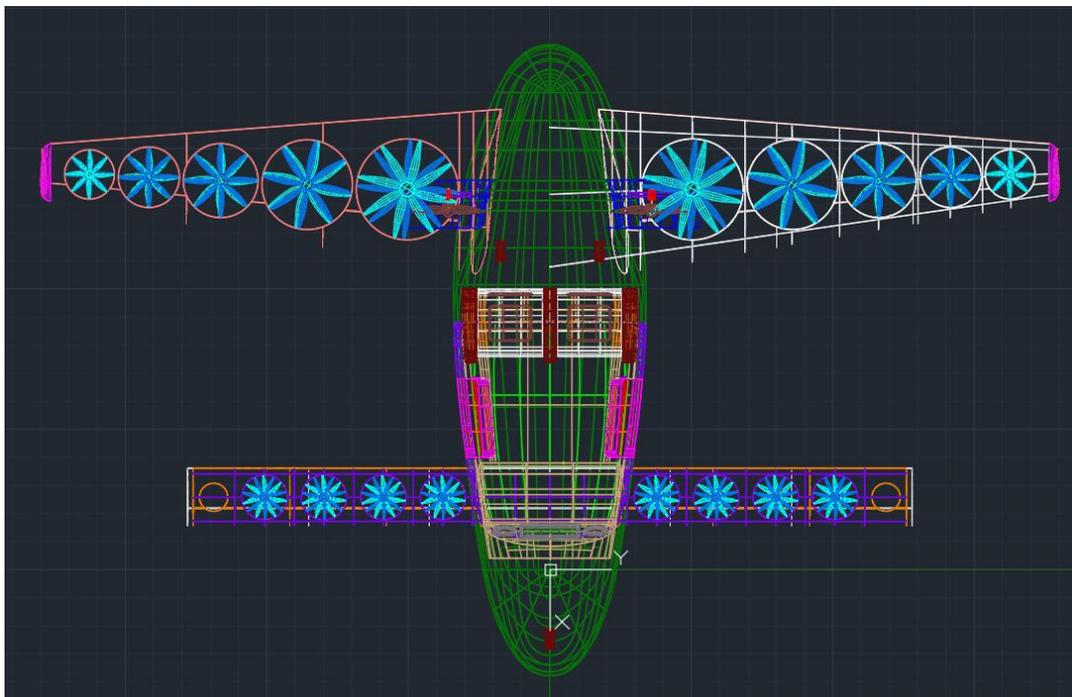


Figura 3-9 - Planta del ZATA

A la hora de calcular el depósito de hidrógeno necesario para la aeronave hay que calcular primero la cantidad de energía que necesita el aerotaxi para cumplir con su labor.

Tabla 3-2- Características generales de los motores del ZATA

	Crucero	Canard	Wing 1	Wing 2	Wing 3	Wing 4	Wing 5
N.º rotores	2	8	2	2	2	2	2
Motores	Power Drive 60	Emrax 188	EM 42	Electravia GMPE 104	Emrax 208	Emrax 188	Turnigy CA 120
Potencia máxima motores [kW]	60	16	42	26	22	16	10
Diámetro [m]	0,76	0,4	0,9	0,8	0,66	0,54	0,44
RPM	3600	7700	3100	3200	4000	4800	5800
Tracción por Rotor [N]	513,7	320,7	1279,2	851,2	616	397,5	255,9
Potencia requerida por hélices [kW]	53,4	11,34	40,29	24,67	18,4	11,66	7,4

Teniendo lo anterior en cuenta se puede obtener un perfil de potencia requerida en la misión:

Tabla 3-3- Potencia empleada por cada motor del ZATA

Potencia empleada			
Motores	Potencia en kW	% potencia al despegue	% potencia en crucero
Canard	128	100	0
Wings 1	84	100	0
Wings 2	52	100	0
Wings 3	44	100	0
Wings 4	32	100	0
Wings 5	20	100	0
Crucero	120	0	75
Total	480		

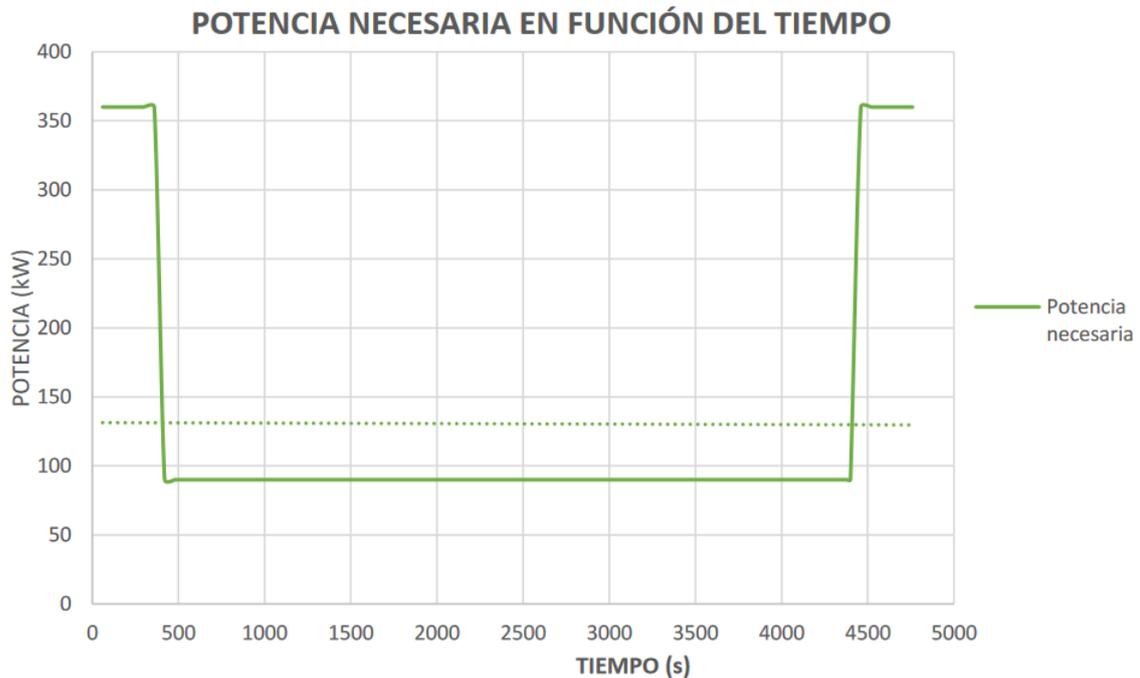


Figura 3-10 - Potencia necesaria en función del tiempo de la misión.

Como se puede observar en la Figura 3-10, el mayor consumo de energía se produce en el despegue y aterrizaje, donde entran en funcionamiento los motores de movimiento vertical.

Basado en lo expuesto anteriormente, se decide utilizar PEMFC de 100 kW cada una, obteniendo la siguiente disposición:

Tabla 3-4- Uso de cada PEMFC respecto a cada motor del ZATA en la misión

Utilización de cada PEMFC en la misión						
Motores	PEMFC 1	PEMFC 2	PEMFC 3	PEMFC 4	PEMFC 5	
Canard	*	*		*	*	
Wings 1	*	*				
Wings 2	*	*				
Wings 3			*			
Wings 4			*			
Wings 5			*			
Crucero				*	*	
kW Despegue	68	68	96	64	64	Total kW
kW Crucero				45	45	90

Se encuentran marcadas con un asterisco los grupos de motores alimentados por las PEMFC de la columna correspondiente.

Se puede observar redundancia en los motores del canard, wings 1 y wings 2, así como en los de crucero. Esto es así para llegar a la potencia necesaria para

alimentarlos, además de asegurar una tracción mínima en caso de fallo de alguna de las PEMFC. En los motores correspondientes a wings 3, wings 4 y wings 5 no se ha considerado necesario porque la tracción que proporcionan esos 3 grupos de motores juntos es mucho menor que los otros motores VTOL y el aumento en el peso y complicación del sistema no merecería la pena.

A continuación, se muestra en la Figura 3-11 un esquema de como quedaría configurado el sistema:

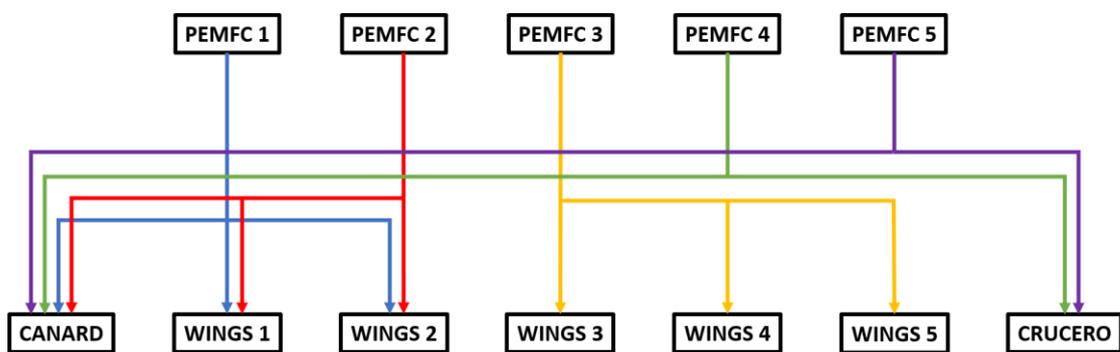


Figura 3-11 - Distribución de potencia de las PEMFC a los motores.

De nuevo se puede observar la redundancia en la alimentación de los motores del canard, wings 1 y wings 2, así como en los de crucero como medida de seguridad. Con esta información se procede a escoger una PEMFC de un catálogo comercial, siendo la elegida la Ballard FCveloCity – HD100 de 100 kW (Figura 3-13) que tiene las siguientes características observadas en la Figura 3-12:

PRODUCT SPECIFICATIONS

	HD85	HD100
Performance		
Net power	85 kW	100 kW
Operating voltage range	260 - 419 V	357 - 577 V
Operating current range	10 - 284 A	10 - 257 A
Idle power	4 kW	6 kW
Physical		
Fuel cell module		
Dimensions (l x w x h) mm	1130 x 869 x 487	1200 x 869 x 487
Weight	256 kg	280w kg
Coolant Subsystem		
Dimensions (l x w x h) mm	737 x 529 x 379	
Weight	44 kg	
Air Subsystem		
Dimensions (l x w x h) mm	676 x 418 x 352	
Weight	61 kg	
Reactants and Coolant		
Type	Gaseous hydrogen	
Composition	As per SAE specification J2719	
Supply pressure	8 barg nominal	
Oxidant	Air	
Coolant	50/50 pure ethylene glycol and deionized water WEG 60° to 70°C	
Safety Compliance		
Certifications	ISO 6469-2:2009 ¹ ISO 6469-3:201 ¹ ISO 23273:2013 ¹	
Enclosure	IP55	
Monitoring		
Control interface	CANbus	
Emissions		
Exhaust	Zero-emissions (no PM, NOx, SOx, CO or CO2)	
¹ Specific clauses within each standards		

Figura 3-12 - Especificaciones Ballard FCveloCity HD100 [24].

Algunas de las características clave de esta célula son [25]:

- **Coste de ciclo de vida bajo:** Bajo coste de propiedad conseguido a través de la optimización de rendimiento, la durabilidad de la pila de combustible, la eficiencia y los menores requisitos de mantenimiento.
- **Integración simplificada del sistema:** Módulo de pila de combustible de dimensiones reducidas, totalmente integrado, con interfaces situadas en un panel para un mejor acceso y flexibilidad en el diseño de vehículos comerciales.
- **Alto rendimiento:** La humidificación del sistema y la optimización de la presión integradas ofrecen un rendimiento, eficiencia del combustible y durabilidad superior en un amplio rango de condiciones de funcionamiento y

evitan la degradación, entregando una disponibilidad de >97% en funcionamiento de vehículos.

- **Rendimiento en condiciones extremas:** tolerante a una amplia gama de condiciones de funcionamiento, incluido el arranque en frío desde -25°C sin energía externa.
- **Liderazgo tecnológico:** La opción preferida por los fabricantes e integradores de sistemas, las pilas de combustible Ballard están alimentando más de 3.000 autobuses y camiones de pila de combustible. De forma acumulada, estos vehículos han recorrido más de 100 millones de kilómetros.

Las certificaciones que posee esta PEMFC son ISO 6469-2:2009 1, ISO 6469-3:2011 1 e ISO 23273:201, además de una protección frente a agua y polvo certificada IP55, lo que significa que puede aguantar que entre algo de polvo sin que sea lo suficientemente grande como para interferir en el funcionamiento del dispositivo y que aguanta chorros de agua lanzados desde cualquier ángulo con una boquilla de 6,3 mm de diámetro, a un promedio de 12,5 litros por minuto desde una distancia de al menos 3 metros durante un mínimo de 3 minutos a una presión de 30 kN/m².



Figura 3-13 - Ballard FCveloCity HD100 [24].

3.5.1 Modelado matemático de la PEMFC

El modelado matemático expuesto a continuación se ha obtenido del TFG de Rodrigo Ruiz Marín [26].

Se creó un modelo matemático que definió el comportamiento del sistema de la pila de combustible, así como la potencia entregada, las pérdidas y el consumo de la aeronave.

Se divide en las siguientes partes:

- Voltaje teórico en circuito abierto: Se estudia cómo se lleva a cabo la conversión de energía química a eléctrica para saber cómo determinar la diferencia de potencial entre los electrodos de la celda. La tensión real que se produce en una pila de hidrógeno viene dada por la ecuación de Nernst (2-5):

$$E = -\frac{\Delta G}{2F} - \frac{RT}{2F} * \ln \left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} * P_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (3-5)$$

- Pérdidas por activación: Producidas por la velocidad de las reacciones que toman lugar en la superficie de los electrodos. Una parte del voltaje generado entre los electrodos de la célula se usa para llevar a cabo la reacción electroquímica que traspa electrones desde o hacia el electrodo. Para solucionar estas pérdidas se pueden utilizar diversos métodos:
 - Incrementar la temperatura de operación de la celda: Así la densidad de corriente de intercambio es mucho mayor, con lo que pasamos de 0,1 mA/cm² para temperaturas bajas a 100 mA/cm² cuando la temperatura es de 800 °C.
 - Usar catalizadores más efectivos.
 - Aumentando la concentración del reactivo: Usando oxígeno en vez de aire se reduce el problema de las pérdidas por activación.
 - Aumentando la rugosidad de los electrodos: Incrementando la superficie del electrodo, la densidad de corriente de intercambio es la misma, pero la corriente total será mayor.
 - Aumentando la presión.

- Pérdidas óhmicas: Asociadas a la resistencia de los electrodos y la resistencia al flujo de iones a través del electrolito, siguiendo la ley de Ohm. Para reducir las pérdidas óhmicas se toman medidas como:
 - Utilizar electrolitos con la mayor conductividad posible.
 - Hacer el electrolito lo más estrecho posible, aunque puede ser complicado por una cuestión de resistencia o por que la densidad de corriente sea elevada en ese punto.
- Pérdidas por concentración: Las pérdidas por concentración se deben a la reducción en la concentración de oxígeno en el entorno del electrodo, necesario para llevar a cabo la reacción electroquímica. Cuando la densidad de corriente aumenta, comienzan a surgir problemas para que el aire circundante al electrodo pueda aportar el oxígeno necesario para mantener esa demanda de corriente en la reacción, ya que disminuye su presión parcial.

La forma de realizar los cálculos fue:

1. Modelado en Octave el funcionamiento de una PEMFC de 100 kW.
2. Extracción de datos de tensión, potencia, consumo de hidrógeno y consumo de aire en función de la densidad de corriente generada.
3. Guardar esos datos asociados a la PEMFC de 100 kW.
4. Crear un programa en Octave que abre los datos de la PEMFC de 100 kW e interpola la potencia requerida en la misión de vuelo del ZATA y obtiene el consumo en cada instante de la misión.
5. Calcular el consumo medio y total de la aeronave.
6. Determinar el volumen del depósito de combustible en función de los datos de consumo que se han obtenido con la simulación.

La corriente generada y el consumo de hidrógeno y de oxígeno se relacionan de la siguiente manera:

$$O_2 = \frac{32 * 10^{-3} * I}{0,21 * 4 * F} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (3-6)$$

$$H_2 = \frac{2,02 * 10^{-3} * I}{2 * F} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (3-7)$$

Así se obtiene que el consumo medio del ZATA durante la misión es el reflejado en la Figura 3-14:

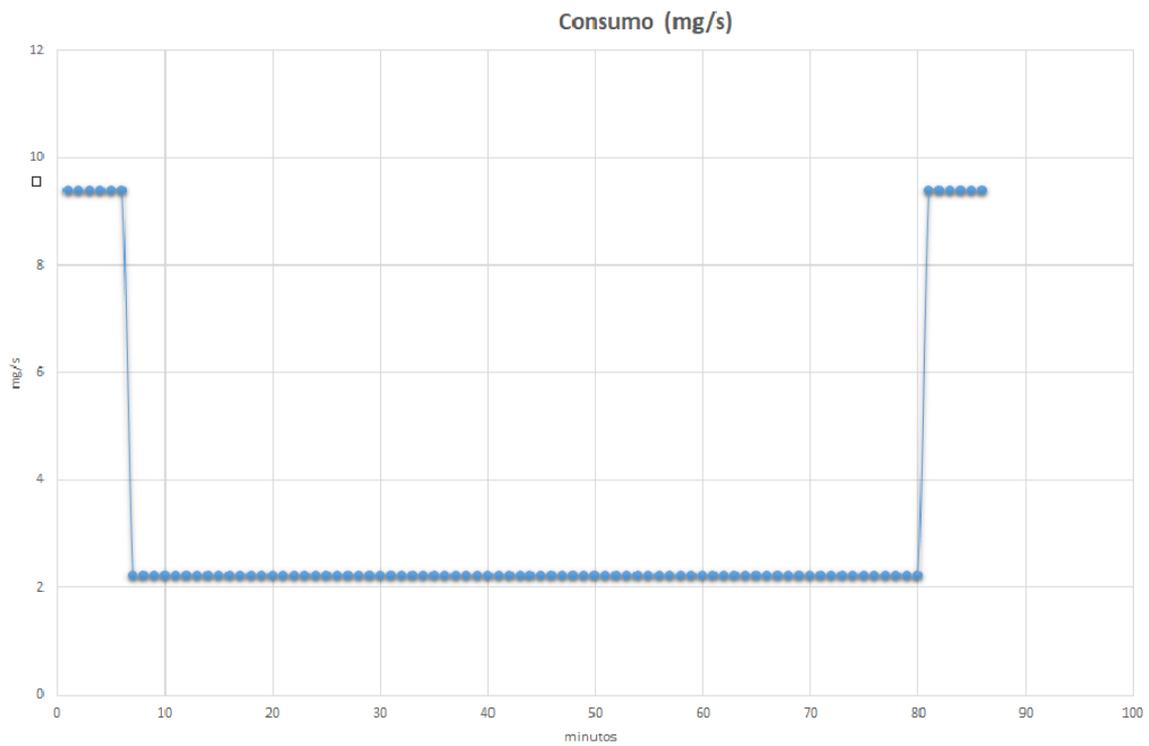


Figura 3-14 - Consumo medio de hidrógeno del ZATA en mg/s durante la misión.

Y el consumo total de la aeronave en la misión queda ilustrado en la Figura 3-15:

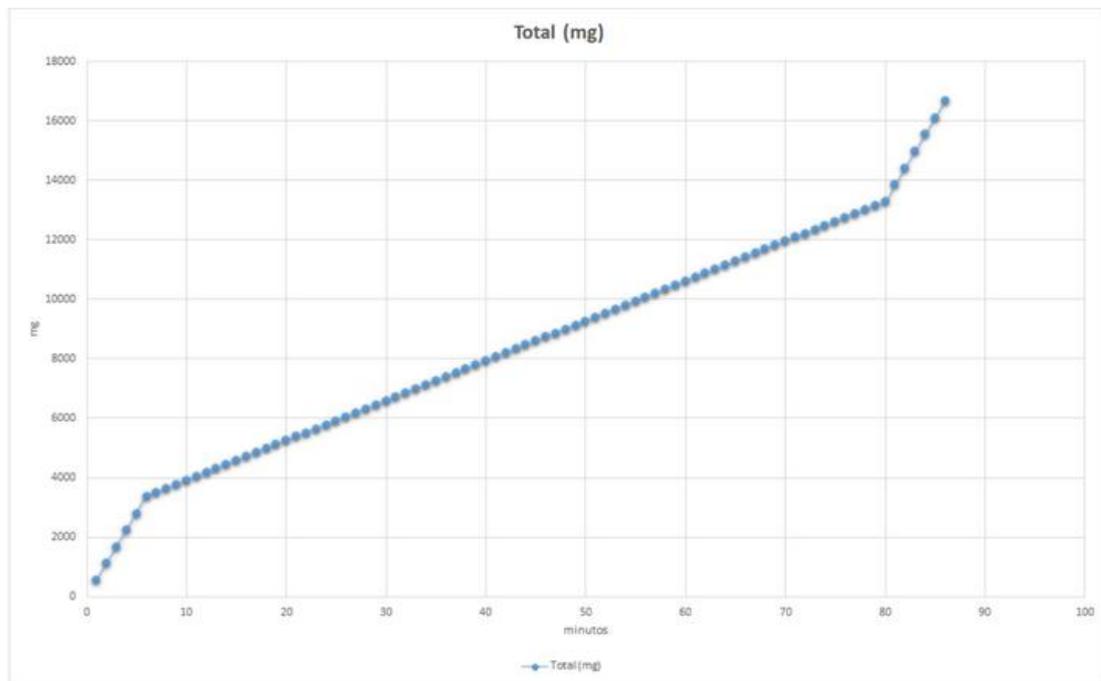


Figura 3-15 - Consumo total de hidrógeno en mg respecto al tiempo del ZATA.

Como se puede observar, las pendientes en el gráfico de consumo total se corresponden con el consumo medio en cada fase. De esta manera obtenemos la siguiente tabla con los consumos de cada PEMFC durante la misión:

Tabla 3-5- Consumo de las PEMFC del ZATA durante la misión.

	Despegue y aterrizaje					Crucero				
	PEMFC 1	PEMFC 2	PEMFC 3	PEMFC 4	PEMFC 5	PEMFC 1	PEMFC 2	PEMFC 3	PEMFC 4	PEMFC 5
Potencia (kW)	68	68	96	64	64	*	*	*	45	45
Consumo Medio (mg/s)	1,751	1,751	2,610	1,637	1,637	*	*	*	1,117	1,117
Consumo total (mg)	1260,9	1260,9	1879,3	1178,9	1178,9	*	*	*	4916,6	4916,6
Consumo medio op (mg/s)	9,387					2,235				

Con estos datos obtenemos el consumo total y medio de la aeronave durante la misión:

Tabla 3-6- Consumo total y medio del ZATA en la misión

	Datos de la operación
Consumo total	16,59
Consumo medio	3,241

4 Sistema Interior

Una vez esclarecidos los datos básicos, pasamos al desarrollo de la solución que planteamos para la automatización del problema de la recarga de hidrógeno en el ZATA, de forma que sea automática, rápida y segura, utilizando un método de cambio de depósitos. Para ello, en este trabajo nos centraremos más en el sistema interior que se utilizará en el intercambio de los depósitos vacíos por los llenos.

4.1 Depósitos

Teniendo en cuenta lo expuesto en el estado del arte, se procede a dimensionar los tanques de almacenamiento necesarios.

Tabla 4-1- Dimensionamiento de los tanques de hidrógeno del ZATA

Diseño de los depósitos de H ₂		
Ley de los gases ideales		Unidades
Presión	789,53	atm
Moles H ₂	8296,07	mol
Temperatura	298	K
R	0,082057	$\frac{L * atm}{K * mol}$
Coefficiente de seguridad	1	
N.º de viajes	1	uds
Volumen	256,94	L

Para el almacenamiento utilizaremos tanques de Tipo IV ya que permiten almacenar el hidrógeno tanto a 350 como a 700 bar, pudiendo así llevar más cantidad en el mismo volumen si lo utilizamos a 700 bar.

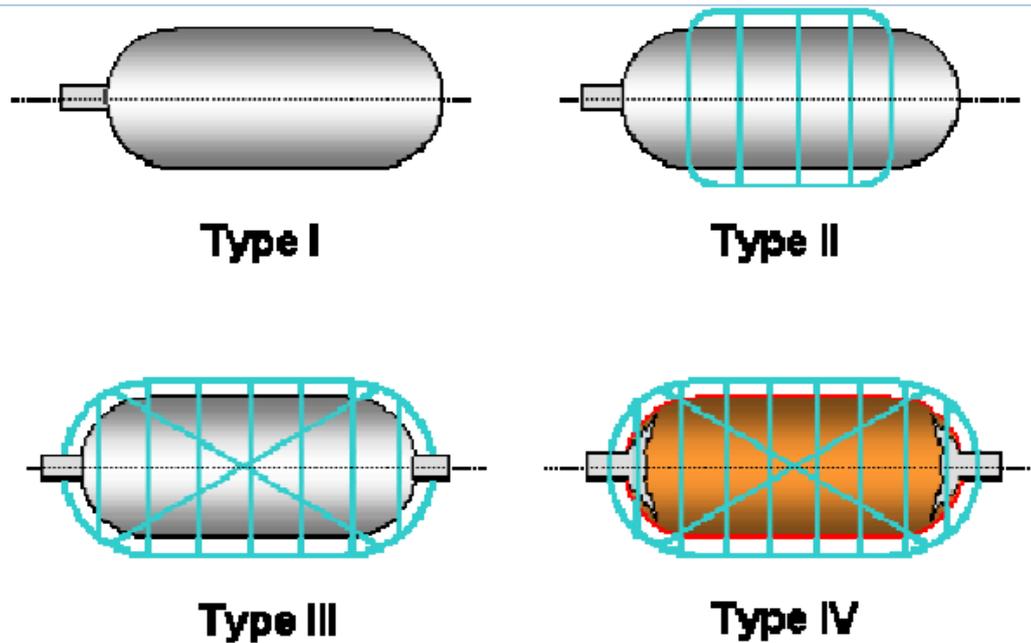


Figura 4-1 - Esquema sencillo comparativo de los tipos de tanques de posibles a utilizar [27].

Como se puede observar en la Figura 4-1, los depósitos de Tipo IV son los más reforzados y que aguantan más tensión.

Uno de los principales problemas que nos encontramos es que no hay depósitos de tipo IV del tamaño necesario para llevar todo el hidrógeno en un solo tanque, por lo que habrá que dividirlo en varios.

Se ha decidido utilizar los depósitos tipo IV de la empresa Steelhead Composites, actualmente ofrecen varios diámetros para depósitos de este tipo, pudiendo variar la longitud del cilindro y así su volumen y por ello capacidad:

	COPV Type	Outside Diameter (mm)	Minimum Size				Maximum Size			
			Length (mm)	Vessel Mass (kg)	Water Volume (L)	Hydrogen Capacity (kg)	Length (mm)	Vessel Mass (kg)	Water Volume (L)	Hydrogen Capacity (kg)
350 BAR	III	125	450	3	4	0.1	2,500	14	22	0.5
	III	280	760	17	28	0.6	2,600	58	125	2.9
	III	330	850	23	40	0.9	2,600	75	165	3.8
	III	425	880	49	80	1.8	2,600	132	270	6.2
	IV	170	735	8	9.5	0.2	1,750	17	26	0.6
	IV	340	830	23	43	1.0	2,100	65	132	3.0
	IV	490	920	53	112	2.6	2,100	110	290	6.7
500 BAR	III	129	574	3	19	0.58	2,500	14	22	0.5
	III	170	955	4	38	1.2	2,500	22	40	0.9
	III	300	1,316	17	57	1.8	2,600	58	125	2.9
	III	432	2,071	49	95	2.9	2,600	132	270	6.2
	IV	170	735	9.3	9	0.3	1,750	21	26	0.8
	IV	340	830	29	45	1.4	2,100	70	130	4.0
	IV	505	920	81	112	3.5	2,100	150	300	9.3
700 BAR	III	133	908.8	3	19	0.7	2,500	14	22	0.9
	III	177	990.6	4	38	1.5	2,500	22	40	1.56
	III	312	1,092.9	17	57	2.2	2,600	58	125	4.9
	III	356	1,690	23	76	3.0	2,600	75	165	6.4
	III	455	2,071	49	95	3.7	2,600	132	270	10.5
	IV	170	735	10	9	0.4	1,750	24	26	1.0
	IV	410	860	50	63	2.4	2,100	118	180	7.0

Figura 4-2 - Características de los tanques tipo IV de Steelhead Composites según su presión.

En la Figura 4-2 se puede observar todas las variantes que Steelhead Composites ofrece.

Dado que para las PEMFC 4 y 5 son para las que más hidrógeno necesitamos, 6,1 kg para cada una, estas llevarán un depósito un depósito propio respectivamente. Con los datos obtenidos del fabricante, resulta en tanques de 1857,39 mm de largo, 410 mm de diámetro, 104,69 kg de masa del tanque en vacío y 157,1 L de volumen. Dado que las medidas de tanques existentes no se adecúan a las medidas para las otras 3 PEMFC individualmente, usaremos solo un depósito para las 3, quedando éste de 4,4011 kg, por lo que las medidas serían: 1399,43 mm de largo, 410 mm de diámetro, 79,58 kg la masa del tanque vacío, y un volumen de 113,9 L.

Habiéndolas dibujado en el CAD Inventor de Autodesk, quedaría algo similar a las Figuras 4-3, 4-4 y 4-5:

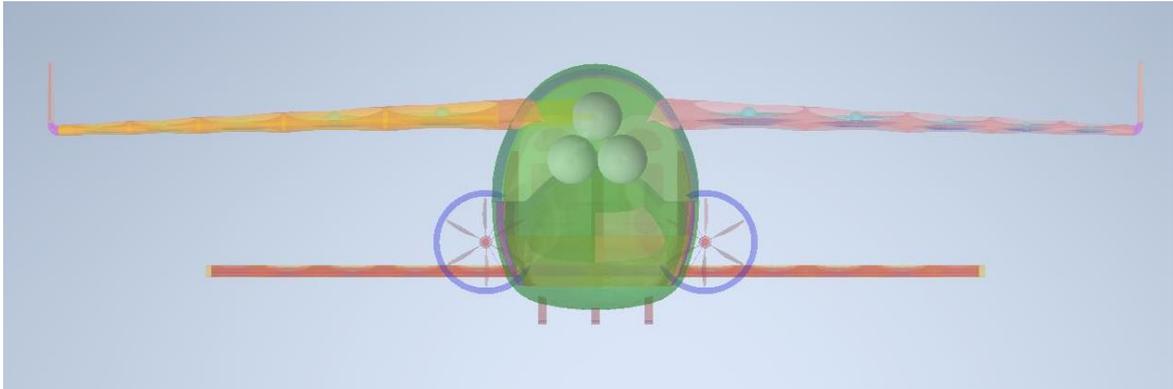


Figura 4-3 - Alzado del ZATA con los tanques en el interior.

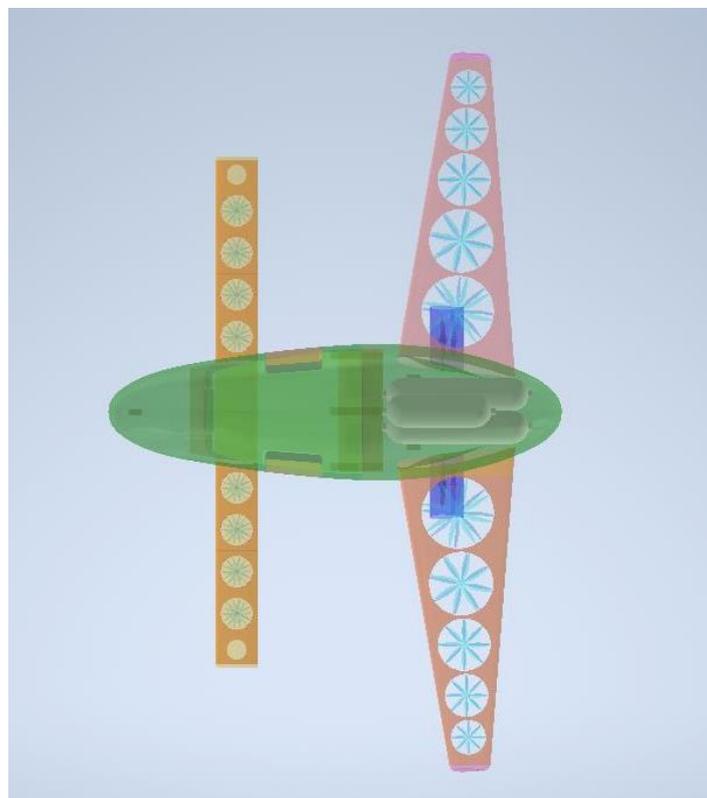


Figura 4-4 - Planta del ZATA con los tanques en el interior.

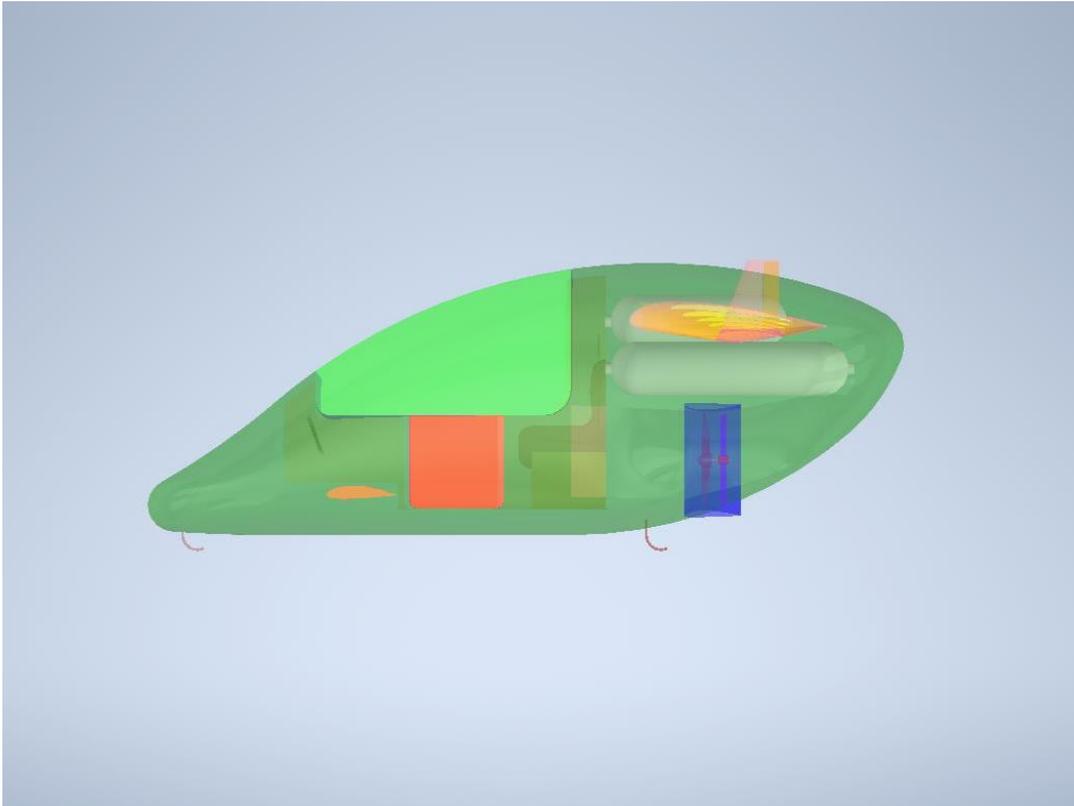


Figura 4-5 - Perfil del ZATA con los tanques en el interior.

4.2 Válvulas

Las válvulas de conexión y regulación que vamos a utilizar son las OTV700 de la marca ROTAREX [28], que tienen las siguientes características:

- Peso: 1660 g.
- Presión de funcionamiento: hasta 700 bar.
- Diseño con alta resistencia a la corrosión.
- Diseño resistente a impactos.
- Reemplazo del solenoide posible bajo presión.
- Cumple con las normas ECE R134 (GTR13), EC79, HGV 3.1, HPRD 1.

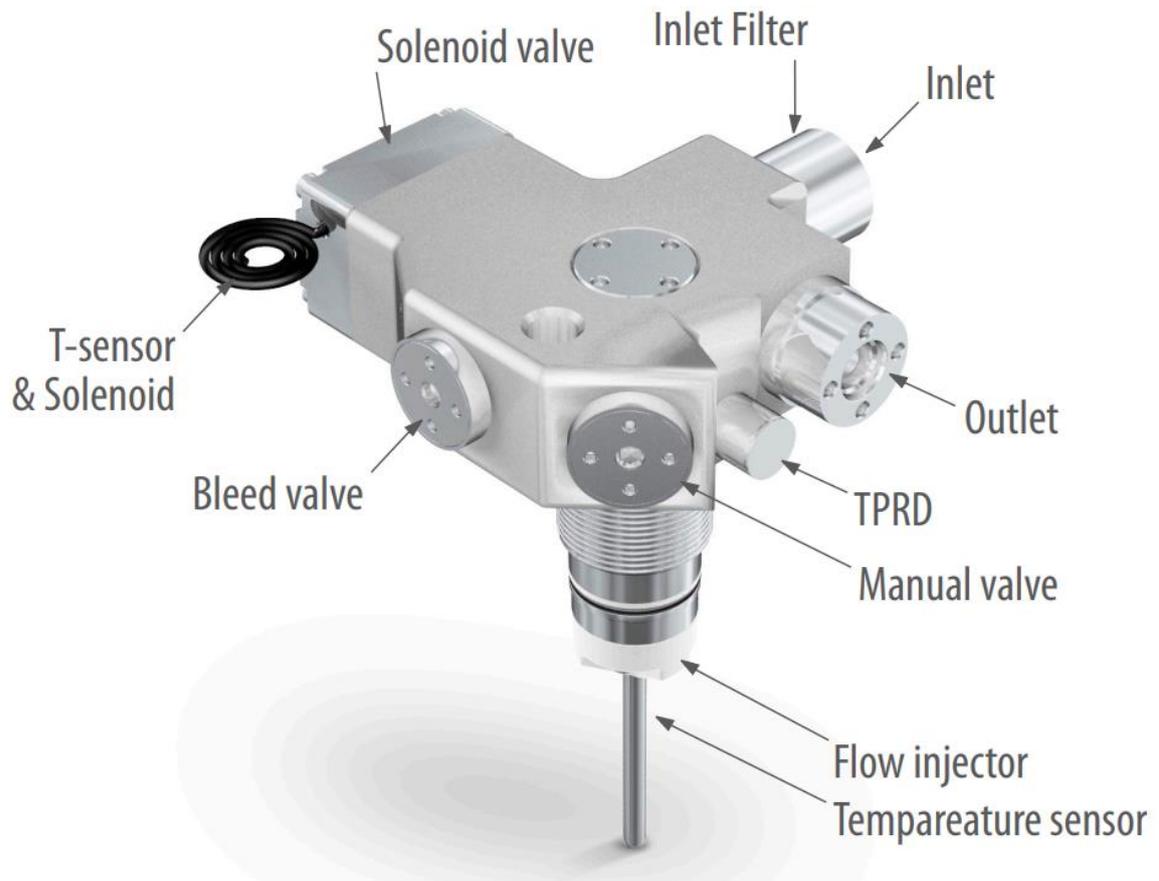


Figura 4-6 - Perspectiva de la válvula OTV700 de ROTAREX con sus partes indicadas [28].

EN la Figura 4-6 queda representada una renderización de la válvula OTV700 de ROTAREX, y en las Figuras 4-7 y 4-8, los planos de la planta y el perfil con las medidas en milímetros.

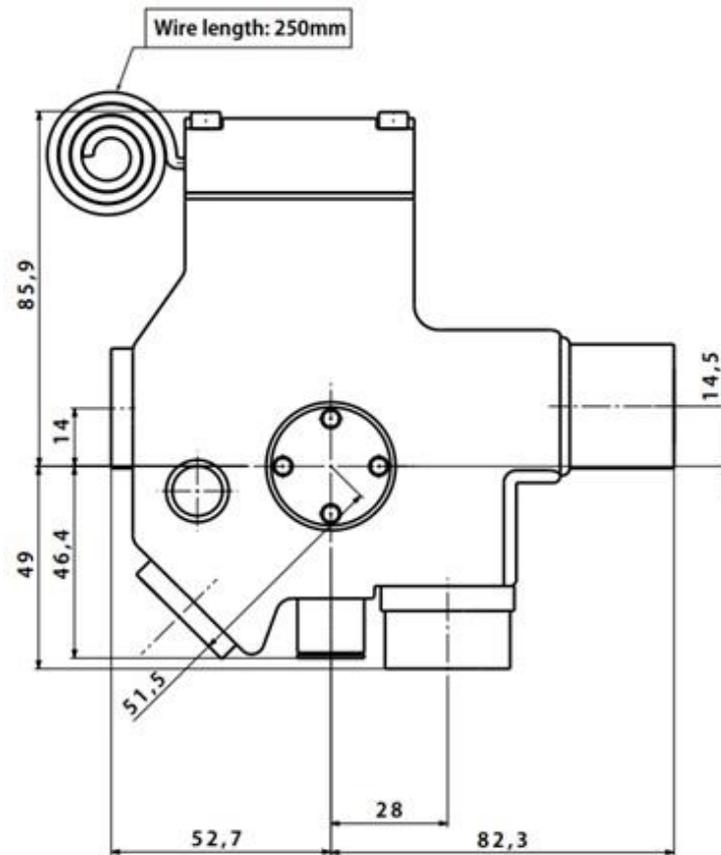


Figura 4-7 - Plano de la planta de la válvula OTV700 de ROTAREX [28].

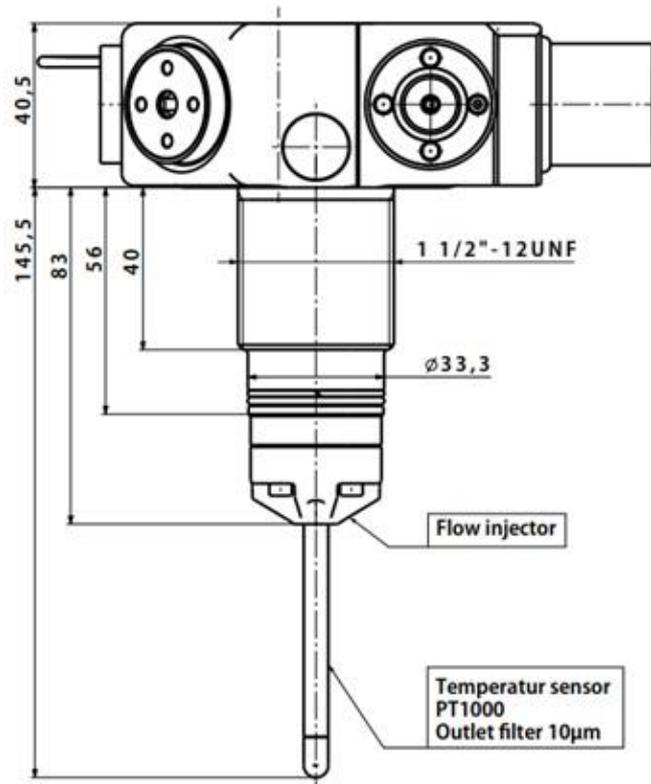


Figura 4-8 - Plano del perfil de la válvula OTV700 de ROTAREX [28].

La conexión con el tanque es 1/2"-12 UNF y con la entrada y salida de flujo 9/16-18 UNF con certificación SAE J1926-1 -6, aunque es posible cambiar estas últimas bajo petición.

El filtro equipado es de acero inoxidable con una malla de 10 μm , y la válvula solenoide es integrada de 12 voltios de corriente continua (24 voltios opcional) y una bobina de pico y retención de 36W/4W.

Las válvulas irán solidarias con el tanque ya que éstas permiten el relleno y el vaciado del mismo. En el caso del tanque que provee flujo de hidrógeno a las PEMFC 1, 2 y 3, se acoplará un divisor de flujo antes de llegar a las células.

4.3 Mangueras

Las mangueras de conexión entre los tanques y la célula de combustible que vamos a utilizar son las 2440P-04V32 de Parker [29], diseñadas para alta exigencia de abastecimiento de hidrógeno a alta presión. Tienen la certificación ISO/FDIS 19880-5 de tipo H70, por lo que soportan 700 bar, haciéndolas ideales para nuestro propósito.

En la Figura 4-9, se puede observar una imagen real de la Manguera 2440P-04V32 de Parker y en la Figura 4-10, una vista interior renderizada de la misma manguera, quedando expuestas las capas que tiene.



Figura 4-9 - Manguera 2440P-04V32 de Parker [29].



Figura 4-10 - Vista del interior de la manguera 2440P-04V32 de Parker y sus partes [29].

Tiene las siguientes características principales:

Tabla 4-2- Características principales de la manguera 2440P-04V32 de Parker [29].

Peso	0.33 kg/m
Material del tubo interior de la manguera	Polymer (P)
Material de la cubierta	Polyamide (PA)
Material de refuerzo de la manguera	Steel wire
Temperatura máxima de funcionamiento	85 °C
Temperatura mínima de funcionamiento	-40 °C
Diámetro exterior de la manguera	13 mm
Diámetro interior de la manguera	6.4 mm
Presión de trabajo máxima	1035 bar
Radio de curvatura mínimo	150 mm

4.4 Conexión manguera-válvula

Dado que la válvula y el tanque permanecen unidos, para el cambio de tanques se han de liberar las conexiones de la válvula con la manguera.

Para que este proceso se automatice, se ha decidido hacer con un tornillo sin fin y una corona, siendo la corona la propia rosca de la válvula para desenroscar la conexión entre las mangueras y las válvulas.

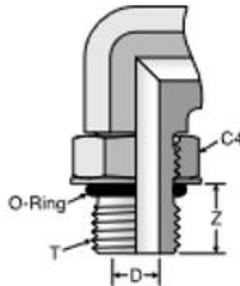
De esta manera, habría que adaptar las roscas 9/16-18 UNF de forma que, en el exterior, en lugar de tener la forma hexagonal estándar, tenga forma de corona dentada para que pueda el tornillo sin fin enroscar y desenroscar.

Para accionar el tornillo se utilizará un motor eléctrico alimentado por las propias baterías de la aeronave, y el sistema al completo irá contenido en ella.

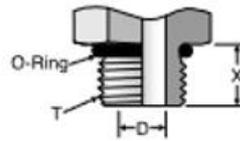
Del catálogo 4300 de Parker [30] (Fabricante) obtenemos las especificaciones de la rosca 9/16-18 UNF SAE J1926-1, tal y como las encontramos en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3-Tabla de especificaciones de la rosca [30].

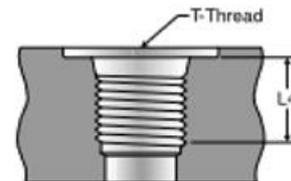
Port Ends for SAE J1926-1 (ISO 11926-1) Port



SAE J1926
Adjustable



SAE J1926
Nonadjustable



SAE J1926-1
Port²⁾

	Thread	Locknut Hex	Drill	Minimum Thread	Stud Length	
SIZE	T UN/UNF	C4 (inch)	D Ref. (inch)	L4 Min (inch)	X (inch)	Z Max (inch)
LIGHT DUTY (TRIPLE-LOK, FERULOK, ADAPTERS)						
2	5/16-24	7/16	0.063	0.390	0.297	0.36
3	3/8-24	1/2	0.126	0.390	0.297	0.33
4	7/16-20	9/16	0.177	0.454	0.360	0.39
5	1/2-20	5/8	0.236	0.454	0.360	0.43
6	9/16-18	11/16	0.295	0.500	0.391	0.43
8	3/4-16	7/8	0.394	0.562	0.438	0.49
10	7/8-14	1	0.492	0.656	0.500	0.56
12	1 1/16-12	1 1/4	0.610	0.750	0.594	0.65
14	1 3/16-12	1 3/8	0.709	0.750	0.594	0.65
16	1 5/16-12	1 1/2	0.846	0.750	0.594	0.65
20	1 5/8-12	1 7/8	1.083	0.750	0.594	0.65
24	1 7/8-12	2 1/8	1.319	0.750	0.594	0.65
32	2 1/2-12	2 3/4	1.772	0.750	0.594	0.59
HEAVY DUTY (SEAL-LOK)						
2	5/16-24	1/2	0.063	0.390	0.374	0.38
3	3/8-24	9/16	0.118	0.390	0.374	0.39
4	7/16-20	5/8	0.177	0.454	0.433	0.43
5	1/2-20	11/16	0.236	0.454	0.433	0.44
6	9/16-18	3/4	0.264	0.500	0.472	0.47
8	3/4-16	15/16	0.378	0.562	0.551	0.54
10	7/8-14	1 1/16	0.484	0.656	0.630	0.63
12	1 1/16-12	1 3/8	0.610	0.750	0.728	0.73
14	1 3/16-12	1 1/2	0.709	0.750	0.728	0.73
16	1 5/16-12	1 5/8	0.811	0.750	0.728	0.73
20	1 5/8-12	1 7/8	1.024	0.750	0.728	0.73
24	1 7/8-12	2 1/8	1.260	0.750	0.728	0.73
32	2 1/2-12	2 3/4	1.575	0.750	0.728	0.73

Y del mismo catálogo obtenemos el par de apriete necesario según la norma que sigue:

Tabla 4-4- Tabla indicadora del par de apriete de la rosca del catálogo 4300 de Parker [30].

SAE Straight Thread Port Assembly (SAE J1926)

SAE Dash Size	Thread Size UN/UNF	Assembly Torque (+10% -0)											
		Non-Adjustables				Adjustables				Plugs			
		Seal-Lok (Heavy Duty SAE J1926-2)		Triple-Lok Ferulok Adapters (Light Duty SAE J1926-3)		Seal-Lok (Heavy Duty SAE J1926-2)		Triple-Lok Ferulok Adapters (Light Duty SAE J1926-3)		Hollow Hex HP5ON-S (Light Duty SAE J1926-3)		Hex Head P5ON-S (Light Duty SAE J1926-3)	
		ft.lbs. (in. lbs)	N-m	ft.lbs. (in. lbs)	N-m	ft.lbs. (in. lbs)	N-m	ft.lbs. (in. lbs)	N-m	ft.lbs. (in. lbs)	N-m	ft.lbs. (in. lbs)	N-m
2	5/16-24	—	—	(85)	10	—	—	(60)	7	(60)	7	(85)	10
3	3/8-24	—	—	(155)	18	—	—	(100)	11	(100)	11	(155)	18
4	7/16-20	(310)	35	(260)	29	(180)	20	(180)	20	(180)	20	(260)	29
5	1/2-20	(360)	41	(280)	32	(360)	41	(250)	28	(250)	28	(280)	32
6	9/16-18	(420)	47	(350)	40	(420)	47	(350)	40	(350)	40	(350)	40
8	3/4-16	(720)	81	(620)	70	(720)	81	(620)	70	(620)	70	(620)	70
10	7/8-14	100	136	85	115	100	136	85	115	85	115	85	115
12	1 1/16-12	135	183	135	183	135	183	135	183	135	183	135	183
14	1 3/16-12	175	237	175	237	175	237	175	237	175	237	175	237
16	1 5/16-12	200	271	200	271	200	271	200	271	200	271	200	271
20	1 5/8-12	250	339	250	339	250	339	250	339	250	339	250	339
24	1 7/8-12	305	414	305	414	305	414	305	414	305	414	305	414
32	2 1/2-12	375	508	375	508	375	508	375	508	375	508	375	508

Con estos datos podemos calcular el sistema tornillo sin fin corona necesario para nuestro objetivo. Partiendo de un par necesario de apriete de 47 Nm para la rosca, se buscó entre catálogos de fabricantes de sistemas de tornillo sin fin-corona uno que soportara ese par en la salida, llegando al catálogo de Framo Morat (Franz Morat Group), donde encontramos la pieza número A50U6 [31], con un par de salida permitido de 52 Nm, 62.4 Nm y 78 Nm en función del lubricante que se utilice (grasa mineral, aceite mineral/grasa sintética o aceite sintético respetivamente), lo que nos ofrece una variedad de lubricantes a utilizar siempre cumpliendo el requisito de 47 Nm de salida necesarios para el sellado de la tubería.

Con los datos ofrecidos por el fabricante y las siguientes fórmulas obtenidas del libro diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley [32] calcularemos todas las dimensiones del tornillo sin fin y de la corona siendo:

$$M = 3.5 \quad (4-1)$$

$$N = 18 \quad (4-2)$$

$$n = 1 \quad (4-3)$$

Las fórmulas que utilizaremos para los cálculos del tornillo sin fin son los siguientes:

$$p = \pi * M = 11 \text{ mm} \quad (4-4)$$

$$h = 2,167 * M = 7.58 \text{ mm} \quad (4-5)$$

$$dp = 10 * M = 35 \text{ mm} \quad (4-6)$$

$$de = dp + (2 * M) = 42 \text{ mm} \quad (4-7)$$

$$d = de - (2 * h) = 26.83 \text{ mm} \quad (4-8)$$

$$\alpha = \frac{\arctg(M(n))}{dp} = 5.71^\circ \quad (4-9)$$

$$e = \frac{p}{2} = 5.5 \text{ mm} \quad (4-10)$$

$$c = \frac{p}{2} = 5.5 \text{ mm} \quad (4-11)$$

$$L = M = 3.5 \text{ mm} \quad (4-12)$$

$$l = 1,167 * M = 4.08 \text{ mm} \quad (4-13)$$

$$\beta = 20^\circ \text{ (paso reforzado)} \quad (4-14)$$

$$T = \left(P * \cotg \left(\frac{\beta}{4} \right) - l \right) * (2tg\beta) = 5.71^\circ \quad (4-15)$$

$$LR = P * \left(4,5 + \left(\frac{N}{50} \right) \right) = 53.44 \text{ mm} \quad (4-16)$$

$$f = P = 11 \text{ mm} \quad (4-17)$$

$$r = 0,05 * P = 0.55 \text{ mm} \quad (4-18)$$

$$\delta = 2 * \beta = 40^\circ \quad (4-19)$$

Y para la corona:

$$DP = M * N = 63.0 \text{ mm} \quad (4-20)$$

$$DE = DP + (2 * M) = 75.25 \text{ mm} \quad (4-21)$$

$$P = \pi * M = 11 \text{ mm} \quad (4-22)$$

$$H = 2,167 * M = 7.58 \text{ mm} \quad (4-23)$$

$$DE + (0,4775 * P) = 75.25 \text{ mm} \quad (4-24)$$

$$A = 6 + (2,38 * P) = 32.17 \text{ mm} \quad (4-25)$$

$$R = (0,5 * dp) - M = 14 \text{ mm} \quad (4-26)$$

$$r = 0,25 * P = 2.75 \text{ mm} \quad (4-27)$$

$$E = \frac{DP + dp}{2} = 49 \text{ mm} \quad (4-28)$$

Siendo las denominaciones anteriores las reflejadas en las Figuras 4-11, 4-12 y 4-13:

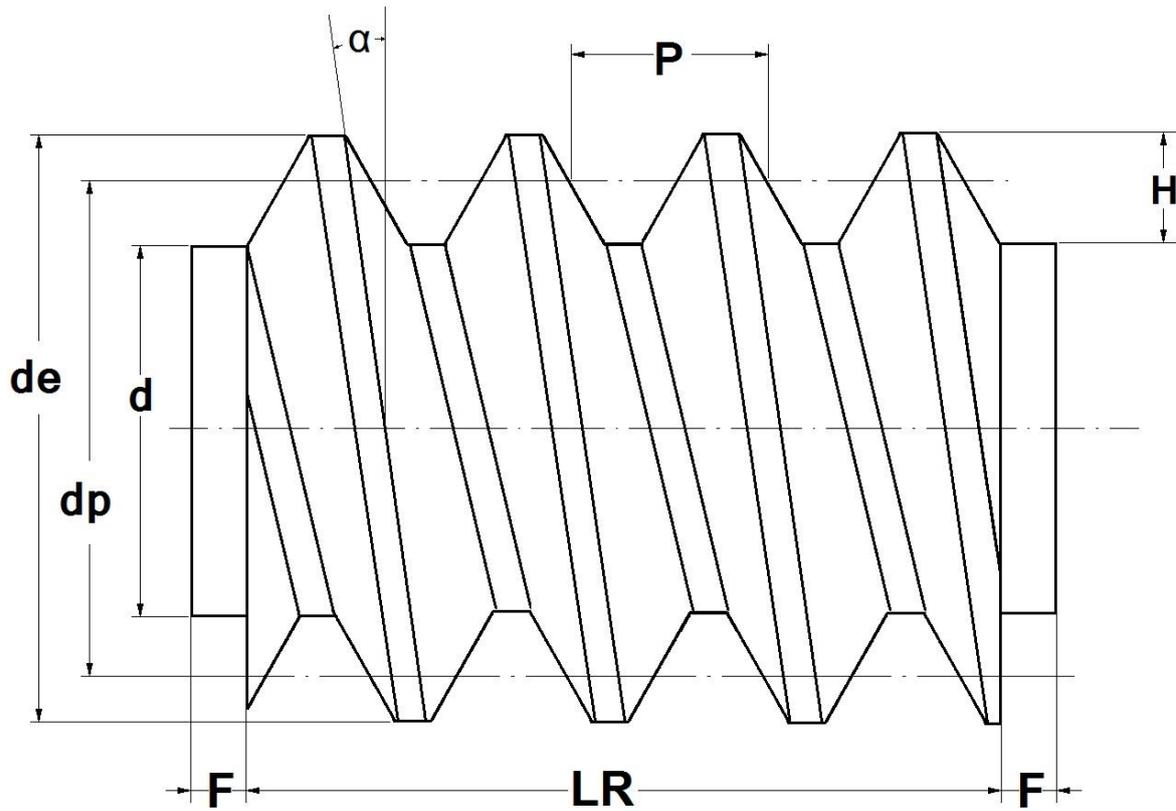


Figura 4-11 - Esquema de denominaciones en detalle de los elementos del tornillo sin fin [33].

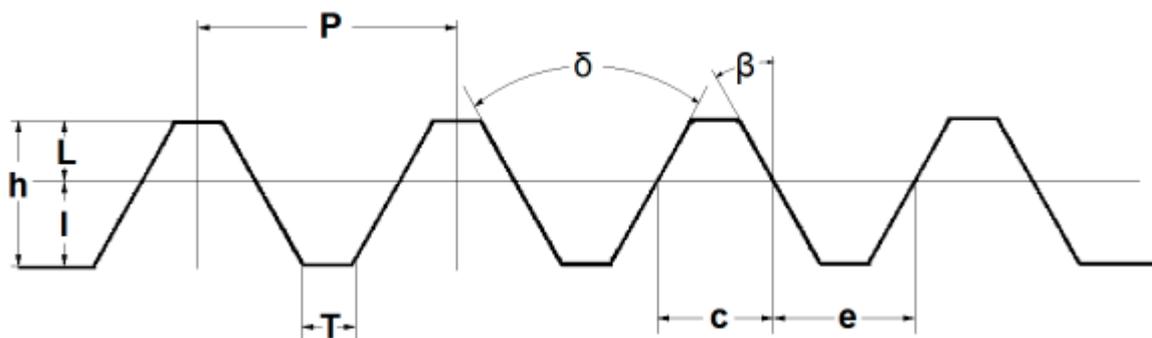


Figura 4-12 - Esquema de detalle de los elementos de la corona [33].

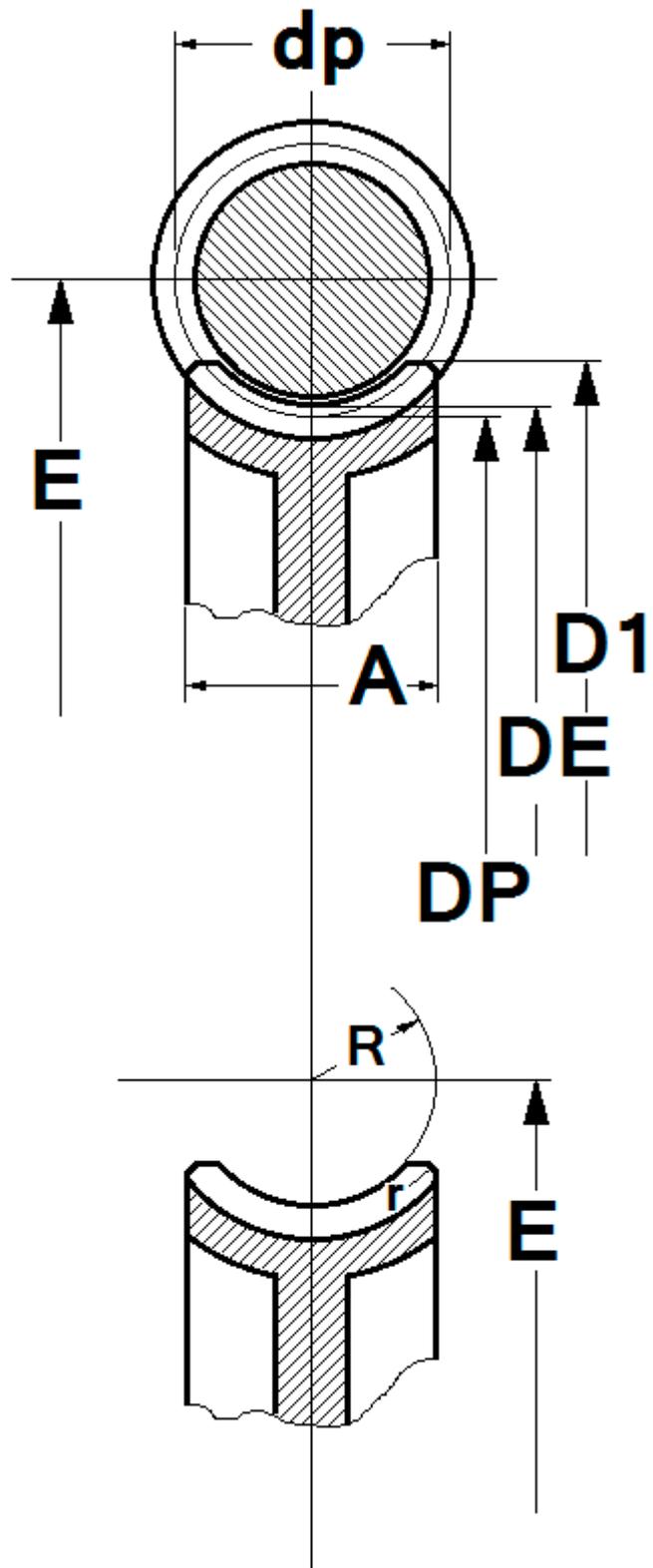


Figura 4-13 – Esquema de elementos en detalle del sistema tornillo sin fin-corona [33].

Con los cálculos hechos se procede al modelado en software *Inventor* y *Fusion 360* (ambos pertenecientes a Autodesk) del sistema, quedando la renderización de las Figuras 4-14, 4-15 y 4-16.

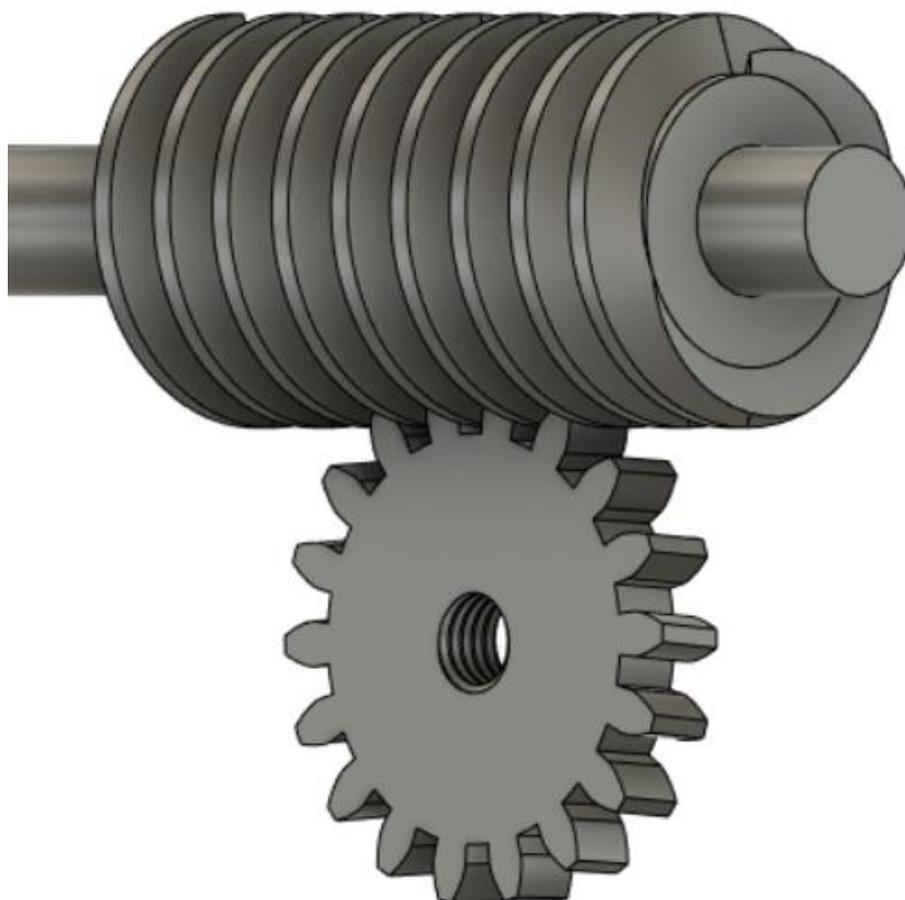


Figura 4-14 – Perspectiva del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.

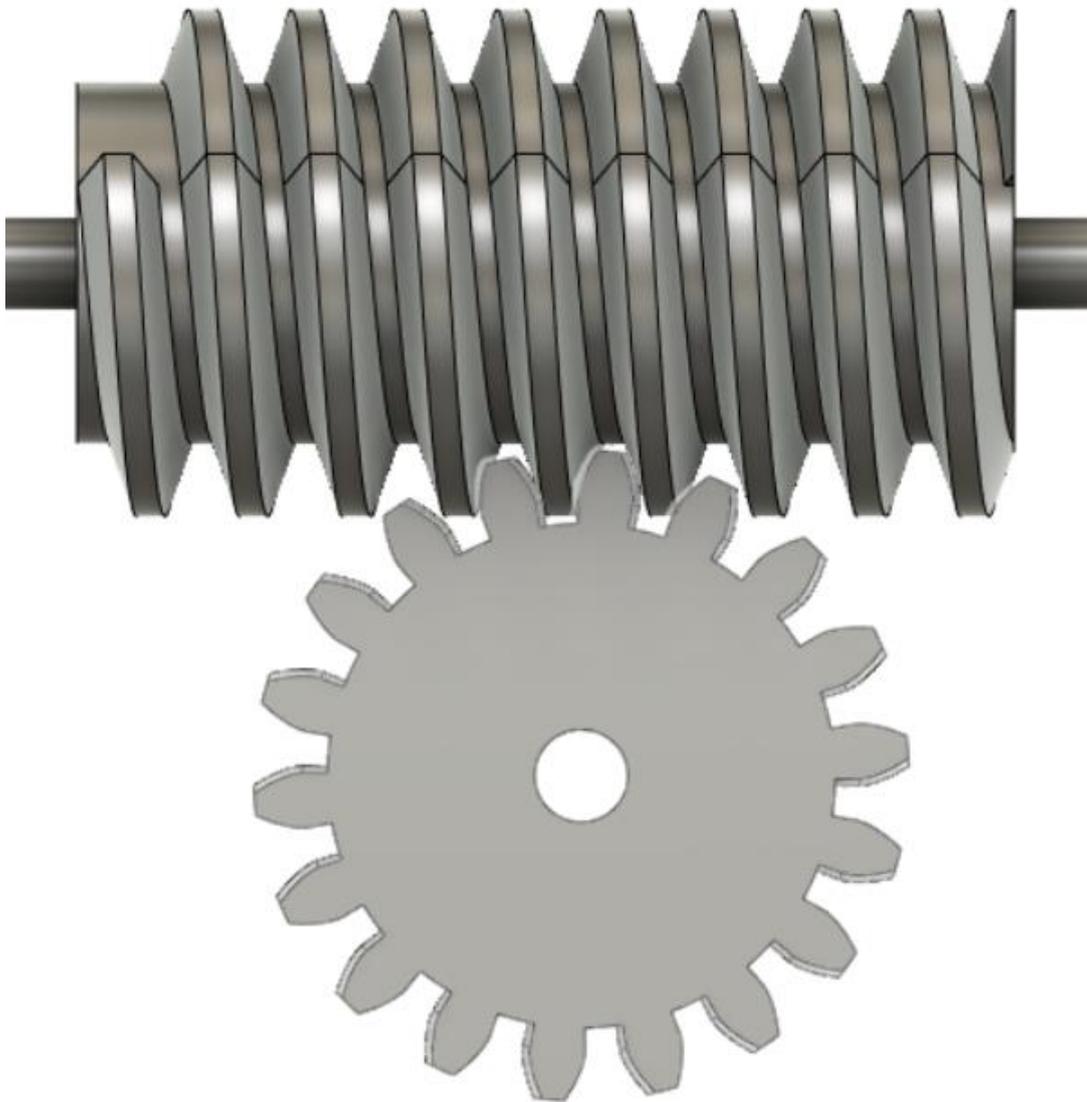


Figura 4-15 - Vista lateral del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.



Figura 4-16 – Perfil del sistema de tornillo sin fin - corona con rosca unificada en la corona.

5 Sistema exterior

Una vez diseñado el sistema interior, necesitaríamos un sistema exterior lo suficientemente compacto para caber en una población, que merezca la pena hacerlo y que además se pueda instalar de forma relativamente sencilla. Para ello nos hemos inspirado en los sistemas de cambios de baterías automatizados de los coches eléctricos en los que el coche llega a una estación de cambio de baterías, para en un lugar concreto y el sistema automáticamente saca la batería gastada e introduce una completamente cargada en el coche, como puede ser los sistemas diseñados por NIO y Aulton, que hacen que todo el proceso quede contenido en una región relativamente pequeña de espacio y en tiempo parecido al que se tardaría en repostar un coche con combustibles tradicionales.

De esta manera, se hace viable la posibilidad de seguir usando el vehículo eléctrico sin tener que esperar grandes tiempos de recarga de la batería, uno de los mayores problemas de este tipo de automóviles en la actualidad. El sistema se ha implantado una estación ya, como ha confirmado el director de comunicaciones de la marca NIO en Europa, Florian Otto [34].



Figura 5-1 – Estación de cambio de baterías de coches eléctricos NIO [35].

De esta manera, el ZATA llegaría a una estación de recarga de hidrógeno, aterrizando en un lugar en concreto gracias a su pilotaje autónomo. Una vez en posición un sistema automatizado se movería sobre unos raíles para llegar al ZATA, abriendo esta la compuerta donde se almacenan los tanques en la aeronave. El sistema atraparía las bombonas con abrazaderas, entrando en ese momento en acción el sistema de tornillo sin fin-corona para soltar los amarres de las mangueras que unen las bombonas a las PEMFC por el lado de la válvula, como se puede ver en la renderización simplificada de la Figura 5-2:

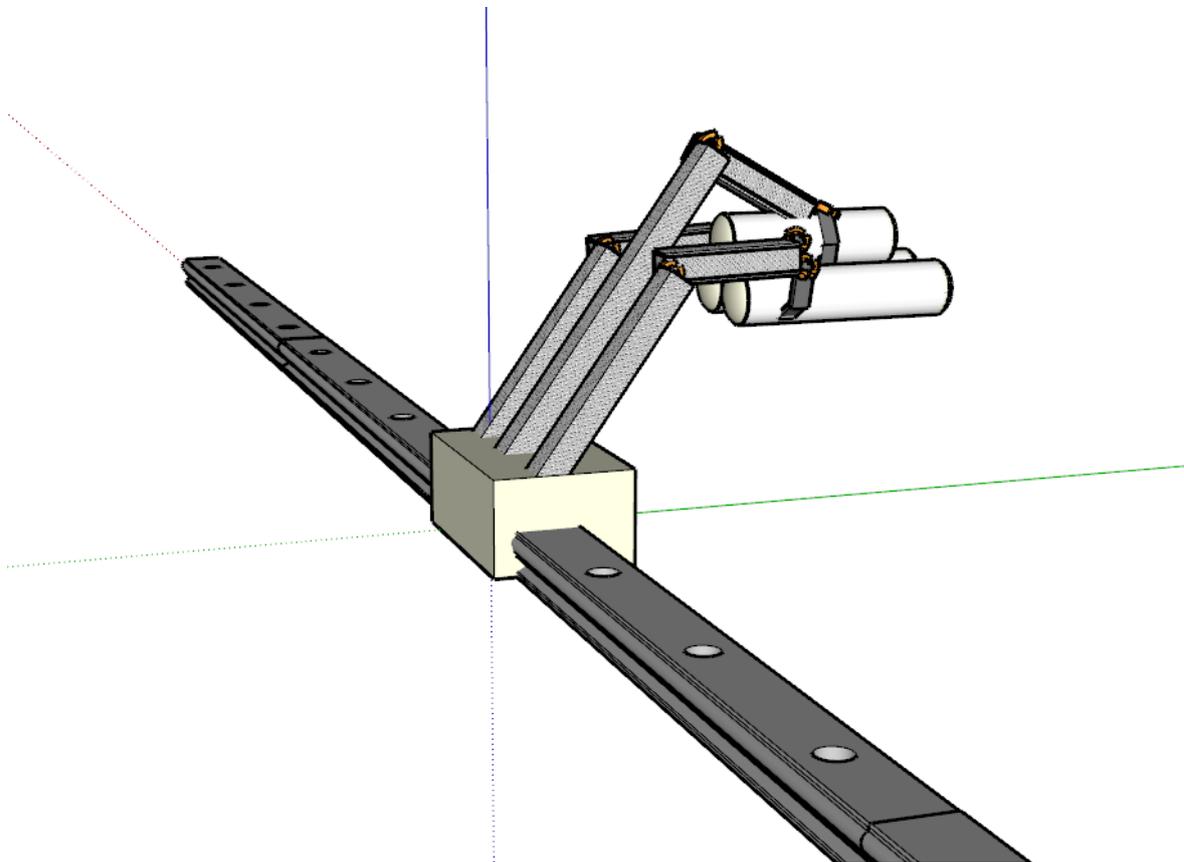


Figura 5-2 - Esquema simplificado del sistema de recarga de bombonas para el ZATA.

Una vez las tuercas han sido liberadas, el sistema puede retirar las bombonas vacías y llevarlas a un depósito de almacenaje, como se observa en la Figura 5-3.

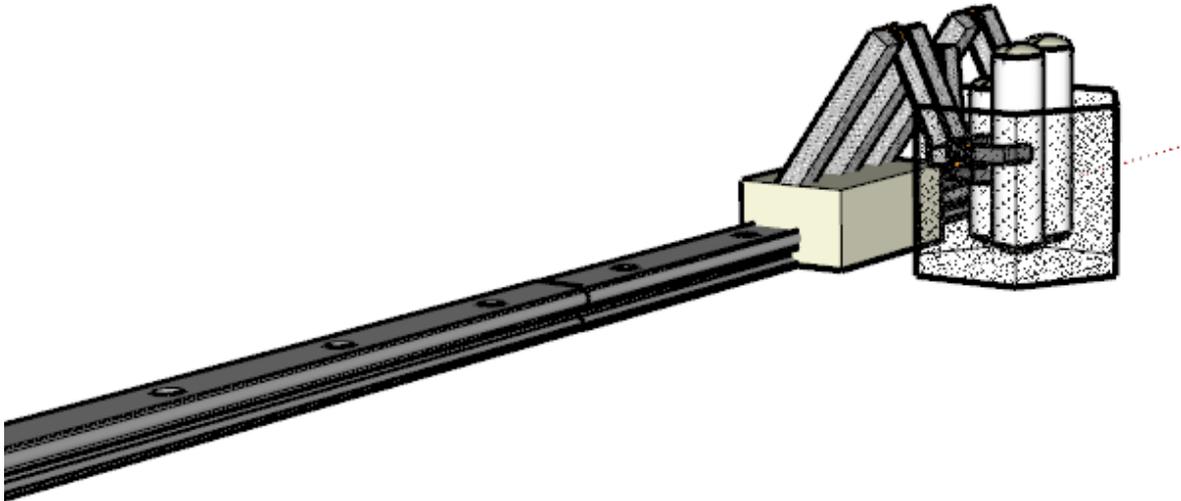


Figura 5-3– El sistema deposita las bombonas vacías en un depósito preparado para ello.

Tras el correcto almacenamiento de las bombonas vacías, el sistema automáticamente iría a un depósito con bombonas llenas para cogerlas y llevarlas a la aeronave para hacer el proceso inverso al descrito previamente, cogiendo las bombonas de un almacenaje. Estas bombonas llenas serían repuestas (con camiones, por ejemplo) cada X tiempo en función de las necesidades que se planteen, es decir, de la cantidad de vuelos y de aeronaves ZATA dependan de la estación concreta.

Una vez las bombonas se han repuesto y el sistema ha vuelto a su lugar, la aeronave está lista para continuar su misión.

Queda resumido el proceso completo de repostaje en la Figura 5-4:

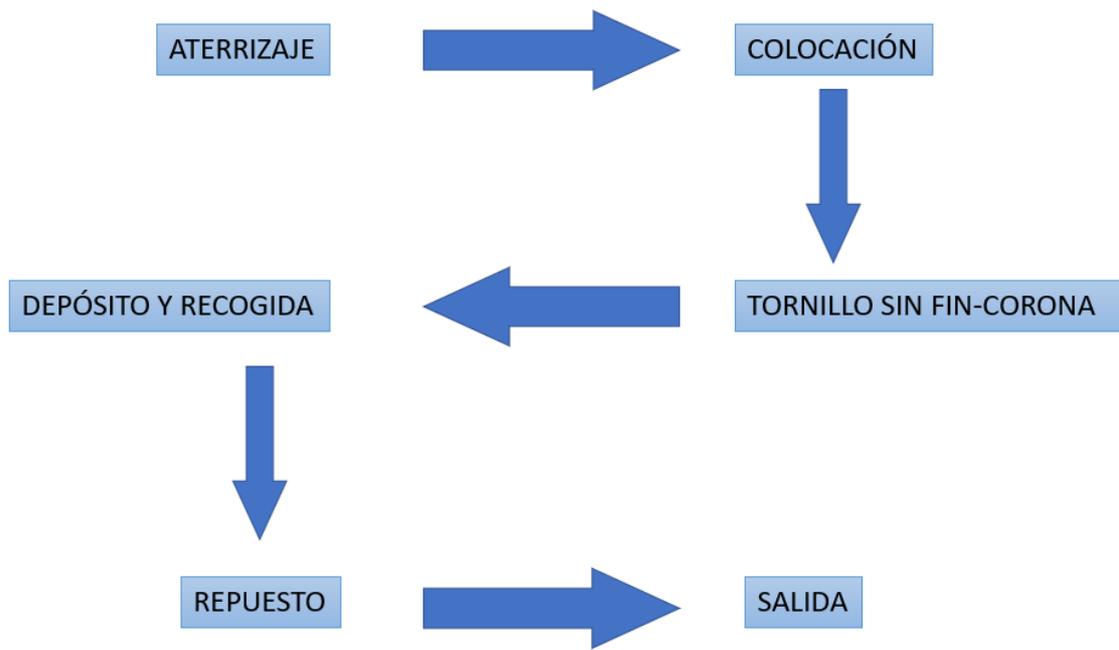


Figura 5-4 - Esquema de recarga de la aeronave ZATA.

6 Ventajas e inconvenientes frente a otros métodos

El método alternativo para dar solución al problema que viene más rápidamente a la cabeza podría ser el rellenado de las bombonas manteniéndolas dentro de la aeronave, por lo que procedemos a continuación a compararlo con el sistema planteado en nuestro trabajo.

6.1 Rellenado en la aeronave

Hay que tener en cuenta que para poder realizar un relleno en la aeronave hay que tener depósitos de grandes dimensiones para poder abastecer los tanques de varias posibles aeronaves durante varias posibles misiones, un sistema con la infraestructura correspondiente para el llenado de los tanques, etc., lo que conlleva problemas de seguridad, espacio, económicos...

Teniendo en cuenta en cuenta lo anterior, se podrían observar mejoras en los principales asuntos a tratar:

6.1.1 Seguridad.

Al realizar tan solo el recambio de la bombona vacía por la llena, no hace falta tener uno (o varios) grandes tanques de hidrógeno para poder reabastecer a las aeronaves ZATA, reduciendo así el peligro en caso de una bombona defectuosa (pudiendo ocurrir el fenómeno conocido como BLEVE del que ya se ha hablado en este [36] trabajo en el apartado 2.1.1) o fallo en el sistema de recarga, ya que la cantidad de hidrógeno expuesto al peligro sería mucho menor.

Además, al no tener un repostado como tal, nos ahorramos problemas que puedan surgir derivados de chispas que salten de electricidad estática acumulada, aunque seguiría siendo recomendable conectar la aeronave a Tierra para descargarla y evitar problemas.

6.1.2 Espacio

Debido a que no haría falta una gran instalación con márgenes de seguridad excesivos como ocurriría con el sistema de rellenado en la aeronave, se podría

localizar el lugar de “repostaje” más cercano a una ciudad, o incluso dentro de ella, donde más sentido tendría este tipo de vehículos.

6.1.3 Económicos

El sistema planteado en este trabajo se beneficiaría de ventajas económicas frente al de relleno de las bombonas en el interior de la aeronave debido a el ahorro que supondría no tener que realizar una instalación del tamaño que correspondería a ese sistema, siendo más económico el terreno necesario al ser menor y la inversión en infraestructura al ser más simple, principalmente debido a que no es necesario un gran depósito de hidrógeno con todas las medidas de seguridad que ello conlleva, ni un sistema de transporte de esas grandes cantidades de hidrógeno hasta la localización.

6.1.4 Versatilidad

Un sistema más simple y económico como el planteado en este trabajo es más versátil a la hora de necesitar cambios y adaptaciones, bien por cambio en las circunstancias que llevaron a implantar el sistema en un principio o bien por avances en la tecnología de la aeronave, del sistema de almacenamiento o del sistema de recarga.

Esto es así ya que construir una estación de pequeño tamaño como la que se plantea en este trabajo es menos costoso que una gran planta donde rellenar los tanques, lo que permitiría moverla de lugar y adaptarla más fácilmente, siendo el hidrógeno transportado desde el lugar donde se genera a estas subestaciones de recarga del ZATA con camiones, pudiendo ser estos propulsados por hidrógeno también, como por ejemplo los XCIENT Fuel Cells de Hyundai, como el que se puede ver en la Figura 6-1, creando así un sistema muy sostenible y casi sin emisiones en utilización.



Figura 6-1 - Camión XCIENT Fuel Cell de Hyundai [37].

7 Conclusiones

Teniendo en cuenta el rápido desarrollo poblacional en las ciudades y el aumento en tamaño de éstas, puede llegar a ser difícil el transporte rápido y cómodo de un punto a otro de las mismas. A este problema se une el requisito de hacer esas ciudades sostenibles, como se pone de manifiesto en los Objetivos de Desarrollo Sustentable de la ONU para 2030 [38]. De ello nace una necesidad futura de nuevos medios de transporte como los eVTOLs, siendo necesario un gran desarrollo e investigación para hacerlos viables en un futuro.

Con la actual tecnología de almacenamiento de energía en baterías, capacidad para recargarlas y de obtención de electricidad, no se cumplen los requisitos antes nombrados. Por ello se pone de manifiesto la necesidad de aplicar tecnologías a nuevos medios de transporte. Aquí entra en juego el ZATA, un eVTOL autónomo alimentado con una pila de hidrógeno que puede ayudar en esta solución.

Esta aeronave tiene como principal inconveniente que en la actualidad no existen baterías con la suficiente capacidad en un tamaño reducido, poco peso y que además se puedan recargar en un tiempo que permita la operatividad casi continua de la aeronave de forma funcional

Usando la tecnología de pila de hidrógeno, se puede obtener la suficiente energía para alimentar la aeronave y hacerla funcional, el problema es que los tanques que se pueden introducir en ella tienen un tamaño limitado por las dimensiones del casco, por ello se hace necesario un sistema para poder reabastecer de hidrógeno la aeronave de forma habitual.

La mejor forma que hemos pensado para ello es la del recambio de los tanques integrados en el propio ZATA que estén vacíos al acabar una misión por unos llenos, dejando la aeronave lista para continuar funcionando.

Expuesto lo previo, el diseño que hemos hecho para el ZATA consigue el almacenamiento suficiente para que sea útil para al menos una misión, avanzando así en su viabilidad.

En cuanto al diseño interior de componentes acoplados a la aeronave, además de las bombonas, se han elegido las válvulas de cierre para los depósitos y las mangueras de alimentación desde la bombona a la célula, además del sistema automatizado para apretar y soltar las conexiones de las mismas.

Respecto al sistema exterior, se ha profundizado menos debido a que está inspirado en métodos ya existentes. Aun así, se ha hecho un diseño simple adaptando las ideas previas de forma que la interacción humana no sea necesaria, haciendo así la recarga más rápida, segura y económica.

Finalmente se ha comparado el sistema sobre el que se trabaja con otro sistema similar a los ya existentes en las llamadas hidrogeneras y se han expuesto las razones por las cuales creemos que este sistema puede ser mejor, teniendo en cuenta la seguridad, el espacio disponible, la economía y la versatilidad a la hora de adaptarse a cambios.

8 Futuros trabajos

Al realizar este trabajo se han detectado posibles estudios para la mejora de estas tecnologías y hacerla más viable y útil.

Células de combustible

Las principales mejoras que creemos que se pueden hacer son en cuanto a la potencia específica, que sigue realmente baja respecto a sus competidores de combustión.

Adicionalmente, una reducción de tamaño de las mismas también sería interesante para poder ubicarlas más fácilmente en aeronaves.

El diseño de una célula de combustible específica para esta aeronave concreta, de acuerdo a las necesidades de la misma, podría ayudar a reducir su tamaño y peso total, beneficiando la capacidad del ZATA.

Hidrógeno

Dado que las propiedades del hidrógeno no se pueden cambiar, quizá la situación y la usabilidad de éste mejorara si se diseñaran tanques que fueran capaces de aguantar más presión, aumentando así la densidad energética volumétrica del hidrógeno.

9 Agradecimientos

Con la finalización de este trabajo acaba también una gran época de mi vida en la que he disfrutado mucho y he trabajado más aún, siendo consciente de las obligaciones que requería la meta que supone unos estudios de este tipo. Durante esta etapa he aprendido innumerables cosas, tanto en aspectos académicos como personales, siempre con mi hermano, con quien sé que puedo contar para cualquier situación, y con mis padres, deberían ser sus nombres los que aparecieran en la portada de este trabajo y de cualquier otro que me implique, a donde llegue en la vida será gracias a ellos tres. Del mismo modo mis amigos merecen todo el agradecimiento que les pueda dar, siempre pendientes de cómo iba en todas las situaciones que me afectaran, compartiendo momentos alegres y momentos duros. Me gustaría agradecer también a Capgemini la oportunidad de realizar este trabajo en un campo con tanto futuro en mi opinión como es este, así como a mi tutor Néstor Velaz Acera, siempre dispuesto a ayudar en lo que necesitara, resolviendo dudas e impulsándome sin importar el día ni la hora.

10 Referencias Bibliográficas

- [1] The World Bank, «Overview», *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview> (accedido 13 de diciembre de 2021).
- [2] O. US EPA, «Emisiones de dióxido de carbono», 26 de marzo de 2021. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono> (accedido 24 de diciembre de 2021).
- [3] «Transporte — Agencia Europea de Medio Ambiente». <https://www.eea.europa.eu/es/themes/transport/intro> (accedido 27 de diciembre de 2021).
- [4] ALTRAN, «EN-ROUTE TO URBAN AIR MOBILITY».
- [5] «Hidrógeno», *Centro Nacional de Hidrógeno*. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [6] «Hidrógeno como alternativa sustentable a los combustibles fósiles – Santo Tomás en Línea». <https://enlinea.santotomas.cl/actualidad-institucional/hidrogeno-como-alternativa-sustentable-a-los-combustibles-fosiles/219573/> (accedido 9 de enero de 2022).
- [7] «¿Cómo se almacena y transporta el hidrógeno?», *H2 Perú*. <https://h2.pe/hidrogeno/como-se-almacena-y-transporta/> (accedido 10 de enero de 2022).
- [8] K. Wipke, S. Sprik, J. Kurtz, T. Ramsden, y J. Garbak, «U.S. Fuel Cell Vehicle Learning Demonstration: Status Update and Early Second-Generation Vehicle Results», *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2009, doi: 10.3390/wevj3020420.
- [9] «Specific power - Energy Education». https://energyeducation.ca/encyclopedia/Specific_power (accedido 11 de enero de 2022).
- [10] Manuel Bestratén Belloví y Emilio Turmo Sierra, «NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica».
- [11] «¿Cómo funciona el Hidrógeno como fuente de energía? - Aeh2.ORG?», *Asociación Española del Hidrógeno*. <https://www.aeh2.org/hidrogeno/> (accedido 15 de enero de 2022).
- [12] «HOME», *CERTIFHY*. <https://www.certifyhy.eu/> (accedido 15 de enero de 2022).
- [13] «Hidrógeno», *Centro Nacional de Hidrógeno*. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/> (accedido 8 de enero de 2022).
- [14] Á. P. Amaya, «El motor de hidrógeno: ¿Cómo funciona? Estos son sus secretos». <https://www.autonocion.com/como-funciona-un-motor-de-hidrogeno/> (accedido 23 de enero de 2022).
- [15] *The Difference Between Gasoline And Hydrogen Engines*, (19 de diciembre de 2018). Accedido: 25 de enero de 2022. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=l6ECwRnJ0Sg>
- [16] «Hidrógeno líquido en lugar de queroseno para aviación», *forococheelectricos*, 5 de marzo de 2017. <https://forococheelectricos.com/2017/03/hidrogeno-liquido-en-lugar-de-queroseno-para-aviacion.html> (accedido 25 de enero de 2022).

- [17] «Qué es un avión de pila de combustible: 11 datos interesantes que debe saber | Frikis de Lambda», *Lambda Geeks*. <https://es.lambdageeks.com/fuel-cell-aircraft/> (accedido 3 de febrero de 2022).
- [18] O. Santiago, «Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques», *Apilados*, 22 de octubre de 2017. <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (accedido 5 de febrero de 2022).
- [19] «Hydrogen», 31 de agosto de 2005. <https://web.archive.org/web/20050831013838/http://periodic.lanl.gov/elements/1.html> (accedido 15 de febrero de 2022).
- [20] «El comportamiento no ideal de los gases (artículo)», *Khan Academy*. <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/gases-and-kinetic-molecular-theory-ap/ideal-gas-laws-ap/a/non-ideal-behavior-of-gases> (accedido 26 de febrero de 2022).
- [21] Ahmed M. Elberry, Jagruti Thakur, Annukka Santasalo-Aarnio, Martti Larmi, «Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems». *international journal of hydrogen energy*, 10 de febrero de 2021.
- [22] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Publicación de la Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable». <https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Paginas/publicacion-hoja-de-ruta-del-hidrogeno-apuesta-hidrogeno-renovable.aspx> (accedido 3 de marzo de 2022).
- [23] «El Gobierno aprueba la “Hoja de Ruta del Hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable”». <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-hoja-de-ruta-del-hidr%C3%B3geno-una-apuesta-por-el-hidr%C3%B3geno-renovable/tcm:30-513814> (accedido 5 de marzo de 2022).
- [24] Ballard Power Systems, «Product Data Sheet for Ballard FCveloCity - HD». 2022.
- [25] «FCveloCity-HD Spec Sheet». https://www.ballard.com/about-ballard/publication_library/product-specification-sheets/fcvelocity-hd-spec-sheet (accedido 8 de marzo de 2022).
- [26] Rodrigo Ruiz Marín, «INTEGRACIÓN DE UNA FUEL CELL EN UN AEROTAXI INTERURBANO DE 2 PASAJEROS CON CAPACIDAD eVTOL», Estudio técnico., ULE, León, 2020.
- [27] Tretsiaikova-McNally, «LECTURE - Safety of hydrogen storage». HyResponse.
- [28] «700 BAR HYDROGEN VALVE FOR VEHICLE TANKS - OTV700». <https://rotarex.com/product/700-bar-hydrogen-valve-for-vehicle-tanks-otv700> (accedido 17 de marzo de 2022).
- [29] «Manguera para hidrógeno 2440P-04V32 | España». <https://ph.parker.com/es/es/hydrogen-hose-2440p-04v32> (accedido 20 de marzo de 2022).
- [30] Parker Hannifin Corporation Tube Fittings Division, «Catalog 4300 PDF Version». junio de 2021.
- [31] «Worm Gear Sets A53 - Framo Morat - Your idea - Our drive». <https://framomorat.com/products/worm-gear-sets/worm-gear-sets-a53/> (accedido 8 de abril de 2022).
- [32] Richard G. Budynas y J. Keith Nisberth, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Novena. McGraw-Hill.

- [33] «Metalmecánica Fácil», *Metalmecánica Fácil*. <https://www.metalmecanica-facil.mahtg.com/> (accedido 25 de abril de 2022).
- [34] Florian Otto [@flotto2508], «NIO is ready! First Battery Swap Station in Europe. Just a few weeks. Game Changer for charging infrastructure. Norway first! Germany soon. Fully recharged within minutes. Here we are! <https://t.co/5QIMWn1Vyq>», *Twitter*, 12 de noviembre de 2021. <https://twitter.com/flotto2508/status/1459187288412413953> (accedido 13 de mayo de 2022).
- [35] H. y Eléctricos, «NIO instala su primera estación de cambio de baterías en Europa», *Híbridos y Eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/nio-instala-primera-estacion-cambio-baterias-europa/20211115092603051304.html> (accedido 13 de mayo de 2022).
- [36] «April 2020 Hydrogen Station Update Webinar - Questions & Answers | California Fuel Cell Partnership». <https://cafcp.org/blog/april-2020-hydrogen-station-update-webinar-questions-answers> (accedido 1 de julio de 2022).
- [37] H. y Eléctricos, «27 camiones de pila de combustible de hidrógeno de Hyundai circularán por Alemania», *Híbridos y Eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/27-camiones-pila-combustible-hidrogeno-hyundai-alemania/20220802175050061022.html> (accedido 1 de julio de 2022).
- [38] D. Almas, «▷ Ciudades del Futuro » Así serán las Ciudades Inteligentes de 2050», *Cinco Noticias*, 16 de noviembre de 2020. <https://www.cinconoticias.com/ciudades-del-futuro/> (accedido 5 de julio de 2022).