



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍA DE MINAS Y
ENERGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO DE BOMBA DE HIDRÓGENO DE ÉMBOLO
ALTERNATIVO DE CILINDROS HORIZONTALMENTE
OPUESTOS Y SECOS, CON SU ALMACENAMIENTO.**

MEMORIA DE DISEÑO DE UN EQUIPO DE BOMBA Y ALMACENAJE
MODULAR

Alumno: Lazcano Berrueta, Aritz

Directora: Avilés González, Cristina

Curso: 2022-2023

Fecha: jueves 14 de septiembre de 2023

RESUMEN

En este TFG se pretende desarrollar un sistema de compresión de hidrógeno a 200bar y su almacenaje de alrededor de los 50Kg sin una especificidad determinada hacia una industria concreta, para poder ser utilizado en multitud de ellas, de forma modular mediante ampliaciones, bien por parte de caudal de bombeo o por almacenamiento. Se implementará en este trabajo la unidad básica de compresión y almacenamiento, basada en los estándares más comunes de la industria y primando la durabilidad para una industria pesada y cuidando la elección de materiales de alta calidad, intentando así provocar menos costes, paradas no programadas y problemas de mantenimiento dentro de lo razonable.

El proyecto está pensado para ser agnóstico al respecto de la fuente del hidrógeno y el uso que de él se haga. Pero sí se harán valoraciones razonadas con respecto a las tecnologías usadas, tanto en este caso como en otros al justificar las alternativas disponibles.

PALABRAS CLAVE

Bomba de embolo, compresión, segmentos secos, hidrógeno, pureza del hidrogeno, acero inoxidable DIN EN 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2), acero inoxidable AISI 316L.

SUMMARY

In this TFG, the aim is to develop a hydrogen compression system at 200bar and its storage of around 50Kg without a specific specification towards a specific industry, in order to be used in many of them, in a modular way through expansions, either by pumping flow or by storage. In this work, the basic unit of compression and storage will be implemented, based on the most common standards of the industry and prioritizing durability for a heavy industry and taking care of the choice of high-quality materials, thus trying to cause less costs, unscheduled stops and maintenance problems within reason.

The project is designed to be agnostic with respect to the source of hydrogen and its use. But reasoned assessments will be made with respect to the technologies used, both in this case and in others when justifying the available alternatives.

KEYWORDS

Plunger pump, compression, dry plunger ring, hydrogen, hydrogen purity, stainless steel DIN/EN 1.445 - X2CrNiMo18-14-3, stainless steel AISI 316L.

LABURPENA

TFG honetan hidrogenoaren konpresio-sistema bat garatu nahi da 200 bar-etan eta bere biltegitratzea 50Kg ingurukoa, industria zehatz baterako espezifikotasunik gabe, haietako ugaritan erabili ahal izateko, luzapenen bidez modu modular batean, bai ponpaketa bidez, bai biltegitratze bidez. Oinarrizko konpresio eta biltegitratze-unitatea ezarriko da lan honetan, industria estandar ohikoenetan oinarrituta eta industria astun baterako iraunkortasuna lehenetsiz eta kalitate handiko materialen aukeraketa zainduz, horrela kostu gutxiago, programatu gabeko geldialdiak eta mantentze-arazoak arrazoiaren barruan eragin nahian.

Proiektuak agnostikoa izan nahi du hidrogenoaren iturriari eta horren erabilerari dagokionez. Baina balioespen arrazoituak egingo dira erabilitako teknologiei dagokienez, bai kasu honetan, bai beste batzuetan dauden alternatibak justifikatzerakoan.

GAKO-HITZAK

Pistoi-ponpa, konpresioa, eraztun lehorrak, hidrogenoa, hidrogeno purutasuna, altzairu herdoilgaitza DIN/EN 1.445 – X2CrNiMo18-14-3, altzairu herdoilgaitza AISI 316L.

ÍNDICE

RESUMEN	I
PALABRAS CLAVE.....	I
SUMMARY	II
KEYWORDS	II
LABURPENA.....	III
GAKO-HITZAK.....	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	VIII
LISTA DE GRÁFICAS Y DIAGRAMAS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
1. MEMORIA.....	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 El hidrógeno, propiedades y características.....	1
1.1.2 Los yacimientos de hidrógeno natural.....	7
1.1.3 La obtención de hidrogeno por métodos industriales	9
1.2 Contexto	16
1.3 Objetivos y alcance del trabajo.....	26
1.4 Beneficios que aporta el trabajo	27
1.5 Análisis del estado del arte.....	29
1.5.1Tecnologías de almacenamiento.....	29
1.5.2 Bombas	36
1.5.3 Segmentos	36

1.6	Análisis de alternativas.....	39
1.7	Análisis de riesgos	41
1.8	Descripción de la solución propuesta. Diseño básico	43
2.	METODOLOGIA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	47
2.1	Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos.....	47
2.2	Diagrama de Gantt	50
2.3	Cálculos.....	51
2.3.1	Almacenamiento.....	51
2.3.2	Cálculo de unión atornillada de bridas	61
2.3.3	Cálculo de Segmentos	77
2.3.4	Calculo de la flecha máxima que alcanza el segmento sin sobrepasar su límite elástico para su instalación.	81
2.3.5	Cálculo de la fuerza ejercida por el segmento contra el cilindro	87
2.3.6	Perdidas de potencia por rozamiento de los segmentos	88
2.3.7	Potencia de la bomba auxiliar	90
2.3.8	Capacidades de la bomba.....	92
2.3.9	Refrigeración del caudal de la bomba de agua	97
2.3.10	Refrigeración del hidrógeno por aire	99
2.3.11	Trasvase de gases	101
2.3.12	Cálculo de transferencia de calor en los cilindros con brida	102
2.3.13	Consumo bombas de agua de refrigeración de cilindros y de las roscas centrales.....	104
3.	ASPECTOS ECONÓMICOS	107
3.1	Descripción del presupuesto	107
3.2	Análisis de rentabilidad.....	112
4.	Conclusiones	116
5.	Bibliografía.....	118

6.	Anexo I: Pliego de condiciones. Normativa aplicable. Plan de pruebas.	130
6.1	Pliego de condiciones.....	131
6.2	Normativa aplicable	135
6.2.1	Aplicables a envases.....	135
6.2.2	Aplicables a la bomba	136
6.2.3	Aplicables a tornillos.....	136
6.2.4	Aplicable a arandelas de gas para racores	138
6.2.5	Aplicables a la instalación	139
6.2.6	Normas de aplicación para trabajadores expuestos en el lugar de la instalación y los montadores que realicen los ensayos de presión y fugas.....	140
6.3	Plan de pruebas	141
7.	Anexo II: Planos y esquemas.	145

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Propiedades del hidrógeno. Fuentes: (Wikipedia, 2023f); (Wikipedia, 2023d); (Wikipedia, 2023j); (Fdez-Bolaños Badía, 2005); (Grueso Garrido, 2020)</i>	<i>3</i>
<i>Tabla 2 Tabla de precio por 100km recorridos por combustible. Fuente: (MITECO, 2023)</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3 Densidades gravimétricas y volumétricas de distintos hidruros metálicos y químicos. Fuente: (Pérez, 2022)</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4 Reacciones químicas de hidruros químicos. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5 Recopilación de límites para cálculos de fatiga. Fuente: (UNE, Versión corregida, Marzo 2023).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 6 Probabilidad de supervivencia de los autores Stilen, Cummings y Schulte. Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 7 Tabla de tornillos calibrados para obtener dimensiones. Fuente: (Rodríguez Galbarro, Estudio y Tipología de las Uniones Atornilladas, s.f.).....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 8 Costes a 1 unidad.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 9 Costes a 100 unidades.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 10 Costes a 1000 unidades.....</i>	<i>109</i>

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Límite de inflamabilidad del hidrógeno en CN. fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.75)</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 2 Límites de detonación para hidrogeno en aire en CN. fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.77).....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 3. Generación de hidrogeno geológico. Fuente: (Hand, 2023).....</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 4 Electrolisis del agua pura con PEM (membrana de intercambio de protones). fuente: (Sarkar, s.f.).....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 5 Diagrama de flujo de típica planta de reformado por vapor. fuente: (Wikipedia, 2023i).....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 6 Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno a partir de carbón. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005).....</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 7 Diagrama de flujo de oxidación parcial de hidrocarburos. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005).....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 8 Colores del hidrógeno. Fuente: (Merino, 2022)</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 9 Depósito de Toyota Mirai. Fuente: (Apilados, 2017)</i>	<i>30</i>
<i>Ilustración 10 Sistema de Linde-Hampson dual. fuente: (Sistema de Linde-Hampson, 2023h)</i>	<i>31</i>
<i>Ilustración 11 Diagrama densidad-temperatura de BMW. Fuente: (Kunze, 2011)</i>	<i>32</i>
<i>Ilustración 12 Detalle de segmento de doble escalonado.</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 13 Corte de ensamblaje de la bomba de émbolos.</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 14 Ensamblaje de la bomba con un desfase de 90° sobre el anterior corte.</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 15 Sensor de efecto Hall analógico 49E. Fuente: (Tecnimikro, 2023)</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 16 Botellón, debe pintarse en color rojo por norma UNE-EN 1089-3:2011; que debe llevar por ser portador de hidrógeno. Debe pintarse la ojiva y el cilindro de rojo.</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 17 Plano acotado del botellón.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 18 Brida de unión entre cilindro distal y central.....</i>	<i>68</i>

LISTA DE GRÁFICAS Y DIAGRAMAS

Gráfica 1 Consumo mundial de hidrógeno. Fuente: (IEA, 2022)(p.18)	16
Gráfica 2 Demanda de hidrógeno por zona geográfica para el refino. Fuente: (IEA, 2022)(p.21)	17
Gráfica 3 Consumo de hidrógeno de fuentes verdes y con captura de hidrógeno. Fuente: (IEA, 2022)(p.23)	17
Gráfica 4 Producción de hidrógeno por materia prima. Fuente: (IEA, 2022)(p.71)	18
Gráfica 5 Coste de procesamiento del barril de petróleo en distintas refinerías. Fuente: (IEA, 2022)(p.25)	19
Gráfica 6 Demanda industrial por aplicación. Fuente: (IEA, 2022)(p.29).....	20
Gráfica 7 Consumo de hidrógeno en el transporte. Fuente: (IEA, 2022)(p.40).....	21
Gráfica 8 Tipología de vehículos de celda de hidrogeno, Fuente: (IEA, 2022)(p.42)....	22
Gráfica 9 Número de estaciones de servicio y ratio de clientes. Fuente: (IEA, 2022)(p.46)	22
Gráfica 10 Costes de producción de hidrógeno por origen. Fuente: (IEA, 2022)(p.92)	23
Gráfica 11 Gráfica P-T de hidrógeno metálico sólido y líquido. Fuente: (Wang, 2016)	35
Gráfica 12 Diagrama de Gantt de las tareas realizadas.	50
Gráfica 13 Factor de compresibilidad del hidrógeno frente a presión y temperatura, también llamado carta de compresibilidad. Fuente: (Hirscher, 2010).....	60
Gráfica 14 Ca, Coeficiente de factor de superficie. Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)	63
Gráfica 15 Diagrama de factor de concentración de tensiones elástico con respecto a diámetros. Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)	65
Gráfica 16 Gramos comprimidos por carrera de émbolo.....	93
Gráfica 17 Energía y potencia consumida por la bomba.....	94
Gráfica 18 Trabajo o perdidas por rozamiento de los segmentos por carrera.	94
Gráfica 19 tanto por uno del poder calorífico inferior consumido según la presión del sistema de almacenamiento.....	95
Gráfica 20 Tanto por uno del poder calorífico inferior consumido según la presión del sistema de almacenamiento.....	95
Gráfica 21 Coste energético para la compresión del hidrógeno en función del PCS. Fuente: (SynerHy, 2022)	96
Gráfica 22 Temperatura del hidrógeno dentro de los cilindros una vez comprimido. ...	96

LISTA DE ACRÓNIMOS

Todos los acrónimos están descritos, donde son usados, a excepción de ser de uso común.

LISTA DE SÍMBOLOS

Debido a Su repetición con usos y significados distintos los símbolos estarán descritos allá donde sean usados, para evitar confusiones entre simbología idéntica con distinto significado en distintas áreas.

1. MEMORIA

1.1 Introducción

Inicialmente en esta introducción daremos unas pinceladas sobre las propiedades del fluido sobre el que operara la bomba y su almacenamiento para conocerlo mejor y saber a qué atenernos con respecto a él.

Tras ello hablaremos sobre la obtención de hidrogeno, cuáles son sus fuentes, tanto naturales como artificiales. Ya que es necesario conocer las alternativas de obtención del hidrogeno y las características generales de los equipos, como por ejemplo, las presiones de trabajo habituales. Así sabremos a que presiones operar las entradas del hidrolizador a la bomba a diseñar, sus características de pureza, energía consumida en la hidrólisis, otros parámetros que permitirán hacer un planteamiento de las potencias necesarias y espacios requeridos para su instalación.

1.1.1 El hidrógeno, propiedades y características

El hidrógeno es un gas diatómico en el que cada átomo está formado por un único protón y un electrón en su isótopo más habitual, aunque existen otros conocidos, los más habituales y naturales llamados deuterio y tritio, el núcleo del deuterio compuesto por un protón y un neutrón y el Tritio por dos neutrones y un protón. El Tritio es un elemento radioactivo con un periodo de semidesintegración corto de (4500 ± 8) días, por lo que puede ser usado en datación de agua y vino. Existen otros isótopos del hidrogeno hasta ^7H creados a partir de 2001, pero todos creados en laboratorio (Wikipedia, 2023f).

La unión de estos elementos hace por tanto que el peso molar media del dihidrógeno varíe y no corresponda con el valor monoprotónico. Siendo este

valor de 2,01589g/mol (Wikipedia, 2023d). Aunque los valores fluctúan ligeramente según las fuentes.

Es difícil encontrarlo en estado en estado natural en la tierra salvo en los yacimientos que comentaremos más adelante. Aun así, sigue siendo una rareza, a pesar de considerar que es aproximadamente un 75% de la materia bariónica universal, es decir, la materia visible del universo (Wikipedia, 2023f).

Es un gas incoloro, inodoro, insípido y no venenoso en condiciones normales (Wikipedia, 2023f), aunque el desplazamiento del oxígeno por parte del hidrógeno en espacios cerrados puede ser peligroso por asfixia. En espacios abiertos es rara la asfixia por la cantidad necesaria que implicaría. En cualquier caso, se debería contemplar el riesgo de explosión e inflamación, de los cuales hablaremos en posteriores líneas.

Su densidad es 0,0899kg/Nm³ siendo el compuesto más ligero de la tabla periódica y su descubridor fue Henry Cavendish en 1766 (Wikipedia, 2023f).

Su poder calorífico es muy superior al de otros combustibles, siendo su valor superior de 141,86MJ/kg y el inferior de 119,83MJ/kg (Grueso Garrido, 2020)(p.3), este último es el que se suele usar en cálculos, ya que no suele aprovecharse el calor latente de vaporización del agua que forma su combustión en los procesos industriales. Es el poder calorífico más alto de todos los combustibles químicos por peso, no así por volumen debido a su baja densidad, que se correspondería con 10,7727MJ/Nm³ en estado gaseoso. Por esta baja densidad energética se hace necesario comprimirlo a altas presiones para almacenarlo en un relativo poco espacio.

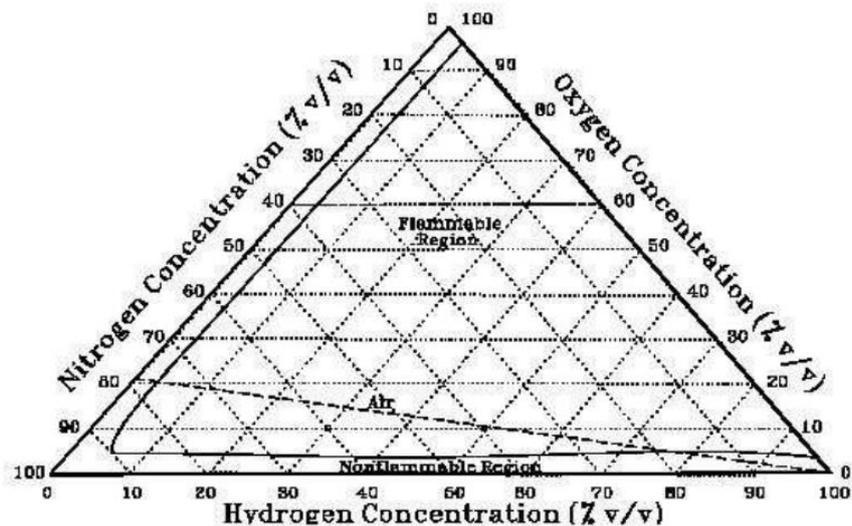
Propiedades del hidrógeno	
Densidad	0,0899 kg/Nm ³ (estado gaseoso)
	0,0708 kg/L (estado líquido)
Poder calorífico inferior (PCI)	119,83 KJ/g
Poder calorífico superior (PCS)	141,86 KJ/g
Energía específica (a partir de PCI)	33,286 kWh/kg
Energía específica (a partir de PCS)	39,405 kWh/kg
Límite de inflamabilidad	4,1 a 74,8% en aire seco y 101,3 kPa
Límite de detonación	18,3 a 59%
Coeficiente de difusión	0,61 cm ² /s
Viscosidad dinámica, μ	0,00084 Pa·s o 10^{-1} P (poise)
Masa molar	2,01589g/mol
Punto de fusión	14,025 K
Punto de ebullición	20,268 K
Punto crítico	23,87 K a $1,293 \cdot 10^6$ Pa
Temperatura de autoignición	773 a 850 K a 101,3 kPa en aire
Conductividad térmica	0,1815 W/(K·m)
Energía mínima de la chispa	0,017 mJ a 101,3 kPa
	0,09 mJ a 5,1 kPa
	0,56 mJ a 2,03 kPa

Tabla 1 Propiedades del hidrógeno. Fuentes: (Wikipedia, 2023f); (Wikipedia, 2023d); (Wikipedia, 2023j); (Fdez-Bolaños Badía, 2005); (Grueso Garrido, 2020)

Como se describe en el trabajo de fin de carrera de Clara Fdez-Bolaños Badía (Fdez-Bolaños Badía, 2005), la energía mínima de la chispa de ignición es considerablemente baja como para ser suficiente cualquier chispa, superficie caliente, cerillas o incluso la electricidad estática del cuerpo humano (pp.75-76).

Los límites de inflamabilidad también son muy amplios, aunque dependientes de la mezcla de comburentes e inertes y condiciones ambientales como presión, temperatura y la energía de la fuente de ignición, la dirección de propagación de la llama también afecta a los límites de inflamabilidad. En aire seco a 298,15K y 101,3kPa los límites son como los reflejados en la tabla 1, 4,1% de límite inferior y 74,8% el superior. Si la mezcla fuese de hidrógeno y oxígeno sin otros gases los márgenes se ampliarían desde el mismo 4,1% hasta el 95%. El margen inferior no desciende ya que en aire tendría capacidad para combustionar con el exceso de oxígeno presente y sería el mismo caso. En caso de bajar la presión el rango de inflamabilidad tiende a estrecharse por ambos lados (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(pp. 74-78).

En la ilustración 1 se puede observar gráficamente los rangos de inflamabilidad en aire en condiciones normales.

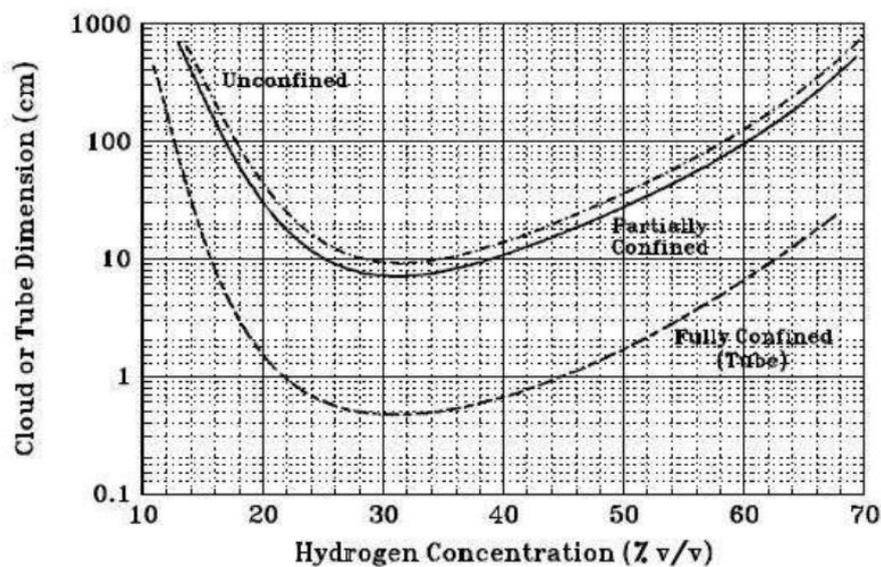


Flammability Limits at a Pressure of 101.3 kPa (14.7 psia) and a Temperature of 298 K (77 °F)

Source: Coward, H. F. and G. W. Jones. *Limits of Flammability of Gases and Vapors*. Bureau of Mines Bulletin 503, N70-74476; AD-701575 (1952).

Ilustración 1 Límite de inflamabilidad del hidrógeno en CN. fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.75)

Los límites de detonación son muy variables en función del confinamiento y sus dimensiones, así como de la relación combustible-comburente. En la ilustración 2 se puede ver como es afectado el límite de detonación en función de la concentración de hidrógeno y aire, para determinadas medidas de confinación, en este caso el diámetro de un tubo. Estos límites están ensayados bajo ciertos parámetros, de modo que si se modifican las condiciones como la energía de detonación pueden variar sensiblemente, así que estos datos deberían ser usados con cautela y más como una referencia que como una regla (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(pp. 76-78)



Minimum Dimensions of H₂-Air Mixtures for Detonation at 101.3 kPa (14.7 psia) and 298 K (77 °F)

Source: Lee, J. H., R., Kynstantus, C. M., Guirao, W. A., Benedick, and J. E. Shepherd. "Hydrogen-Air Detonations." Proceedings of the 2nd International Workshop on the Impact of Hydrogen on Water Reactor Safety. M. Berman, Ed., SAND82-2456, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, October (1982).

Ilustración 2 Límites de detonación para hidrogeno en aire en CN. fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.77)

Otro dato curioso del hidrógeno y que se da solo en otro gas en condiciones normales, el cual es el helio, es su temperatura de inversión, que está en el entorno de los 200K a presión atmosférica para el hidrogeno y 40K para el helio. Esto hace que debido al Efecto Joule-Thomson el gas se caliente al expandirse, y no se invierta esa tendencia hasta que no baja de 200K. Debido a esto es un problema a la hora de criogenizar el gas debiendo ser previamente

enfriado por otros gases auxiliares como podría ser mediante un intercambiador de nitrógeno líquido, el cual suele usar refrigeradores en cascada, antes de poder usar una válvula de laminación para bajar su temperatura. Esto se suele llevar a cabo mediante sistemas Linde-Hampson, pero esto se tratará más adelante en la selección de la solución propuesta (Tatum, 2023). Para el resto de gases esta temperatura de inversión es bastante más alta que la de las condiciones normales y por eso no se da tal fenómeno en dichos gases, por lo que, al laminarlos mediante una válvula de expansión, estos bajan su temperatura.

1.1.2 Los yacimientos de hidrógeno natural

El hidrógeno es el elemento químico más abundante del universo junto con el helio, al menos en su parte observable correspondiente a la materia bariónica. Las galaxias y estrellas están conformadas mayoritariamente por ambos gases. Pero en la tierra son escasos los lugares donde este gas se encuentre de forma libre, formando dihidrógeno (H_2), sin estar asociado a otros elementos y de forma natural.

Para Science y Son muy raros sus yacimientos y solo se han descubierto unos pocos casos en el último siglo. Algunos datan de fechas tan antiguas como 1921 donde se descubrieron dos pozos en prospecciones australianas, la primera de ellas en Kangaroo Island. Con una producción de hasta un 80% de hidrógeno. Otro pozo, en la cercana península de Yorke, con una producción cercana al 70 %. (Hand, 2023).

En España según el Diario del alto Aragón, se halló en 1963 un campo de hidrógeno puro a 3.500 metros de profundidad en Monzón, Huesca. En 2020 la empresa Helios Aragón Exploration (HAE) obtuvo los permisos de investigación de hidrocarburos de dos proyectos denominados Barbastro número H22021 y Monzón número H2202, por un periodo de seis años. El volumen recuperable de hidrógeno más probable es de 1,1 millones de toneladas (Lacasta, 2023).

Este tipo de generación de hidrógeno, según las teorías recientes se producirían en las profundidades, según la ilustración 4 de la revista Science (Hand, 2023), se producirían por tres fenómenos principales.

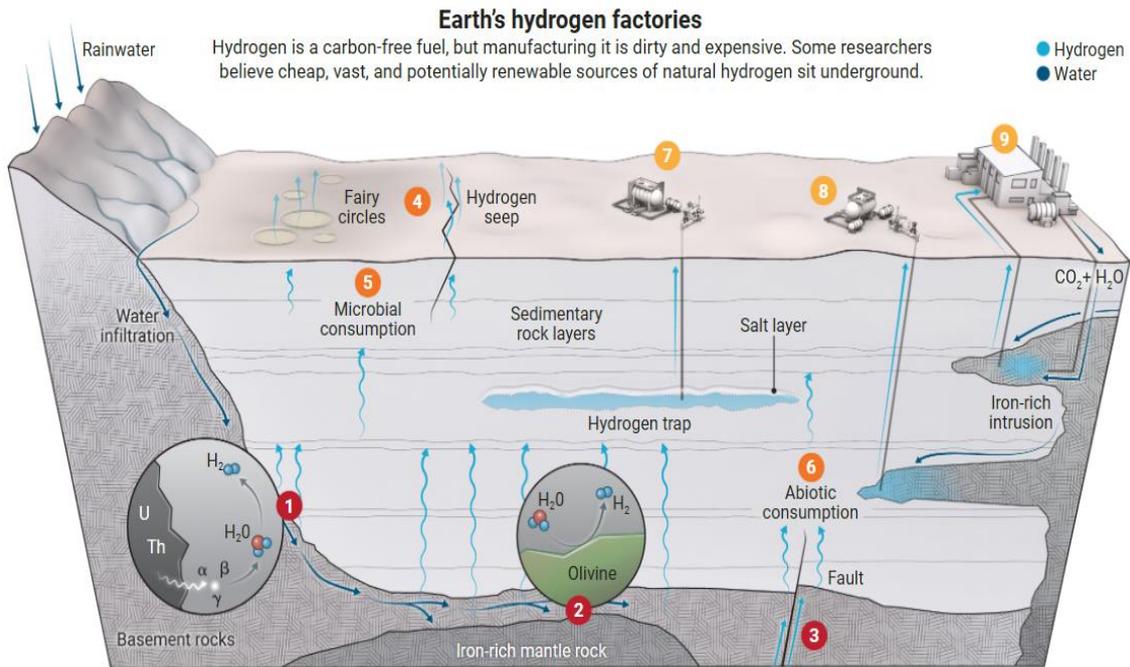


Ilustración 3. Generación de hidrógeno geológico. Fuente: (Hand, 2023)

Según Geoffrey Ellis del USGS quien proporciona los datos de la ilustración 3 a Science, los procesos geológicos de generación podrían ser tres (Hand, 2023):

1. La radiólisis, mediante la cual los elementos radioactivos presentes en las rocas podrían dividir el agua por efecto de la radiación, las rocas más antiguas serían más propicias para esta generación (Hand, 2023).
2. La serpentización, por la cual, a altas temperaturas, el agua reaccionaría con rocas ricas en hierro, que actuaría como catalizador para generar hidrógeno (Hand, 2023).
3. Las corrientes profundas de hidrógeno desde el núcleo o manto de la tierra, que podrían ascender a través de los límites tectónicos de placa y fallas, teoría controvertida y en absoluto probada (Hand, 2023).

En cuanto a los mecanismos de pérdida de hidrógeno Ellis destaca otros tres (Hand, 2023):

1. Las filtraciones por la alta difusividad del hidrógeno que lo hace trasladarse rápidamente a través de fallas, fracturas, intersticios e incluso llegar a la atmosfera (Hand, 2023).
2. Los microbios en las capas de absorción de suelos y rocas podrían consumir hidrogeno para su metabolismo produciendo metano como desecho (Hand, 2023).
3. Las reacciones abióticas a niveles profundos podrían producir agua, metano u otros compuestos minerales (Hand, 2023).

Ellis sugiere que la extracción de este recurso podría realizarse mediante tres métodos principales (Hand, 2023):

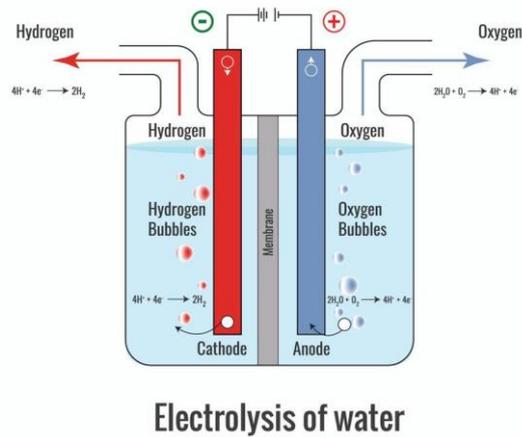
1. Trampas geológicas naturales, estarían constituidas por rocas almacén como podrían ser areniscas o calizas y rocas sello constituidas habitualmente por arcillas, depósitos de sal o granitos. Consistiría en extraerlo como un pozo de metano (Hand, 2023).
2. La captura directa desde la fuente de emisión realizando un pozo directamente hasta la roca rica en hierro lo suficientemente fracturada como para permitir la recolección (Hand, 2023).
3. El ultimo método que Ellis expone sería el de mejora, como él mismo llama, consistente en perfusión de agua a rocas ricas en hierro mediante un pozo de bombeo de agua y otro de extracción de gas (Hand, 2023).

1.1.3 La obtención de hidrogeno por métodos industriales

A continuación, veremos los métodos más usuales para la obtención de hidrógeno a nivel industrial que no provienen de la vía natural como los yacimientos anteriormente vistos. Estas formas son las más usuales para la obtención del hidrógeno.

1.1.3.1 Electrólisis

La electrólisis es la separación de los elementos constitutivos del agua mediante corriente eléctrica, con un voltaje mínimo de ruptura de enlace, para lograr separar los átomos de hidrógeno y oxígeno. Es una hidrólisis de agua.



*Ilustración 4 Electrólisis del agua pura con PEM (membrana de intercambio de protones).
fuente: (Sarkar, s.f.)*

Hay varios tipos de electrolizadores con múltiples electrolitos, de los cuales se suelen distinguir estas categorías:

- Electrolizadores alcalinos.

Según la web de EcoInventos (2023), usan electrolito líquido y mediante diafragma se produce la separación de gases. Funcionan entre 25 y 100°C a presiones de entre 1 y 30 bar. Suelen ser los más económicos con un precio del entorno de 1.000 euros por kilovatio. Su principal desventaja es que sus diseños no son compactos y su respuesta a variaciones de potencia no es rápida. La pureza del hidrógeno obtenida es de alrededor de 99,8% según Green Power (2020).

- Electrolizadores de membrana polimérica (PEM).

Estos electrolizadores utilizan un electrolito que es la propia membrana PEM, la misma que usan las pilas de combustible PEM, por lo que hay a la venta electrolizadores reversibles que pueden operar alternativamente como electrolizador o pila de combustible. Presentan una rápida respuesta a variaciones de potencia, por lo que son los óptimos para trabajar conjuntamente con energías renovables, y son muy sencillos de operar ya que solo requieren agua de la que se alimenta de forma automática. Su principal inconveniente son los costes de fabricación debido al uso de catalizadores fabricados con metales preciosos (Ecolventos, 2023). La pureza del hidrogeno obtenida es del 99,9995% (Green Power, 2020).

- Electrolizadores de óxido sólido o de estado sólido (SOEL).

Se encuentran en un estado de desarrollo poco avanzado, trabajan a altas temperaturas y presiones de hasta 5.000 bares. Alcanzan eficiencias del 95%, pero en este rendimiento no se incluyen los trabajos de compresión y calentamiento, por lo que su eficiencia real cae drásticamente, pero esa energía podría provenir de fuentes renovables como la solar. No suelen encontrarse disponibles en grandes potencias. (Ecolventos, 2023)

- Electrolizadores de membrana de intercambio aniónico (AEM).

Los menos desarrollados, con eficiencias del entorno del 50%, hasta presiones de 30bar. Su ventaja es que no precisan de catalizadores de metales preciosos y usan metales convencionales, lo que los hace prometedores a futuro (Ecolventos, 2023).

La eficiencia operativa típica de los electrolizadores comerciales está en el rango del 60 al 70%. Algunos fabricantes prometen cifras superiores, pero no se debería confiar en tales cifras y debería exigírsele pruebas de rendimiento al equipo. (Ecolventos, 2023)

En cualquier caso, la producción mediante electrolisis es muy ineficiente desde el punto de vista energético, se gasta más energía en producir hidrogeno

mediante este método que la proporcionada por el hidrógeno. A esto colabora la fuente energética de donde provenga la electricidad y su eficiencia. Con una eficiencia de electrolización del 60% se habrá gastado un 166% de la energía contenida en el hidrógeno, eso sin tener en cuenta la compresión o criogenización para su almacenamiento, que estarían entre el 7,5% a 200bar y hasta el 35% respectivamente de la energía de combustión del hidrógeno en función de la presión (Matalucci, 2023) (SynerHy, 2022).

1.1.3.2 Reformado de vapor de gas natural

Mediante el reformado de hidrocarburos también puede ser extraído hidrógeno del gas natural.

Es el método más barato para obtención de gas natural (IEA, 2022)(p.92), a excepción de los yacimientos naturales. El método predilecto y por tanto más usado es el reformado por vapor también conocido en inglés como steam reforming (IEA, 2022)(p.71).

Las reacciones y el proceso del reformado por vapor son los siguientes según el esquema de la figura a continuación.

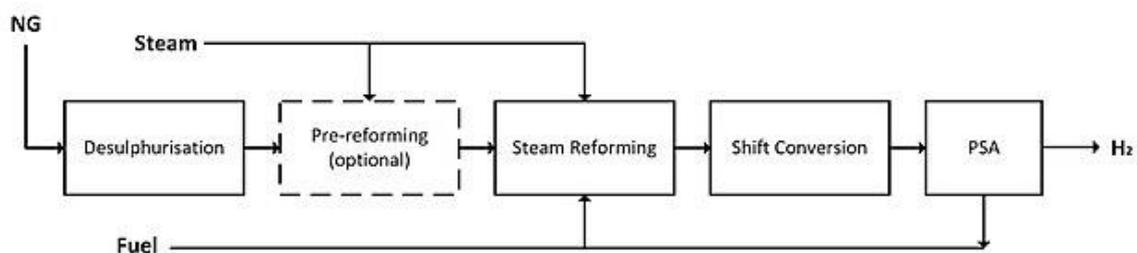


Ilustración 5 Diagrama de flujo de típica planta de reformado por vapor. fuente: (WIKIPEDIA, 2023)

Con la entrada del gas natural se realiza la desulfuración para eliminar el azufre, Tras esta operación llega el pre-reformado, opcional en función de la pureza, en esta operación se lleva a cabo el reformado catalítico o con vapor de los hidrocarburos con cadena más larga, como propano, butano o naftas,

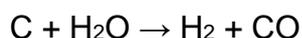
reformados a metano. El reformado con vapor se lleva a cabo en tercer lugar a una temperatura entre 800 a 900°C. Es una reacción altamente endotérmica por lo cual se aporta calor mediante el vapor y se obtiene CO y H₂. A continuación, se lleva a cabo la reacción de desplazamiento del gas de agua, donde se libera más hidrógeno, esta reacción es exotérmica, y añadiendo agua al CO producimos CO₂ y más H₂. Finalmente, un sistema PSA (pressure swing adsorption), adsorción por oscilación de presión, más utilizado actualmente en refinerías por ser más económico, o bien adsorción por oscilación al vacío (VSA) aún más económico (Wikipedia, 2023i) (Wikipedia, 2021).

El proceso del reformado por vapor suele realizarse a presiones medias de entre 20 y 30 bar, parecidas a las presiones de muchos hidrolizadores por electrolisis (Wikipedia, 2023i).

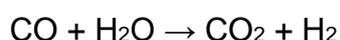
1.1.3.3 Gasificación de carbón

Es el proceso más antiguo de producción de hidrógeno, datando del siglo XIX, para el conocido gas ciudad.

El proceso consiste en pirolizar el carbón progresivamente en un reactor hasta los 1.000°C. Una vez gasificado este, se le hace reaccionar con vapor de agua y oxígeno mediante la siguiente reacción (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.102-103):



Se lavan los gases, se separan de otros que no intervendrán y se realiza una reacción de desplazamiento del gas de agua como en el caso del gas natural, añadiéndole vapor a unos 400°C (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.102-103).



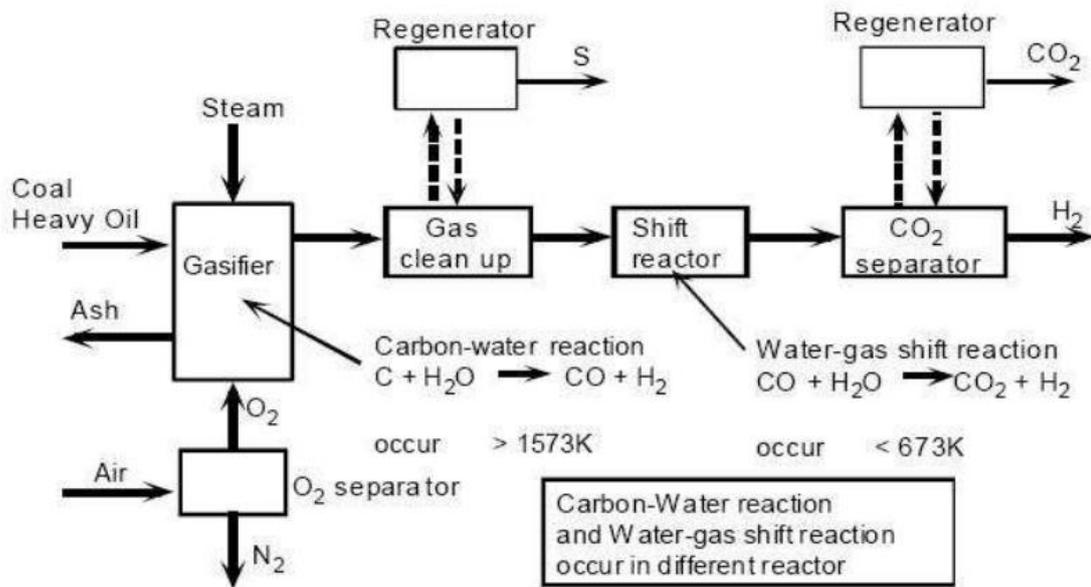
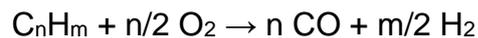


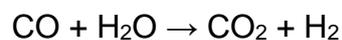
Ilustración 6 Diagrama de flujo de la producción de hidrógeno a partir de carbón. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)

1.1.3.4 Oxidación parcial de hidrocarburos (POX)

Se parte de hidrocarburos tradicionales provenientes del petróleo, residuos industriales, biomasa, metano, etc... Se separa el oxígeno del resto de componentes del aire para llevarlo al proceso de oxidación parcial realizado entre 1150 y 1350°C, descomponiendo la materia en H₂, CO, CO₂, CH₄ junto con otros compuestos considerados impurezas. Uno de los principales será el H₂S, el cual es procesado para separar el hidrógeno del azufre (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(pp.103-104). La reacción de oxidación es incompleta y de forma genérica vendría a ser algo así:



Por el que se obtiene un gas de síntesis, este CO podrá ser procesado en otra etapa de reacción de desplazamiento del gas de agua, para obtener una eficiencia mayor igual que en los casos anteriores.



tras esto se separarían los gases en una etapa de purificación y serían almacenados.

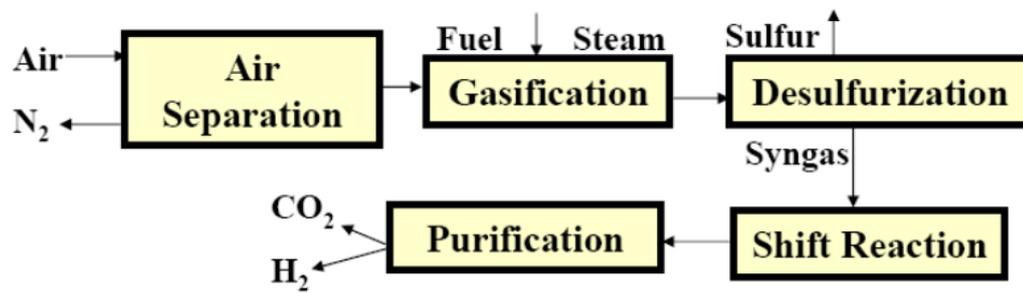
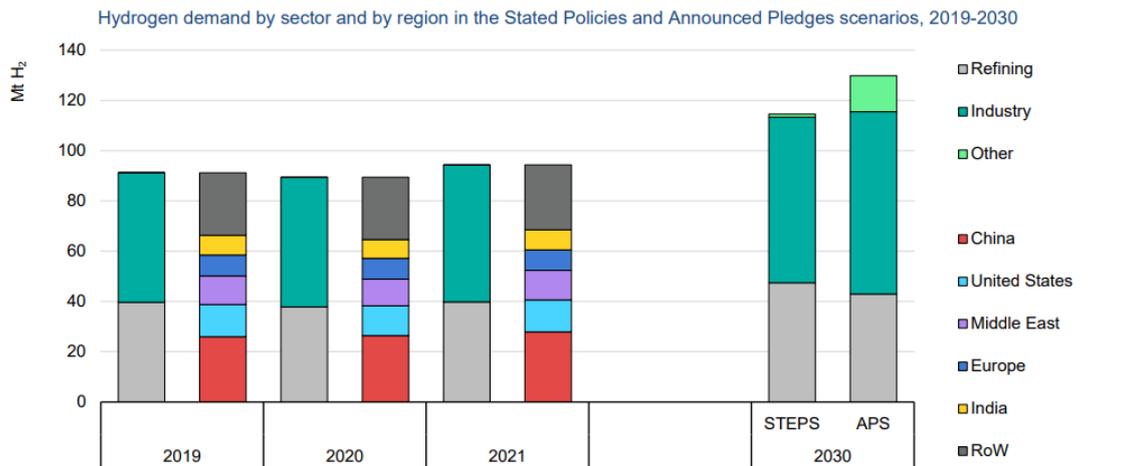


Ilustración 7 Diagrama de flujo de oxidación parcial de hidrocarburos. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)

1.2 Contexto

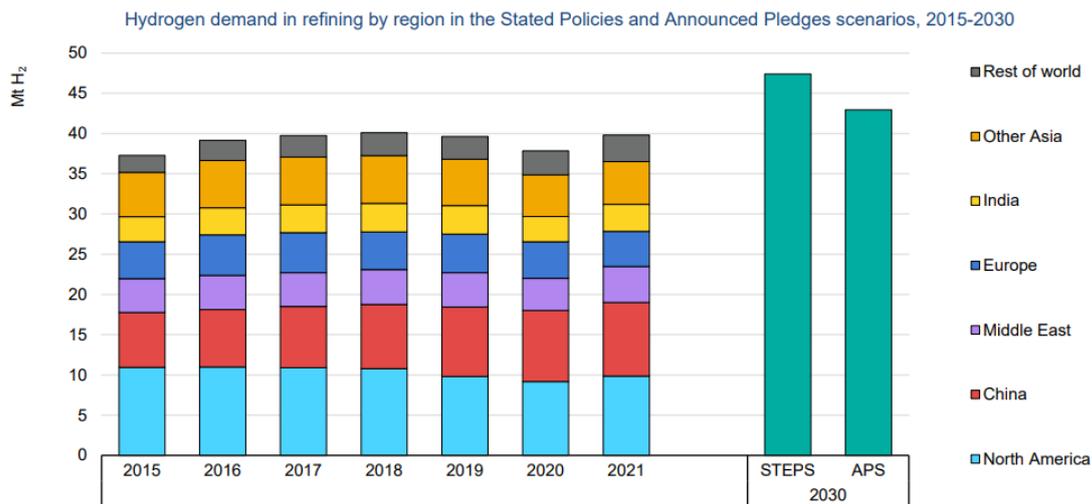
El consumo mundial de hidrógeno estaría sobre los 95 millones de toneladas según los datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) en su documento Global hydrogen review 2022. (IEA, 2022)



IEA. All rights reserved.
Notes: Mt H₂ = million tonnes of hydrogen; STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario. *Other* includes transport, buildings, power generation sectors and production of hydrogen-derived fuels and hydrogen blending.

Gráfica 1 Consumo mundial de hidrógeno. Fuente: (IEA, 2022)(p.18)

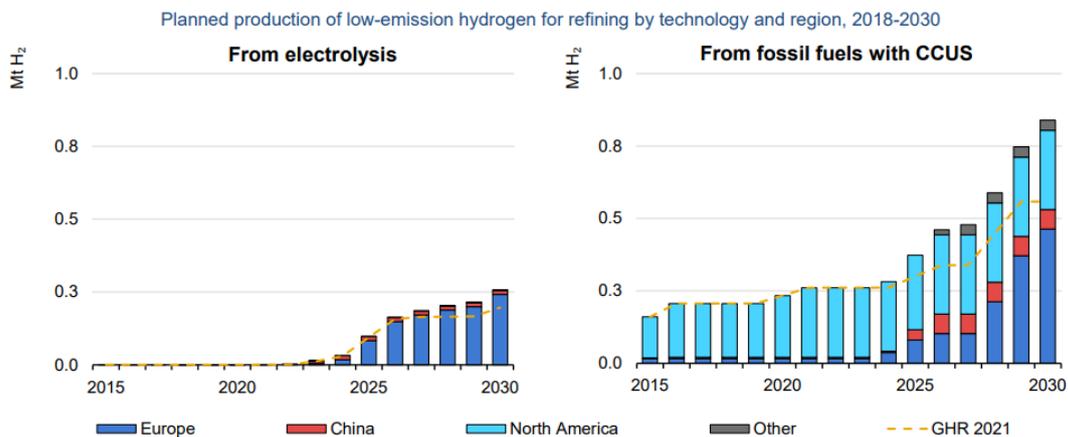
Con respecto al refinado los usos por zonas geográficas para el refino de combustibles son los siguientes.



Notes: STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario. Demand includes the use of hydrogen produced in refineries as a by-product of catalytic reformers. IEA. All rights reserved.

Gráfica 2 Demanda de hidrógeno por zona geográfica para el refino. Fuente: (IEA, 2022)(p.21)

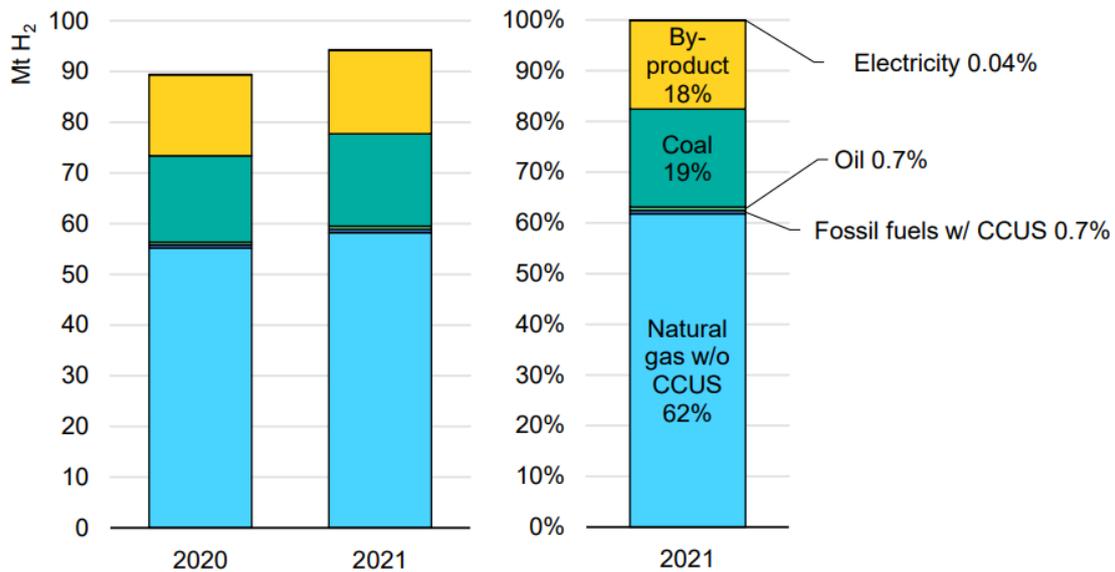
La procedencia del hidrógeno por electrolisis prácticamente no llega ni a lo testimonial. La captura de carbono que se realiza de fuentes fósiles es muy baja, aproximadamente del 0,3%, seguramente relacionada a usar el CO2 como reactivo o producto en otros procesos como podría ser un reformado catalítico por vapor.



Notes: CCUS = carbon capture, utilisation and storage. GHR 2021 = Global Hydrogen Review 2021. Only planned projects with a disclosed start year of operation are included. Projects at a very early stage of development, such as those in which only a co-operation agreement among stakeholders has been announced are not included. GHR 2021 shows the estimated production of low-emission hydrogen from projects that were included in IEA Hydrogen Projects Database as of August 2021. Source: IEA Hydrogen Projects Database (2022). IEA. All rights reserved.

Gráfica 3 Consumo de hidrógeno de fuentes verdes y con captura de hidrógeno. Fuente: (IEA, 2022)(p.23)

Hydrogen production mix, 2020 and 2021



IEA. All rights reserved.

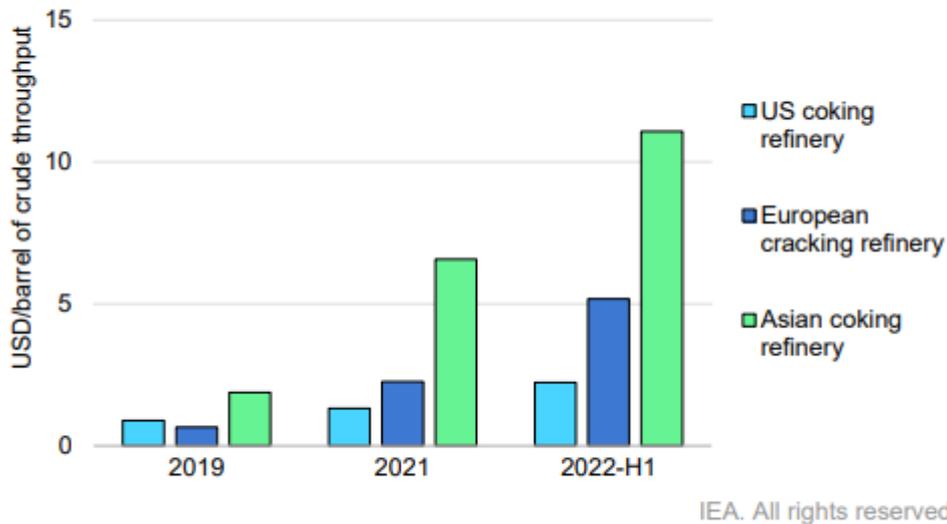
Note: CCUS = carbon capture, utilisation and storage.

Gráfica 4 Producción de hidrógeno por materia prima. Fuente: (IEA, 2022)(p.71)

En la gráfica 6 se aprecia mejor que la electrolisis representa únicamente el 0,04% a nivel mundial y que la fuente más barata es la más usada, el gas natural. Otros procesos obtienen hidrógeno como By-product, es decir coproducto, de un proceso en el que sería un desecho de no haber un aprovechamiento. Buena parte de ese 18% pueden ser las columnas de destilación de refinería.

Los costes del hidrogeno pueden verse reflejados en el aumento de los carburantes, como se aprecia en el gráfico 7, donde se ve la relación directa del comienzo de la guerra de Ucrania y las crisis del COVID-19. Lo que da a entender de qué materia prima se produce la mayor parte del hidrógeno.

Cost of hydrogen for processing crude oil in different types of refineries

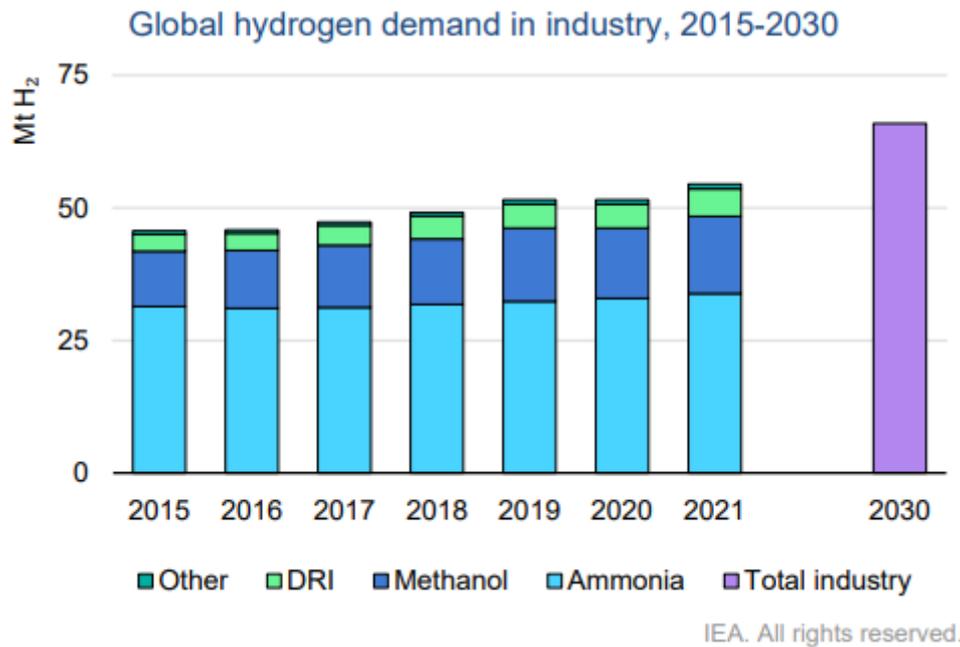


Note: 2022-H1 = first-half of 2022.

Gráfica 5 Coste de procesamiento del barril de petróleo en distintas refinerías. Fuente: (IEA, 2022)(p.25)

Los usos industriales se dividen de la forma siguiente, el Amoniaco suele estar fuertemente relacionada con la industria de los fertilizantes y la química. El metanol también relacionado con la química, pero tiene más usos como disolvente comercial y otros. En DRI han hecho un cajón de sastre donde han incorporado todos los usos metalúrgicos del hidrogeno, muy usado como gas de protección en recocidos, en procesos de soldadura, tanto como gas protector como gas de consumo para producir la fuente de calor. Como agente reductor del hierro también tiene uso, pero principalmente se usa el coque o el gas natural, mucho más económicos y seguros de manejar.

Se hace extraño que no se incluya a la electrónica o el sector aeroespacial, que en 1990 ocupaban el 9% y el 3% respectivamente (ISO/TC 197, 2005) (p. 7). Es de suponer que en los procesos litográficos actuales tengan predilección por el vacío. En aeronáutica se entendería que en la cohetería se haya optado por propergoles provenientes del queroseno por economía y poder hacer depósitos de paredes más delgadas y ligeras que los destinados a hidrogeno líquido, aunque el peso del carburante dudo que compense el peso del depósito. Debe ser únicamente por el coste del combustible.

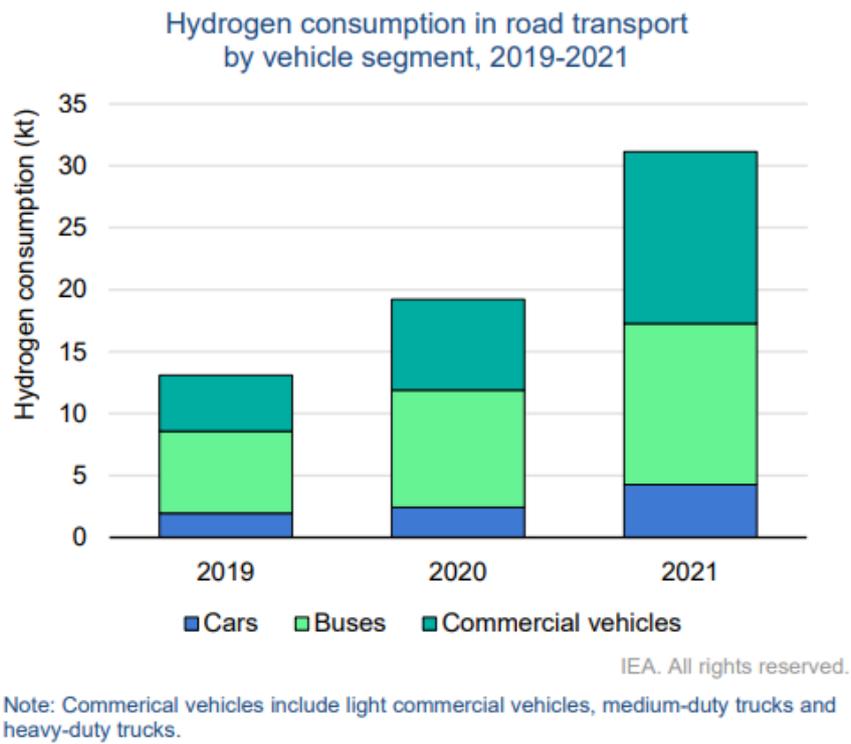


Gráfica 6 Demanda industrial por aplicación. Fuente: (IEA, 2022)(p.29)

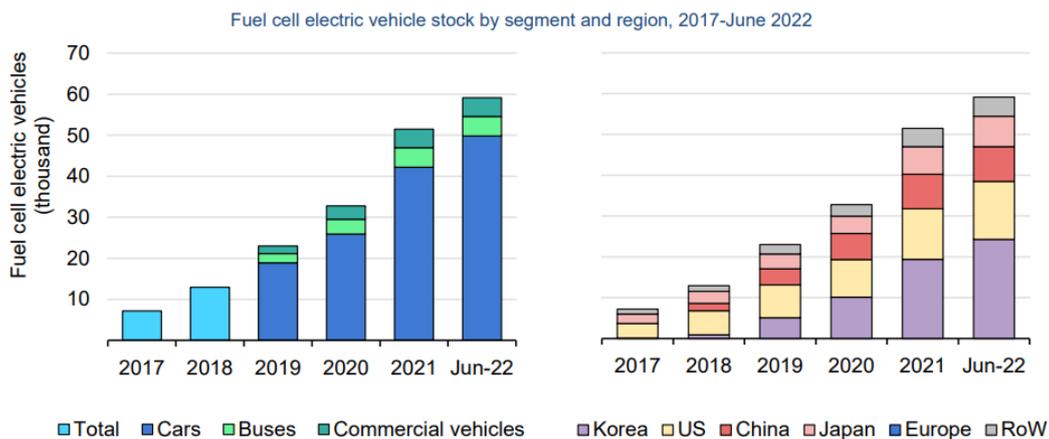
La demanda en hidrogeno en carretera si ha aumentado mucho y lo hace de forma muy acelerada, más que doblándose en dos años, Una suposición es que este aumento proviene en su mayor parte del transporte público y vehículos comerciales, pero ambos ligados a instituciones gubernamentales que tienen planes de reducción de emisiones, al igual que los turismos. Ya que la flota de turismos a nivel mundial es muy escasa, unos 50.000 turismos, 2.500 autobuses y 2.500 vehículos comerciales. Por no hablar que el 85% del consumo de esas 50.000 toneladas va destinada a autobuses y vehículos comerciales. Esta adopción de vehículos de cero emisiones solo puede estar relacionada con flotas gubernamentales o con prohibiciones por zonas de bajas emisiones en ciudades y las prohibiciones de circulación a coches contaminantes en determinadas zonas.

El ratio de clientes es muy bajo en las estaciones de servicio de hidrógeno también llamadas coloquialmente hidrolineras o hidrogeneras. Mantener un negocio como una gasolinera con menos de 200 clientes se antoja muy complicado. Con las nuevas leyes del Pacto Verde Europeo sobre contaminación, esta situación cambiara, aunque podría decantarse hacia la electrificación del parque móvil u otra tecnología de biocombustibles.

Debido a ello, este proyecto no ira enfocado al hidrógeno para la movilidad y estará dirigido hacia la pequeña y mediana industria. Ya que la industria pesada tiende a construirse sus propias soluciones, ya sea por medios propios o contratas.



Gráfica 7 Consumo de hidrógeno en el transporte. Fuente: (IEA, 2022)(p.40)

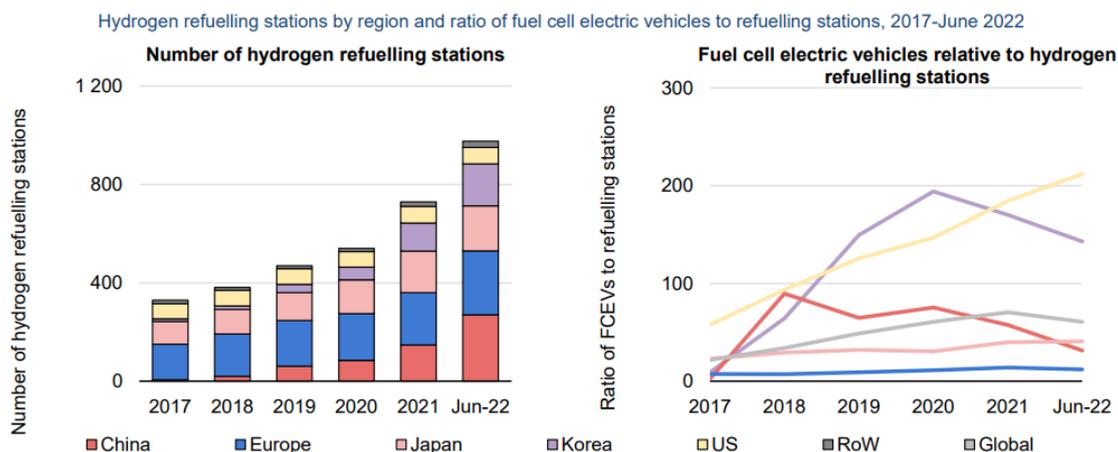


IEA. All rights reserved.

Note: US = United States; RoW = rest of world.

Sources: [Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme](#); [California Fuel Cell Partnership](#); [International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy](#); [US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office](#); [Korea's Ministry of Trade, Industry and Energy monthly automobile updates](#); Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative country surveys.

Gráfica 8 Tipología de vehículos de celda de hidrogeno, Fuente: (IEA, 2022)(p.42)



IEA. All rights reserved.

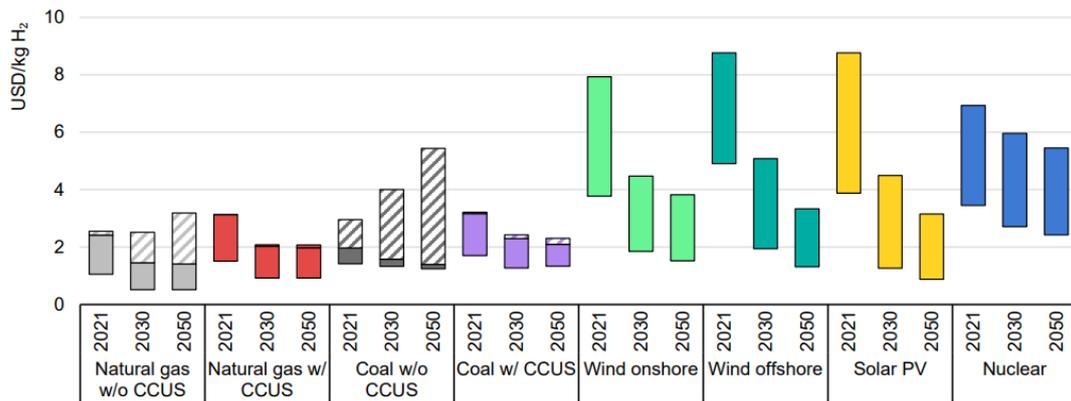
Note: FCEV = fuel cell electric vehicle; US = United States; RoW = rest of world.

Sources: [Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme](#), [International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy \(IPHE\)](#), Clean Energy Ministerial (CEM) Hydrogen Initiative (H2I) country surveys.

Gráfica 9 Número de estaciones de servicio y ratio de clientes. Fuente: (IEA, 2022)(p.46)

Los costes del hidrogeno representan otro factor a tener en cuenta para selección de fuentes de producción. Pero esta grafica no tiene en cuenta los recientes aumentos generalizados de los carburantes fósiles, a excepción del gas natural que parece volver a precios de 2019 desde inicios de este año 2023, por lo que se mantiene como la fuente más barata. (Investing, 2023).

Levelised cost of hydrogen production by technology in 2021 and in the Net Zero Emissions by 2050 Scenario, 2030 and 2050



IEA. All rights reserved.

Notes: Ranges of production cost estimates reflect regional variations in costs and renewable resource conditions. The dashed areas reflect the CO₂ price impact, based on CO₂ prices ranging from USD 15/tonne CO₂ to USD 140/tonne CO₂ between regions in 2030 and USD 55/ tonne CO₂ to USD 250/ tonne CO₂ in 2050.
Sources: Based on data from McKinsey & Company and the Hydrogen Council; Council; IRENA (2020); IEA GHG (2014); IEA GHG (2017); E4Tech (2015); Kawasaki Heavy Industries; Element Energy (2018).

Gráfica 10 Costes de producción de hidrógeno por origen. Fuente: (IEA, 2022)(p.92)

Esta grafica 12 está realizada en base a costes, a esto se le debe añadir, transporte, impuestos a carburantes en el caso de la movilidad, gastos fijos y variables en personal, suministros y demás, beneficio industrial, impuestos sobre beneficios, IVA, etc... Teniendo un precio departida de costes a 4US\$ y un precio medio de 6US\$ según la gráfica del IEA para los casos de hidrogeno renovable (IEA, 2022). Con el alza de los precios de los hidrocarburos comienza a ser una opción viable en automoción frente a gasóleo y gasolina, no así frente al gas natural comprimido y la electricidad según los datos del Ministerio para la transición ecológica y el Reto

demográfico (MITECO) a fecha del 21 de agosto de 2023, los cuales se pueden ver en la tabla bajo estas líneas (MITECO, 2023).

INFORMACIÓN COMPARATIVA SOBRE COSTE DE LOS COMBUSTIBLES DE AUTOMOCIÓN (€/100KM)	
Gasolina 95 E5	9,98 €/100km
Gasóleo A	7,32 €/100km
GNC <small>Gas natural comprimido</small>	4,48 €/100km
GLP <small>Gas licuado del petróleo</small>	8,08 €/100km
Electricidad <small>Recarga doméstica</small>	2,28 €/100km
Electricidad <small>Recarga rápida</small>	7,28 €/100km

Tabla 2 Tabla de precio por 100km recorridos por combustible. Fuente: (MITECO, 2023)

Por ultimo hay que nombrar los famosos colores del hidrógeno.

El pantone del hidrógeno

Tipos según la tecnología empleada en su producción

Autor: Álvaro Merino (2022)
*El hidrógeno amarillo también puede referirse a aquel que es generado con fuentes mixtas

	NEGRO	MARRÓN	GRIS	AZUL	TURQUESA	ROSA	VERDE	AMARILLO	BLANCO
Fuente de energía 	Carbón bituminoso	Lignito	Hidrocarb. (gas natural principalmente)	Hidrocarb. (gas natural)	Hidrocarb. (gas natural)	Energía nuclear	Renovables	Energía solar*	Presente de por sí en la naturaleza
Proceso más usado 	Gasificación de carbón	Gasificación de carbón	Extracción con vapor (reformado)	Extracción con vapor	Pirólisis (descomposición mediante calor)	Electrólisis (separación mediante electricidad)	Electrólisis	Electrólisis	En exploración
Emisiones asociadas 	Muy altas	Muy altas	Altas	Medias (incluye sistemas de captura de carbono)	Bajas (carbón sólido sin CO ₂)	Bajas	Bajas o nulas	Bajas o nulas	Nulas
	Tipos que emplean combustibles fósiles			El hidrógeno gris y azul son los más producidos en la actualidad		El hidrógeno rosa, verde y amarillo son los más eficientes y factibles de desarrollar a medio plazo			



Ilustración 8 Colores del hidrógeno. Fuente: (Merino, 2022)

Ya que son mencionados muy a menudo por la prensa especializada en energía no podríamos dejarlos sin mencionar. El color determina la forma de

producción por fuente energética y materia prima. El 15 de enero de 2020 la Comisión Europea aprobó el Pacto Verde Europeo (European Green Deal) (Wikipedia, 2023g). Implica “reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % de aquí a 2030, en comparación con los niveles de 1990” según se cita en la página de la comisión europea ((Comisión Europea, s.f.)). Para lograrlo, se pretende descarbonizar la industria de altas emisiones, el transporte y otros sectores de grandes insumos de hidrocarburos, llegando a eliminar las emisiones de turismos en 2035 (Comisión Europea, s.f.).

1.3 Objetivos y alcance del trabajo

Los objetivos del trabajo presentado serían cubrir las necesidades de almacenamiento a pequeña escala industrial, haciendo uso de estándares comunes, como presión de almacenamiento a 200bar y distribución para distintos usos a 10 bar, aunque serían fácilmente adaptables a presiones mayores mediante un uso paralelo de otro regulador de presión.

Las industrias a las que va enfocado serían industria metalúrgica; pensada más bien para talleres de soldadura y/o con cámaras de recocido, industria alimentaria de mediana escala, industria química dependiendo de los insumos de hidrógeno, En industria farmacéutica y en electrónica.

El alcance del trabajo se limitará al diseño y los cálculos del cuerpo de la bomba, y de su almacenamiento, aunque se describirán de manera superficial el resto de elementos. No se describirá de forma detallada el resto de accesorios por limitaciones de tiempo.

Se cumplirá con la legislación vigente y se intentará encontrar y cumplir con los estándares constructivos más usados.

También será la intención del proyectista hacer uso de materiales de calidad y perdurables en el tiempo y uso. Aunque valorando las alternativas.

1.4 Beneficios que aporta el trabajo

La bomba aportaría el beneficio de desperdiciar menos hidrógeno gracias al sistema de recuperación de las fugas de hidrógeno de la contra cámara de los cilindros y del espacio entre cámaras de compresión del eje, que separa fugas de hidrógeno y líquido.

Se usa agua destilada como líquido hidráulico para que la contaminación producida al hidrógeno de recuperación sea mínima y no envenene potencialmente equipos como celdas de combustible o hidrolizadores reversibles. Al usar agua sería posible usar deshumidificadores más sencillos que si fuesen para otros fluidos.

Los materiales de acero austenítico AISI S316L minimizan los riesgos de fuga, incendio y explosión, gracias a su bajo contenido en carbono se minimiza el daño por agrietamiento intersticial por formación de carburos de cromo en las zonas de las soldaduras (Rodríguez Galbarro, s.f.) (Material Mundial, s.f.); generados por el ataque químico del hidrogeno en otros tipos de acero. La incorporación de Molibdeno a esta familia de aceros los hace muy resistentes también a daños por picaduras químicas y otros tipos de corrosión.

Se han elegido materiales para evitar la corrosión galvánica, que podría aparecer fácilmente en materiales de aluminio, especialmente en los botellones en contacto con el acero del palé. Pero también en las juntas de arandela de racores con otros elementos como válvulas, la propia bomba u otros elementos (Swagelok, s.f.).

Las pérdidas por rozamiento se han intentado minimizar al mismo tiempo que se ha intentado maximizar la estanqueidad de la cámara de compresión gracias al desarrollo de un nuevo sistema de segmentos de doble escalonado desarrollado en este trabajo, también se prueban materiales no usados para este fin en otras máquinas comerciales. Por este motivo, este último punto no se podrá saber a ciencia cierta si es un logro o una decepción hasta no ensayarse de forma adecuada y comprobar su vida útil real.

Es muy difícil encontrar precios de este tipo de máquinas, por la política empresarial de revelar precios a la competencia y poder negociar con sus clientes. Pero se entiende que los precios del presupuesto orientado a coste de producción no son descabellados. Teniendo en cuenta que bombas de 500 bar cuestan 500.000€ y 1.000.000€ a 1000bar, solo la bomba y todos sus equipos auxiliares, sin almacenamiento (Gaitan, 2023)(min.22-23). Es una de las pocas referencias que se han podido encontrar, aunque pertenece a una gama totalmente distinta de producto y mucho más exclusiva. El precio no debería guardar una relación directa con el presupuesto de este proyecto. Pero sí estará más en línea con una estación de servicio de hidrógeno en Huesca ubicada en el parque tecnológico Walga desde junio de 2021, con suministro a 200 y 350 bar con una inversión de alrededor de 800.000€ (Márquez Gil, 2001)(p.24), teniendo en cuenta que en este caso hay muchos gastos asociados a otros sistemas.

La máquina está pensada para poder producir 50 kilos de hidrógeno en menos de 5 horas y 6 minutos a 200 bar continuos, por si hubiera una necesidad continua de gas a esa presión y para poder aprovechar la energía solar, ya que partiendo de una menor presión como 30 bar se lograría llegar a esos 50 kg y 200bar en un menor tiempo, unas 4 horas y 50 minutos. Lo que permitiría el uso de energía solar. Algo muy beneficioso en lugares aislados donde pueda ser difícil o muy caro la instalación de una acometida eléctrica de la potencia necesaria.

1.5 Análisis del estado del arte

Explicaremos directamente las opciones que están disponibles o al menos las más conocidas y prácticas, tanto para el almacenamiento del hidrógeno y su compresión, que es lo que nos atañe.

1.5.1 Tecnologías de almacenamiento.

1.5.1.1 Gas comprimido

Es la tecnología más común y económica de almacenaje a pequeña escala, suele desarrollarse en envases metálicos con forma de bombona alargada llamadas botellas o botellones según el tamaño. También se usa en vehículos propulsados por hidrogeno, salvo alguna excepción de hidrogeno líquido de BMW.

Suele hacerse una categorización por tipos de depósitos, está basada en lo materiales de construcción y son los siguientes tipos:

- Tipo I: El tradicional envase metálico fabricado en acero, normalmente en forma de botella. No suelen superar los 200bar y son muy pesados. Suelen usarse para labores de soldadura en sus versiones más ligeras y de menos capacidad o bien en talleres mediante un circuito de distribución desde una zona de almacenaje (TresCantos, 2023).
- Tipo II: Depósitos de aluminio reforzados con fibras de vidrio o carbono aligerando su peso. Suelen alcanzar presiones superiores. Su uso suele ser para gas natural en vehículos, el llamado GNC, gas natural comprimido (TresCantos, 2023).
- Tipo III: Depósitos de capa metálica delgada y ligera llamada liner, recubierta de fibras de carbono, vidrio u otras. Juntos estos materiales forman un composite o material compuesto que soporta bien los esfuerzos a tracción al que le somete la presión. Suelen soportar presiones de 700bar en vehículos. El aluminio es usado

para evitar la difusividad del hidrogeno y que no se escape por difusión tan fácilmente a través de la matriz epoxi de las fibras (TresCantos, 2023).

- Tipo IV: Como los de tipo III pero sin liner metálico, pasa a ser un liner polimerico. Las presiones soportadas son aproximadamente las mismas, pero presentan más fugas por difusión y son más inseguros debido a ello. Presentan menos ciclos de carga debido a la fatiga del material (TresCantos, 2023).
- Tipo V: Se prescinde completamente del liner y se fabrica íntegramente en materiales compuestos, por uso de materiales de alta densidad para la matriz de las fibras, con ello se baja la difusividad intersticial del hidrógeno (TresCantos, 2023).

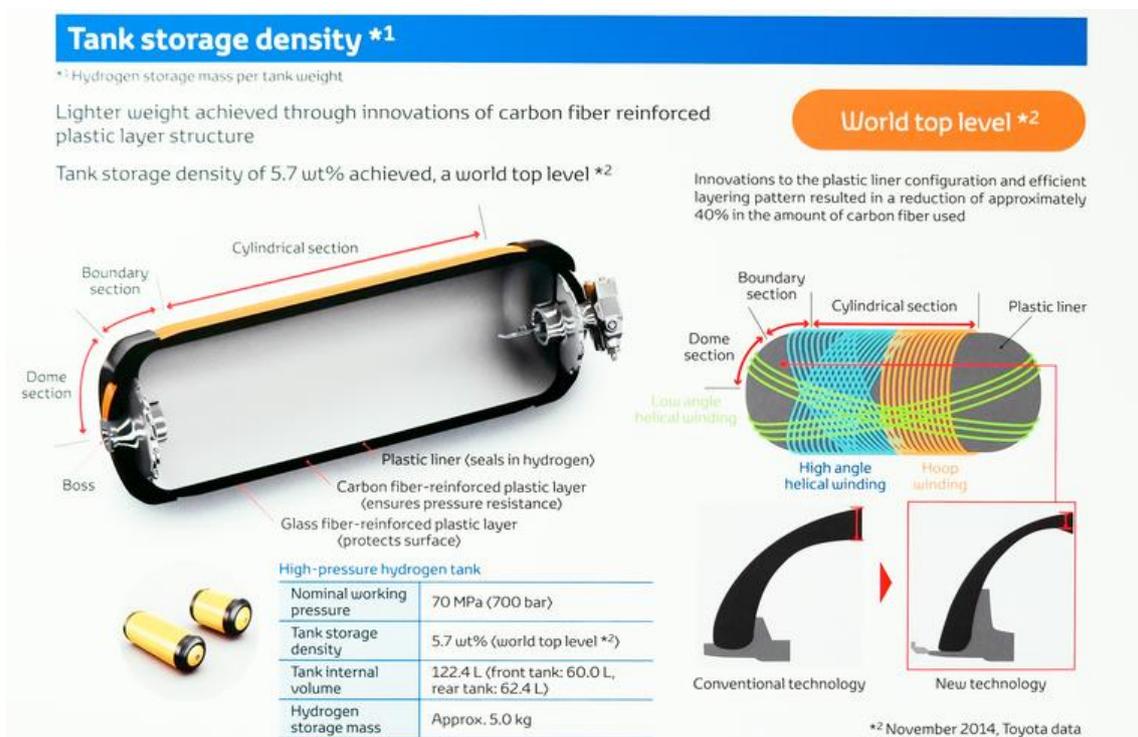


Ilustración 9 Depósito de Toyota Mirai. Fuente: (Apilados, 2017)

Los depósitos de tipo I son muy pesados para los vehículos y los de polímero tienen fecha de caducidad. Usualmente 15 años según lo visto en las tapas de depósito de algunos vehículos de hidrógeno.

Según la tesis doctoral presentada por Doña Rosa Ocaña López, (2017) los compuestos epoxicos incluso podrían tener una degradación mucho más acelerada de la predicha. Aunque el trabajo está enfocado a adhesivos estructurales, Los compuestos son los mismos. Por los datos que presenta en su tesis, esos 15 años para materiales epoxicos, tal vez sea muy optimista.

Los envases de acero también pueden presentar problemas por su contenido en carbono, ya que el hidrogeno ataca esos enlaces formando carburos de cromo y abriéndose paso a través de los intersticios que genera. En

este tipo de depósitos de aceros al carbono se hace imprescindible un liner de protección, al igual que en los de aluminio por la degradación química del material con el hidrogeno a largo plazo.

1.5.1.2 Hidrógeno líquido/criogénico

Es el sistema de almacenamiento más factible para grandes cantidades de hidrogeno como las dadas en una refinería, industria química, de alimentación o siderúrgica. Su tamaño suele ser grande y necesitan mantenerse a temperaturas entre 13 y 20K en función de la presión podría llegar a un máximo de 33K con presiones superiores a 20 bar, pero sería peligroso por una gasificación inmediata.

Este sistema consume mucha energía para su refrigeración que se suele realizar mediante sistemas Linde-Hampson. Ya que hay que refrigerar el hidrógeno por debajo de los -70°C para poder enfriar el gas por laminación (Sistema de Linde-Hampson, 2023h).

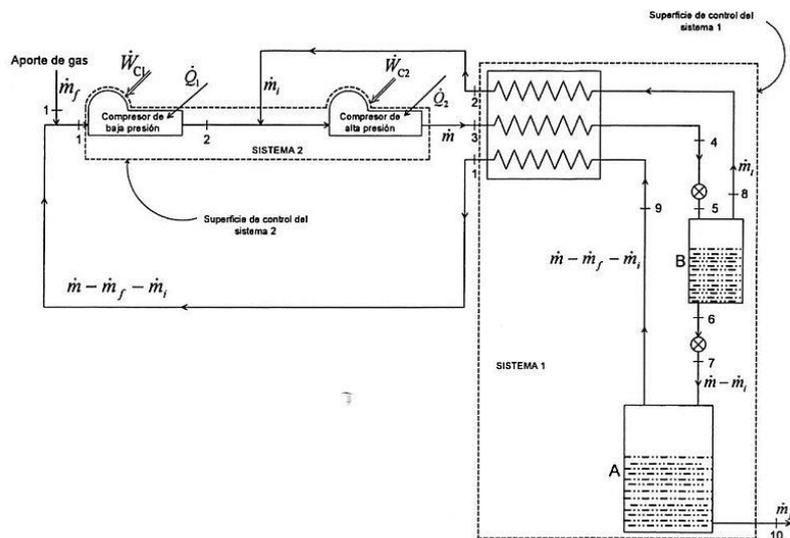


Ilustración 10 Sistema de Linde-Hampson dual. fuente: (SISTEMA DE LINDE-HAMPSON, 2023H)

El hidrógeno necesita enfriarse por debajo de esos -95°C para llegar al punto de inversión de Joule-Thomson y no calentarse al expandirse, para así poder refrigerarse por debajo de los 20 Kelvin (Fdez-Bolaños Badía,

2005)(p.130). En otros gases este efecto se da a mayores temperaturas. Al necesita refrigeraciones en cascada por medio de nitrógeno líquido u otros gases, el proceso consume mucha energía y lo hace mientras esté almacenado, por tanto, no son depósitos de almacenamiento a largo plazo, son para insumos rápidos, es decir, de trasiego o para insumos en grandes cantidades.

Una de las mayores críticas del sistema es su alto consumo energético, debido a los costes de criogenización. Para ilustrar mejor lo que supone, se presenta el diagrama densidad-temperatura de BMW, cuando lanzo su vehículo con depósito de hidrógeno líquido.

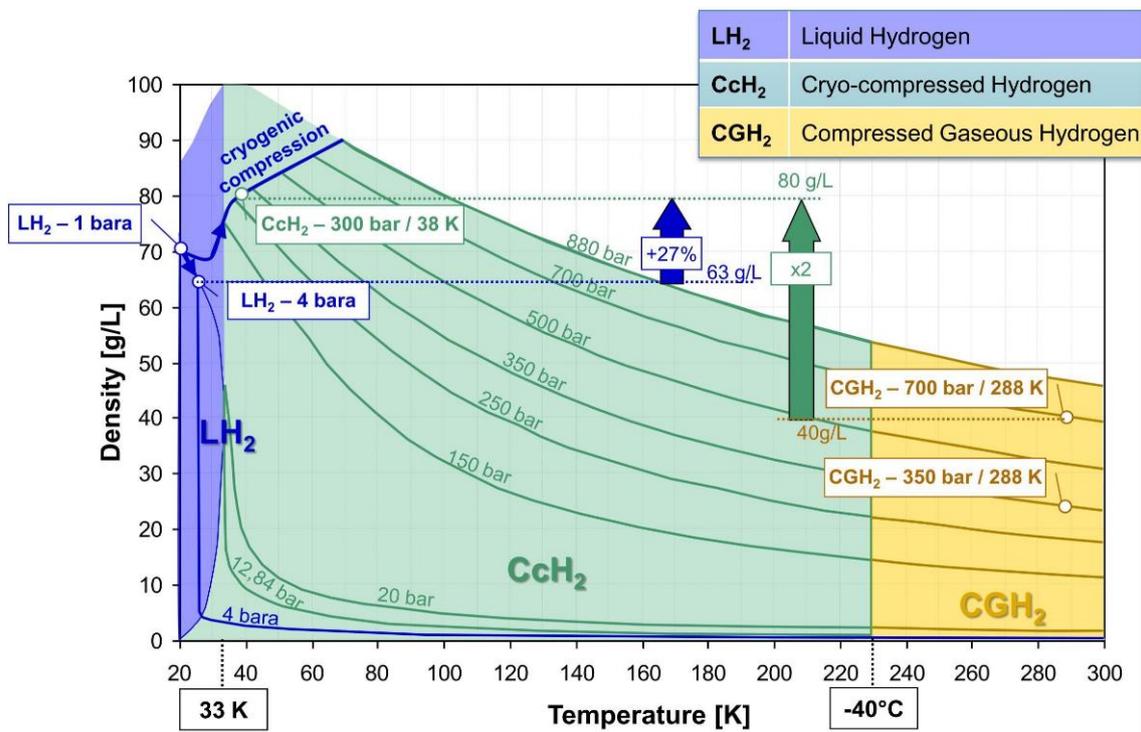


Ilustración 11 Diagrama densidad-temperatura de BMW. Fuente: (Kunze, 2011)

1.5.1.3 Hidruros metálicos

Hay muchas soluciones propuestas para los hidruros metálicos y aunque todas son válidas, adolecen del mismo problema, consumen mucha energía para capturar el hidrógeno y también para liberarlo. Su principal utilidad viable sería el

almacenamiento a largo plazo, una utilidad que sí puede resultar más práctica que otros sistemas (Pérez, 2022).

En la siguiente tabla pueden verse las densidades que son capaces de obtenerse mediante estas tecnologías.

Material	Densidad gravimétrica (% masa)	Densidad volumétrica (kg/m ³)
H₂ gas a 700 bar	100	50
H₂ líquido	100	70
LaNi₅	1.5	120
FeTi	1.5	110
MgH₂	7.6	105
LiH	12.6	100
NaAlH₄	7.5	95
NH₃BH₃	19.6	100
LiBH₄	18.4	120

Tabla 3 Densidades gravimétricas y volumétricas de distintos hidruros metálicos y químicos. Fuente: (Pérez, 2022)

1.5.1.4 Hidruros químicos

Son compuestos que liberan hidrógeno por medio de una reacción química al mezclarse con agua. Unos ejemplos se pueden ver en las siguientes reacciones. La reacción inversa es el reciclado (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.138-142).

<u>Hidruros químicos y sus densidades gravimétricas</u>	
<u>Reacciones químicas</u>	<u>Densidad gravimétrica, %H₂</u> (Hydride Only)
$\text{CaH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 2 \text{H}_2$	9.6%
$\text{MgH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Mg(OH)}_2 + 2 \text{H}_2$	15.3%
★ $\text{LiH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{LiOH} + \text{H}_2$	25.2%
$\text{LiBH}_4 + 4 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{LiOH} + \text{H}_3\text{BO}_3 + 4 \text{H}_2$	37.0%
$\text{NaBH}_4 + 4 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NaOH} + \text{H}_3\text{BO}_3 + 4 \text{H}_2$	21.3%

Tabla 4 Reacciones químicas de hidruros químicos. Fuente: (Fdez-Bolaños Badía, 2005)

Como los hidruros metálicos, consumen mucha energía para ser reciclados o llenados de hidrogeno, pero son bastante estables, algunos compuestos como el hidruro de litio se encuentran disponibles en pastas denominadas slurry. (Fdez-Bolaños Badía, 2005)(p.138-142)

1.5.1.5 Nanoestructuras de carbono

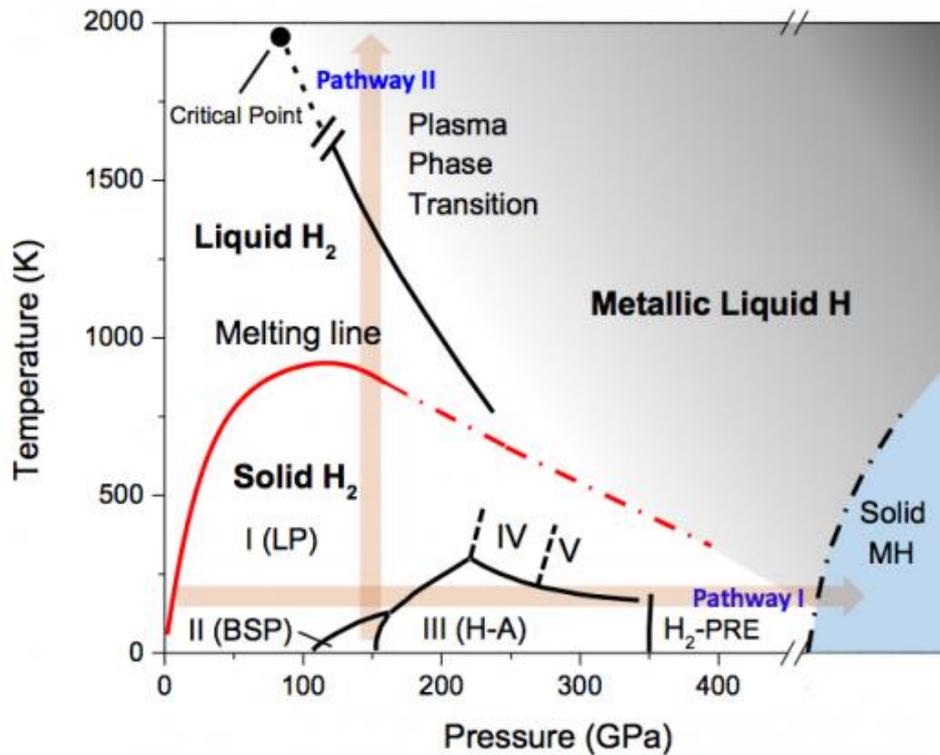
Son estructuras capaces de capturar átomos de hidrógeno por absorción, se suponen de bajo coste y baja presión, con materiales económicos como el grafito, pero los ensayos demostraron rendimientos muy pobres en esos sistemas de captura (Martín-Gil & Martín-Gil, 2005).

1.5.1.6 Almacenamiento en trampas de hidrocarburos.

Se plantea almacenar hidrogeno en minas y antiguas trampas de hidrocarburos, como se hace con el gas natural, aunque su difusividad es mucho más alta que la del gas natural, por tanto, no se conoce bien el resultado hasta experimentarse bien la técnica y que estructuras geológicas

funcionarían bien como sello, una prueba de que posiblemente funcione son los yacimientos naturales de hidrogeno (TresCantos, 2023).

1.5.1.7 Hidrogeno metálico



Gráfica 11 Gráfica P-T de hidrógeno metálico sólido y líquido. Fuente: (Wang, 2016)

La propuesta de este nuevo concepto es comprimir hidrógeno para conseguir hacerlo un sólido metálico. Es requerida una presión de 495 gigapascales, por lo que es una empresa complicada y muy costosa energéticamente. Pero se estudia para su uso en cohetes por el potencial de aligerar los cohetes y proporcionar más impulso (Amos J. , 2017).

1.5.2 Bombas

Los únicos diseños de bombas que se encuentran con cilindros secos son bombas de membrana, de émbolo unidas a cigüeñal o con doble cámara, también hay diseños de émbolos similares al aquí presentado, pero con otros diseños, suelen usarse en estaciones de servicio de hidrógeno, también conocidas popularmente como hidrolineras o hidrogeneras. Todos los modelos son válidos para su uso en estos grados de pureza de hidrógeno.

1.5.3 Segmentos

1.5.3.1 Materiales

Los segmentos que se han encontrado no se adaptaban a las necesidades buscadas para este proyecto, por lo que se ha tenido que buscar alternativas en investigación.

Las alternativas encontradas eran anillos o segmentos de caucho, teflón y grafito.

Conociendo que únicamente la compresión del hidrogeno de 30 a 200bar produciría 240°C redondeando, más el calor que produzcan ellos mismos por fricción, en primer lugar, no hace adecuados los segmentos de teflón, por causa de su baja temperatura de plastificación a 270°C (Politetrafluoroetileno, 2022). Con los anillos de caucho pasa lo mismo, hasta donde conozco, si no se le añaden materiales el caucho se conforma entre 140 y 160°C (Caucho, 2023b) (Ciencia de Hoy, s.f.), tal vez los cauchos sintéticos tengan mejores prestaciones en temperatura, al menos en neumáticos no difieren mucho en sus temperaturas. Por eso muchos fabricantes de equipos compresores escalonan, la compresión en fases, para poder introducir este tipo de sellado.

Por último, existen los anillos de grafito, pero su vida útil parece ser un misterio, se encuentran fabricantes como Lidering (s.f.), que prometen altas

velocidades, pero van más destinados a sellos, no parecen poder abrirse, por tanto requeriría hacer una maquinaria totalmente nueva y muy distinta a esta bomba.

También están los recubrimientos de grafito de los segmentos o de esférulas de carbono, pero parecen todos pensados para trabajar en condiciones de lubricación.

Por lo que mi única opción ha sido optar por la vía experimental de los segmentos de acero de fundición con recubrimiento de disulfuro de molibdeno y DLC (diamond like carbón), puede ser necesario dopar la capa de DLC con nanopartículas de trióxido de tungsteno para lograr mejor adherencia entre el sustrato metálico y la película, además de bajar la fricción (Guasumba-Maila, Oramas-Proaño, Sáez-Eraza, & Granda-Fuel, 2021). El disulfuro de molibdeno es un lubricante sólido muy vendido para muchas aplicaciones. Se puede vender en polvo, pasta o incluso mezclado con polímeros para cubrir superficies y que presenten lubricación, las matrices de estas pinturas suele ser en base epoxi, pero hay otros polímeros. El DLC es un carbono amorfo, que aporta dureza como material de matriz y un coeficiente de rozamiento muy bajo sobre acero pulido, entre 0,05 y 0,2, dependiendo de la calidad de deposición del plasma (Richter Precision Inc., 2023) (Austin, 2020), proceso por el cual también se precipitará el disulfuro de molibdeno. El disulfuro de molibdeno también presenta coeficientes de rozamiento cinético entre los 0,05 y los 0,16, llegando incluso a 0,033 según Noshiro, Watanabe, Sakurai y Miyake (2006) y (Engineers Edge, 2023).

Lo malo de esta última opción es lo mismo de las anteriores, es muy complicado buscar información útil sobre este ámbito. Lo mejor que se logró encontrar fue un estudio con los ensayos de agujas de rodamientos en estándares ASTM (Noshiro, Watanabe, Sakurai, & Miyake, 2006). donde al menos se obtenían coeficientes de rozamiento en seco, pero eran de la versión en pintura epoxi y otros polímeros, Los autores añadían que los daños y el desgaste prematuro podrían deberse al exceso de temperatura que quemó los polímeros en las pruebas y a la presencia de aire.

1.5.3.2 Disposiciones

Existen varias formas de segmentos a partes de los de corte recto a 90° , los mayoritarios y más habituales, pero existen diseños alternativos, como el corte diagonal a 45° y el corte en escalón o escalonado, usados en competición. Ambos están diseñados para reducir las fugas de presión y ser más eficientes (González Calleja, 2022)(p.89) (Competición, 2021)(min.10-12).

En este trabajo se ha querido ir un paso más allá y diseñar un segmento de doble escalón para reducir aún más las fugas de la cámara de compresión a la recámara. El diseño constructivo se puede consultar en los planos con más detalle o en la siguiente ilustración

El escalón superior trata de taponar el paso del aire por la luz del segmento desde la parte superior, el escalón lateral es para evitar las fugas por la parte cara interna del segmento y el hueco entre él y el émbolo.

Esto evita tener que hacer ajustes muy precisos y muchos ensayos empíricos. Lo que ahorraría dinero en el desarrollo.

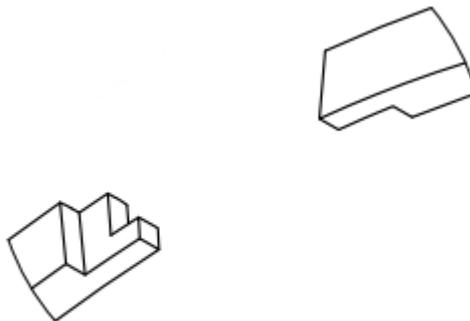


Ilustración 12 Detalle de segmento de doble escalonado.

1.6 Análisis de alternativas

En cuanto al almacenamiento solo consideraremos dos alternativas viables por durabilidad, depósitos de acero AISI S316L y de otros materiales metálicos con liner. Los envases con composite no son un método de conseguir una vida útil duradera ni segura. Una preocupación en el mundo industrial y que puede acarrear accidentes y muertes.

La elección será el Acero austenítico por primar la seguridad y perdurabilidad en el tiempo, aunque el precio a pagar es el coste económico y el peso.

En lo referente a la bomba, se considera que, si las electrolineras usan esos tipos de bomba, alguna ventaja debe tener. Por lo que he podido calcular y comparar, esa ventaja es el consumo de energía. También la sencillez constructiva es un factor a su favor. Las demás bombas tienen más elementos móviles y mecanizados más precisos que encarecen el coste. Aunque esta bomba requiere de otra auxiliar que le aporte la energía en forma de fluido de trabajo a alta presión. Y por lo poco que he podido ver en precios, una bomba de esas características está en el entorno de los 9.000 a 12.000€ es un coste a tener en cuenta, al que habrá que sumarle motores eléctricos, muy probablemente de automóvil para que se adapte a la potencia cambiante del ciclo. Al ser un motor DC (corriente continua) su regulación mediante el MCU (motor control unit) será más sencilla. Pero esa labor recaerá en un técnico especializado. Los costes para el motor DC vistos en Alibaba.com son dispares y algunos extraordinariamente bajos, tanto como 1.300€ por el conjunto de motor más MCU. Algo que hace sospechar, se tomará como precio 3.000€ para andar sobre seguro.

En referencia a los segmentos, se ha optado por un desarrollo propio, para la forma y un tratamiento superficial en disulfuro de molibdeno con DLC, ya que

el resto de alternativas no cumplían con unos mínimos requisitos de resistencia material o bien tenían otras funciones.

1.7 Análisis de riesgos

Los riesgos de explosión siempre están presentes en esta tipología de instalaciones, por eso se debe acotar la instalación para evitar accidentes con toros mecánicos u otras máquinas

El personal que realice labores deberá realizar los distintos cursillos de riesgos laborales enfocados a estas situaciones de peligrosidad y elaborar planes de actuación para minimizar el riesgo de accidentes. Así como planes de contingencia y evacuación. Según la entidad del almacenamiento escogido, ya que el diseño pretende ser modular y podría aumentarse el peligro en caso de accidente.

A parte de los riesgos de explosión e incendio, también está presente el de asfixia por desplazamiento del oxígeno, debido a ello, los operarios que se enfrenten a labores de reparación y mantenimiento de estos deberán llevar un detector de hidrógeno. Aunque el hidrógeno tiene una gran difusividad, no sería rara la asfixia que una fuga de cierta entidad.

Se debe instalar tanto la bomba como el almacenamiento en lugares exteriores y bien ventilados, el almacenamiento debe estar apartado y contra un muro de fuego, preferiblemente a una distancia de 15 metros o más, ya que así también se protege a los equipos e instalaciones.

El sistema de almacenamiento del proyecto está considerado como una categoría de almacén 3, cat. CLP2, indicación de peligro H221. Según el Real Decreto 656/2017 MIE APQ-5 el almacenamiento debe tener una separación de 2m a los costados y otros dos metros abierto por encima. Por seguridad se mantendrá más distancia a otros edificios. 15 m a actividades clasificadas de riesgo de incendio y explosión como puede ser la propia instalación de bombeo. 6 m a otros servicios internos de almacén. 10 m a la vía pública, 15 m a los edificios habitados incluyendo talleres u oficinas.

Debe instalarse en la instalación de Bombeo de un buen dispositivo de venteo consistente en rejillas y chimeneas que ayuden a disipar las posibles fugas accidentales de hidrógeno. También debe disponerse de detectores de

hidrógeno en la instalación para activar la ventilación, bloquear la entrada de hidrógeno, activar el cierre automático de válvulas del almacenamiento y de entrada a la bomba desde el hidrolizador y activar la purga del sistema de bombeo eliminando combustible de la instalación.

Las paredes, suelos y techos de la instalación de bombeo y almacenamiento, junto con elementos constructivos como pasacables o recubrimientos, deben ser de materiales con clasificación A1 de reacción al fuego, esto incluye la pintura de los mismos, incluido el palé de los botellones de hidrógeno.

Es necesaria la instalación de medios de extinción en el propio área de bombeo y del almacenamiento para evitar daños mayores, así como medidas preventivas como puentes eléctricos entre las puertas para evitar la formación de arcos eléctricos que formen chispas, instalando con ellos su debida toma de tierra mediante piqueta de puesta a tierra normalizada.

También se habla de daños medioambientales por hidrógeno vertido a la atmósfera que reducirían la desintegración del metano según National Geographic en su artículo Propiedades del hidrogeno (2022), mediante secuestro de radicales hidroxilos (OH) e impidiendo la degradación del metano, siendo este un gas con 27 veces el efecto invernadero del CO₂. La destrucción de ozono indirecta de la atmósfera superior es otro problema generado por la humedad generada entre el hidrogeno y el oxígeno, lo que podría causar la destrucción de ozono en capas altas, según una investigación del Instituto de Tecnología de California (Caltech) en 2006. Otras fuentes en cambio señalan la producción de ozono en niveles bajos de la atmósfera. (Bixler, 2017)

1.8 Descripción de la solución propuesta. Diseño básico

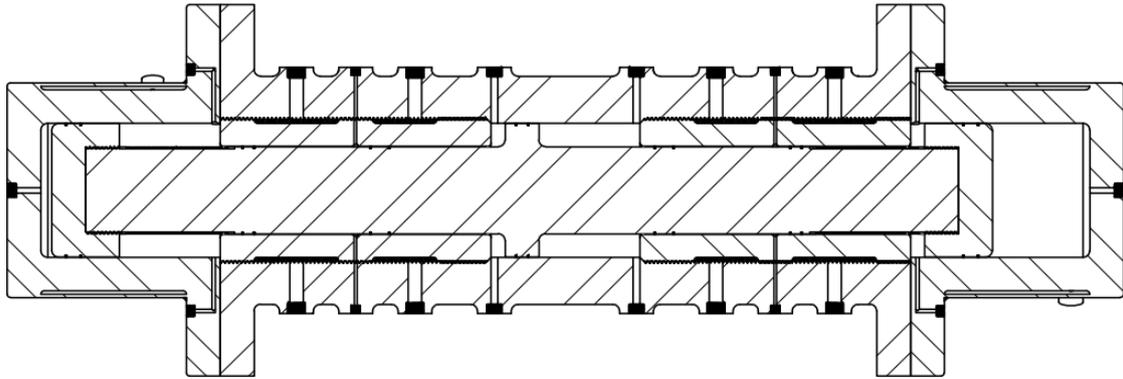


Ilustración 13 Corte de ensamblaje de la bomba de émbolos.

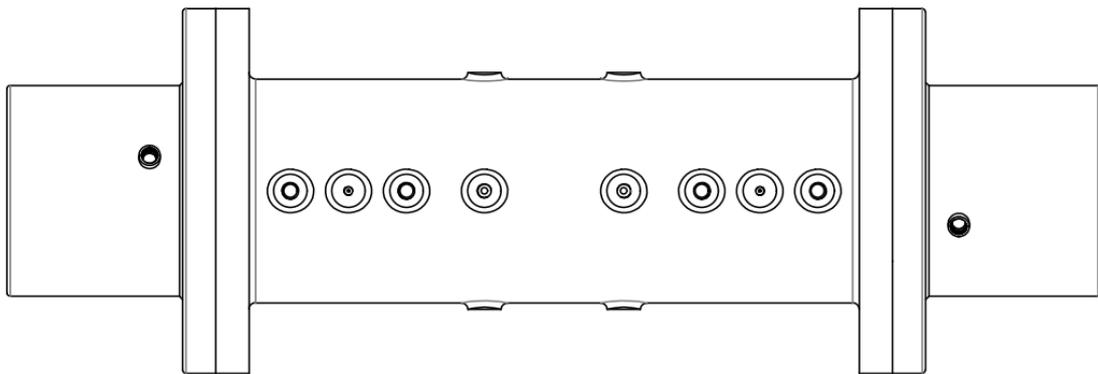


Ilustración 14 Ensamblaje de la bomba con un desfase de 90° sobre el anterior corte.

En ambas ilustraciones se muestra la misma bomba en corte axial en planos a 90°, en ellas se muestran las partes internas. Su funcionamiento es por simple principio de acción reacción. La presión de agua llega a uno de los lados del cilindro central mientras el otro lado del mismo cilindro abre sus válvulas hacia el depósito a presión atmosférica para descargar el agua que contenga. El cilindro empuja desde su lado de presión el eje que a su vez mueve el émbolo del extremo contrario, este émbolo comprime el hidrógeno que contiene dentro, mientras en el lado contrario, el émbolo opuesto absorbe hidrógeno una vez su presión interna llega a 30bar por el volumen que no ha podido descargar la carrera anterior, ya que queda un remanente en la cámara al no poder llegar

hasta el final de la cámara y tener espacios para los racores. Una vez baja está cámara a 30 bar, se abre la válvula pilotada por la parte del circuito de alimentación a 30 bar. Esta válvula está controlada electrónicamente como la opuesta, con la ayuda de los sensores de presión y temperatura en la salida entre racores. Mientras tanto, el primer émbolo va comprimiendo hasta llegar al punto de igualación de la presión interna de la cámara de compresión con la presión de las tuberías y sistema de almacenaje. Llegados a ese punto, la válvula pilotada por un microcontrolador o PLC abre la válvula hacia el sistema de almacenamiento y sigue descargando hasta llegar a 5mm de hacer tope. El sistema se detiene gracias a un sistema de tubo de conteo de material magnético y un sistema con un sensor de efecto Hall que va contando los vértices triangulares, 60 en total hasta llegar a los cantos donde se detiene. Este sistema evita golpes innecesarios al final de las carreras. El sensor hall debe ser analógico para poder detectar correctamente los vértices o los cantos. En los planos hay más detalles de esta y todas las piezas. El sensor Hall va incorporado en un cajetín en la rosca refrigerada del cilindro maestro, o porta eje, se puede apreciar en los planos, donde se incorporará paralelamente un sensor de temperatura y presión para controlar la situación en la recámara y discernir cuando se debe activar la bomba de recuperación de hidrogeno. Aunque estos dos sensores se pueden replantear e instalarse en la tubería externa, por lo que serán más fáciles de cambiar si presentasen algún fallo. El sensor Hall sí que es inamovible a no ser que se practiquen reformas profundas. El anillo de conteo se hace necesario y en material magnético, ya que los aceros austeníticos no son magnéticos.



Ilustración 15 Sensor de efecto Hall analógico 49E. Fuente: (Tecnimikro, 2023)

Una vez que el Primer émbolo llega a su fin, el proceso comienza de nuevo, pero en sentido inverso, y así una y otra vez hasta el llenado del almacenamiento a 200 bar o para alimentar un proceso a otra presión sin el uso del almacenamiento, eso será programable con ayuda de la electrónica y un técnico cualificado.

Los agujeros practicados en el cilindro central son 8, cuatro a cada lado para el llenado de cada cámara, se hicieron de 10mm por no solaparlos con el émbolo central, para respetar el caudal máximo de agua permisible son 4 por lado y no uno. Así no se superan los 3m/s de caudal de agua.

Paralelamente se encuentran otros agujeros, 8 de refrigeración por agua de la rosca donde se aloja el eje, para poder refrigerarse y no tener problemas de recalentamiento en segmentos.

También hay practicados otros cuatro agujeros, en el cuerpo central, dos para recuperación de hidrógeno que pueda pasar aun esos otros dos anillos de estanqueidad, y los otros dos para recuperar el agua que filtre desde el cilindro central. Los de abajo son los del agua, que circulara por gravedad por la acanaladura practicada en el centro del portaeje.

Ya en los extremos también hay recuperación de agua e hidrógeno. Debería ser raro el filtrado de agua salvo fallo catastrófico de los segmentos, pero está presente para evitar problemas de contaminación del hidrógeno. La recuperación de hidrógeno en esta parte si es imprescindible, ya que una pequeña parte siempre filtrará hacia la recámara.

Por ultimo hay una zona de refrigeración en cada cilindro de los extremos donde entra y sale agua por dos aberturas con sus roscas practicadas para racores.

Los racores usados serán de la marca Dilo (DILLO) en su gama M3C preparada para presiones de hasta 320 bar o 310 bar a 250°C, por su sistema de acoplamiento estanco de muy bajas perdidas y reutilizable, lo que será muy útil para el mantenimiento. Todas las roscas están hechas a medida para los racores de la marca en sus distintas categorías de presión y diámetro según las necesidades de cada caso.

Por supuesto, el fluido de trabajo a la cámara central será enviado por una bomba de alta presión, aquí llamada bomba auxiliar. El agua que envía debe ser refrigerada, de otra forma llegaría a 105,74°C y 295bar. sería perjudicial para la resistencia del metal, aunque no crítico a esa temperatura. En cualquier caso, siempre es prudente refrigerarlo para evitar dilataciones indeseadas.

El sistema neumático para el hidrógeno está descrito en los planos, pero sigue el funcionamiento aquí explicado añadiendo válvulas de corte manual en caso de fallo de las automáticas. También existe un sistema de purga en caso de emergencia con el sistema de almacenamiento, esta salida debe ser enviada a un lugar donde el gas extraído se pueda quemar con algún sistema de antorcha.

El almacenamiento se realiza en 16 botellones que deben ir montados en un palé metálico con pintura A1 antincendios y que retienen los botellones en caso de explosión. También debe ir separado de otros elementos por un mínimo de 2 metros de distancia a cada lado y dos en vertical, pero la recomendación para realizar la instalación es que haya muro de fuego hacia la zona que se desee proteger y que haya más de seis metros entre otras zonas.

La distribución a 10 bar para las zonas de trabajo se realizará mediante regulador de presión.

Y la unión de los cilindros con brida con la parte central será mediante tornillos calibrados TC36.

2. METODOLOGIA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1 Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos

Las tareas realizadas en la fase de cálculos han sido las siguientes:

- Cálculo del almacenamiento por el método descrito acorde a la norma UNE- EN 13445-3:2021.
- Cálculo de las uniones atornilladas de las bridas según CTE, código estructural y EC3.
- Cálculo de los segmentos por método propio ante la falta de métodos descritos en bibliografía o normas.
- Ligera descripción de las potencias de la bomba auxiliar y características.
- Cálculo estructural de los componentes de la bomba mediante fórmulas (DBF, Design by Formulae), El diseño por análisis (DBA, Design by Analysis) sería deseable para detectar problemas en finales de rosca, chaveteros u otros elementos difíciles de calcular, pero no se disponía de licencia de software como podría ser SolidWorks Premium o Autodesk Inventor. Los cálculos de fatiga y resistencia se han realizado mediante fórmulas.

Pero también se han realizado muchas tareas no reflejadas en el documento para cálculo de tuberías para adecuar sus diámetros a los caudales e intentar mantenerlas por debajo de los 2m/s que suelen marcar normativas como el CTE, aunque suele ser para evitar ruidos y puede permitirse hasta 3m/s, por encima ya tendríamos problemas de cavitación según las normativas. En gases es distinto y suele limitarse la velocidad a 30m/s, ya que el gas fluye mejor, haciendo ridículo el cálculo de pérdidas de presión por accesorios y tuberías para distancias cortas en gas. Para el hidrógeno se ha calculado la pérdida de presión

al envase desde la bomba mediante la ecuación cuadrática de Renouard con datos de tubería aproximados y los resultados han sido de unos 88mbar de caída de presión.

Solo a grandes distancias se apreciarían caídas de presión relevantes.

El cálculo del intercambiador de calor de la camisa del cilindro con brida, se ha realizado, y siendo necesario este para evacuar el calor del cilindro y evitar dilataciones, se ha demostrado que apenas afecta a la temperatura del hidrógeno, por circular con poca velocidad dentro de la cámara y tener un bajo coeficiente conductivo, y convectivo, en consecuencia, eleva la resistencia térmica en gran medida y es el mayor factor limitante. Como ya se ha dicho, la refrigeración debe mantenerse para evacuar el calor de los segmentos y para evitar dilataciones del propio cilindro que podrían causar daños a los segmentos y a sí mismo; por aprisionar el segmento, provocando que el aumento de presión haga un mecanizado del cilindro. El cálculo de transferencia de calor en la parte plana del cilindro se ha obviado debido a que será aún menor al depender de la convección natural del aire.

El presupuesto se ha realizado calculando horas de trabajo en talleres especializados de moldeo y mecanizado. Puede que no sean muy correctos, ya que se han hecho sin ser un especialista en la materia y con precios orientativos. También se les presupone disponer de las herramientas necesarias para lograr moldeos rápidos y adecuados. Lo mismo se presupone para la parte de mecanizado, que idealmente estará en el mismo taller para evitar costes logísticos.

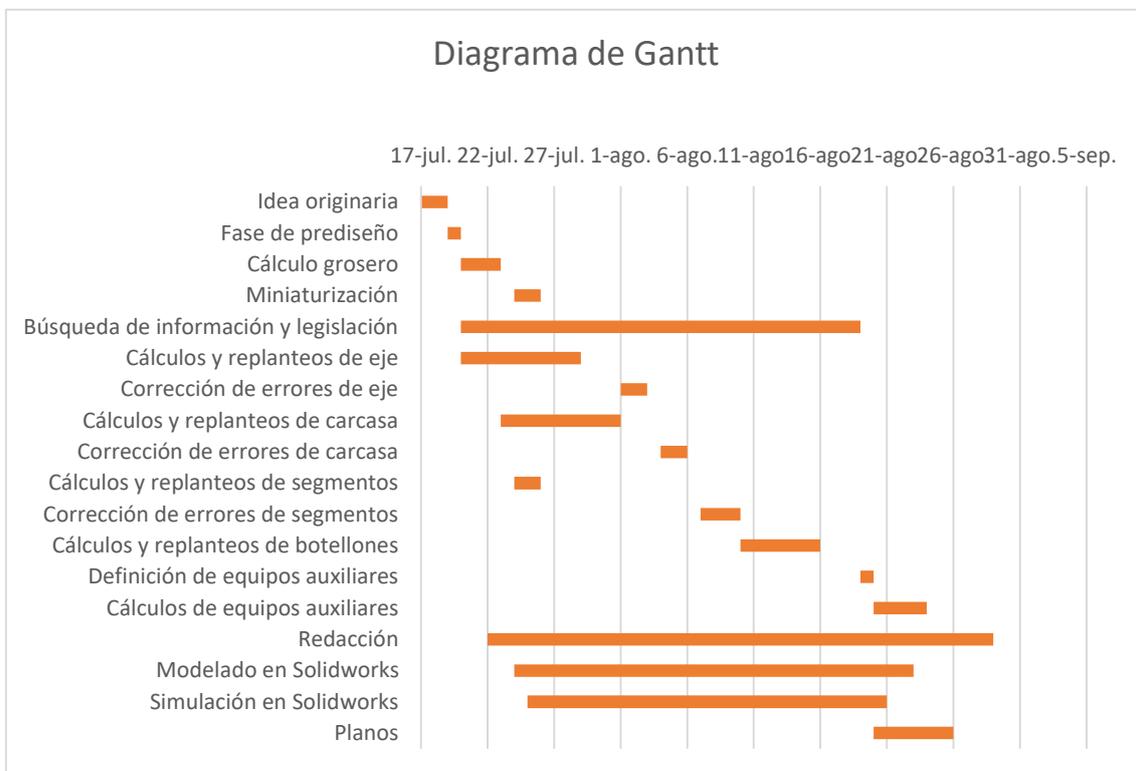
Lo que luego se encuentre en los talleres puede diferir mucho de lo aquí descrito. Pero con operarios con destreza y herramientas adecuadas, debería ser factible. Se ha tenido en cuenta la complejidad y para los presupuestos con tirada única o más cortas se tiene en cuenta el tiempo de estudio de la pieza para poder sacar moldes o preparar el mecanizado de la mejor manera. No se emplea el mismo tiempo para hacer una pieza que para cada pieza de una serie de 100 o 1.000 piezas.

La fase de búsqueda de normativas y legislación ha sido muy tediosa y requiere mucha investigación. Por no hablar de que siempre se tiene la sensación de olvidarse alguna ley o norma por el camino, aunque es peor lidiar con leyes que afectan a un mismo hecho o que lo modifican. Es muy sencillo caer en un error, aunque se hagan los mejores esfuerzos por evitarlo.

En cuanto a procedimientos y equipos, ya se han nombrado el software utilizado, Autodesk Autocad, Word 2016, Excel 2016, distintos navegadores como Edge y Mozilla Firefox y Windows 11 de sistema operativo en un ordenador personal.

2.2 Diagrama de Gantt

Las tareas de este diagrama muchas veces están solapadas unas con otras debido a que las tareas se entrecruzan y es necesario incorporar datos de una en otra. Incluso con algo independiente como el almacenamiento es necesario conocer otros datos como lo permitido por la legislación y corregir errores en los modelos, como podría ser las boquillas y aberturas, junto con el modelado y nuevos cálculos.



Gráfica 12 Diagrama de Gantt de las tareas realizadas.

Como se observa, la redacción se ha ido completando a medida que se hacían otras tareas.

La redacción culminó el 29 de agosto. Posteriormente se realizaron correcciones hasta el 14 de septiembre.

2.3 Cálculos

2.3.1 Almacenamiento

En primer lugar, calcularemos su espesor de pared para conocer su resistencia a las presiones nominales de trabajo y de ensayo; que serán de 150% para este caso, la resistencia a fatiga del botellón y la abertura, para todo ello usaremos la norma UNE-EN 13445-3:2021, Debido a que el perfil adaptado a guardaválvulas no está presente en la norma, la dificultad de interpretación de tantas áreas distintas y que por el diseño elegido de cabeza semiesférica, se cree que no sería necesario añadir más material de refuerzo, ya que la semiesfera según la norma porta el doble de espesor recomendado para no generar concentración de tensiones en ella. También hay refuerzo en la parte de la abertura por la rosca del guardaválvulas, que lo reforzaría aún más. Por lo cual, no se consideraría necesario aportar material extra de refuerzo por estar sobrerreforzado por las necesidades extra del guardaválvulas. Tras todo ello, calcularemos los botellones necesarios para lograr 50kg de almacenamiento.

2.3.1.1 Cálculo del espesor del botellón

Usando el sistema de cálculo de la norma UNE-EN 13445-3:2021 en primer lugar calcularemos el espesor de la envolvente cilíndrica del botellón. Para ello primero debemos hacer unos cálculos y condiciones que nos marca la norma.

Primeramente, hay una separación entre aceros, en el caso que nos ocupa estaremos entre dos casos dependiendo de los márgenes de composición entre coladas. La norma distingue entre aceros austeníticos de aleación entre el 30% y el 35% ($30\% < A < 35\%$) y de más del 35% ($A \geq 35\%$). Viendo las composiciones de distintos fabricantes de acero AISI S316L o su equivalente 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) puede entrar en una categoría u otra según la colada.

Por dicha razón, escogeremos $A \geq 35\%$ ya que se usará como mínimo el mismo criterio o uno más restrictivo.

Comencemos con la situación de servicio.

Las condiciones son:

- $\frac{e}{D_e} < 0,16$, cuestión que se cumple, $\frac{e}{D_e} = \frac{0,02439}{0,35+2*0,02439} = 0,0612 < 0,16$
- $\frac{r}{D_i} = 0,5$; para el codillo. También se cumple. $\frac{r}{D_i} = \frac{0,35/2}{0,35} = 0,5$
- $f < f_d$ la calcularemos seguidamente.

$$f = \frac{P * r}{t} = \frac{20MPa * 0,35m/2}{0,022801m} = 153,5MPa$$

Siendo P la presión, r el radio, t el espesor del cilindro y f la tensión tangencial al cilindro en este caso.

En este caso se ha comprobado f tras calcular el espesor para ver si se cumplía la norma, pero se puede acceder con un espesor predefinido de antemano y comprobar si es válido.

Ahora procedemos al cálculo de f_d .

$$f_d = \max \left[\left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,5} \right); \min \left(\frac{R_{p1,0/T}}{1,2}; \frac{R_{m/T}}{3} \right) \right]$$

Siendo:

- $R_{p1,0/T}$ límite elástico con deformación permanente y deformación del 1% a temperatura nominal.
- $R_{m/T}$ resistencia a tracción a la temperatura nominal.

$$f_d = \max \left[\left(\frac{235}{1,5} \right); \min \left(\frac{235}{1,2}; \frac{490,5}{3} \right) \right] = \max [(156,66); \min(195,83; 163,5)]$$

$$f_d = 163,5MPa$$

$$153,5MPa = f < f_d = 163,5MPa$$

Se cumple la primera condición.

En la situación de ensayo nos encontramos una casuística similar.

La misma condición $f < f_{TEST}$, pero en este caso para presiones de ensayo.

$$f = \frac{P * r}{t} = \frac{30MPa * 0,35m/2}{0,022801m} = 230,25MPa$$

La expresión ahora cambia y las temperaturas son las de test, en nuestro caso no cambian ya que no es un recipiente sometido a llama o estrés térmico.

$$f_{TEST} = \text{máx} \left[\left(\frac{R_{p1,0/T_{test}}}{1,05} \right); \left(\frac{R_{m/T_{test}}}{2} \right) \right]$$

$$f_{TEST} = \text{máx} \left[\left(\frac{235}{1,05} \right); \left(\frac{490,5}{2} \right) \right] = 246,75MPa$$

$$230,25MPa = f < f_d = 246,75MPa$$

Cumple con las condiciones.

Tras comprobar que se cumplen ambas condiciones calculamos el espesor.

$$e = \frac{P * D_i}{2 * f * z - P}$$

Siendo:

- “e” el espesor.
- P; presión.
- Di el diámetro interno.
- Z es un coeficiente de soldadura, en nuestro caso, soldando con el mismo material y recociendo para disolución de carbonatos de cromo, con sus correspondientes verificaciones posteriores de calidad, tiene el valor de 1. Sería equivalente al material sin soldadura.

- “f” es el valor de la tensión de tangencial.

En primera instancia cogimos el valor f_d para el cálculo del espesor mínimo y poder calcular f.

$$e = \frac{P * D_i}{2 * f * z - P} = \frac{20 * 10^6 * 0,35}{2 * 163,5 * 10^6 * 1 - 20 * 10^6} = 0,022801m$$

Tras ello calculamos el valor con f y obtenemos el nuevo espesor.

$$e = \frac{P * D_i}{2 * f * z - P} = \frac{20 * 10^6 * 0,35}{2 * 153,5 * 10^6 * 1 - 20 * 10^6} = 0,02439m$$

Comprobamos con la fórmula de presión máxima, debería dar unos 200bar o 20MPa.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2 * f * z * e_a}{D_m} = \frac{2 * 153,5 * 1 * 0,02439}{0,35 + 0,02439} = 19,99MPa$$

Para calcular el fondo hemisférico, la norma dice que el cilindro debe mantener el espesor del cilindro como mínimo hasta la tangente, este es el doble en el cilindro que, en la hemisfera, que opera según el siguiente espesor.

$$e = \frac{P * D_i}{4 * f * z - P} = \frac{20 * 10^6 * 0,35}{4 * 153,5 * 10^6 * 1 - 20 * 10^6} = 0,0117845m$$

Es la mitad, pero necesitando el doble de grosor en el maguito de la abertura y los bordes de tangente, se hace innecesariamente complicado reducir el grosor de la hemisfera, por tanto, se mantendrá el grosor de la pared del cilindro.

En la situación de ensayo, según está preparado, los resultados de espesor deberían salir iguales en espesor y un 50% más de presión a la nominal. Si esto no ocurriese así hay algún error que necesitará subsanarse.

$$e = \frac{P_{TEST} * D_i}{2 * f_{TEST} * z - P_{TEST}} = \frac{30 * 10^6 * 0,35}{2 * 230,25 * 10^6 * 1 - 30 * 10^6} = 0,02439m$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2 * f_{TEST} * z * e_a}{D_m} = \frac{2 * 230,25 * 1 * 0,02439}{0,35 + 0,02439} = 29,99MPa$$

Son correctos.

Ahora hacemos el cálculo a fatiga para conseguir $2 \cdot 10^6$ ciclos, lo que según la norma considera vida infinita, aquí cambia el criterio respecto a otros métodos de cálculo que piden 10^6 .

Primero debe calcularse $\Delta\sigma$, el intervalo de tensiones pseudoelásticas

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{P_{m\acute{a}x}} * \eta * f$$

Siendo:

- ΔP es el intervalo de presiones en las que el deposito estará trabajando.
- η es el factor de tensión y está relacionado con Z. en nuestro caso al estar recocida la soldadura TIG para disolver la formación de carburos de cromo que debilitarían la estructura y ser de un acero muy bajo en carbono, el coeficiente se mantendrá en 1.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{P_{m\acute{a}x}} * \eta * f = \frac{17\text{MPa}}{20\text{MPa}} * 1 * 153,5\text{MPa} = 130,475\text{Mpa}$$

Seguidamente obtendremos el valor de intervalo de tensiones ficticio $\Delta\sigma^*$ y todos sus coeficientes.

$$\Delta\sigma^* = \left(\frac{\Delta\sigma}{C_e + C_T} \right) * K_f$$

Siendo:

- C_e el coeficiente de espesor, indica la tendencia a un reparto desigual de las tensiones por el material. La norma proporciona una gráfica para espesores superiores a los 25mm, al ser menor, el coeficiente es 1.
- C_t o coeficiente de temperatura, es la afectación del material por la temperatura y que haría bajar su resistencia de rotura. En el caso presente sería 1 al no aplicarse carga térmica y estar a 25°C en condiciones normales o temperatura ambiente.

- K_t , factor de concentración de tensiones, determina la afección por los radios de transición en las envolventes. Cuanto más pequeños sean menor será el coeficiente y más afectara a la vida a fatiga. En nuestro caso K_t es 1, ya que no hay radios de transición pequeños; salvo en la abertura del depósito, como se verá en la simulación, en esa zona se concentran en mayor medida las tensiones por no haberse aplicado un redondeo, aunque no resulta preocupante en este caso.

$$\Delta\sigma^* = \left(\frac{\Delta\sigma}{C_e + C_T} \right) * K_f = \left(\frac{130,47}{1 + 1} \right) * 1 = 130,47 \text{MPa}$$

Llegados aquí se debe calcular el número de ciclos en función de $\Delta\sigma^* > \Delta\sigma_D$ o de si $\Delta\sigma_{cut} \leq \Delta\sigma^* \leq \Delta\sigma_D$, cada condición tendrá a su vez otra condición, para uniones soldadas o para zonas sin soldar. En nuestro caso consideraremos sin soldar por el recocido aplicado. Usando la siguiente tabla para el número de ciclos, sabremos que formula aplicar.

Clase	Límite de resistencia (MPa) $\Delta\sigma_D$	Límite de corte (MPa) $\Delta\sigma_{cut}$	Constante de la curva de fatiga para $N \geq 2*10^6$
			C
UW	175,2	116,7	90MPa

Tabla 5 Recopilación de límites para cálculos de fatiga. Fuente: (UNE, Versión corregida, Marzo 2023)

Con $\Delta\sigma^* = 130,47 \text{MPa}$ estaremos en la condición $\Delta\sigma_{cut} \leq \Delta\sigma^* \leq \Delta\sigma_D$ y la formula a aplicar será:

$$N = 2 * 10^6 \left(\frac{172,5}{\Delta\sigma^*} \right)^{10} = 2 * 10^6 \left(\frac{172,5}{130,47} \right)^{10} = 32.644.826,58 \text{ ciclos}$$

Entonces, $\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_D$ si $N > 2*10^6$ ciclos y amplitud constante de los ciclos, por consiguiente, $\Delta\sigma_R = 175,2 \text{MPa}$, siendo $\Delta\sigma_R$ el rango de tensiones de referencia a fatiga de las curvas de diseño.

Aunque no lo indica la norma, se podría calcular un factor de seguridad usando el límite de resistencia a fatiga $\Delta\sigma_D$ entre el valor de intervalo de tensiones ficticio $\Delta\sigma^*$.

$$n = \frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma^*} = \frac{175,2}{130,47} = 1,34$$

2.3.1.2 Dimensiones y número de botellones necesarios.

Una vez conocidas las dimensiones de diseño del botellón, más que nada el grosor de 24,39mm al que se le añade 1,5mm de protección frente a corrosión en la parte interna y otro añadido de 1,5mm en la parte externa para protegerlo frente a corrosión, golpes y picaduras que irán haciendo mella en el material.

Su masa es de 674.36 kilogramos por botellón y sabiendo que deben ir en un palé ignifugo y con protección para las válvulas por el Real Decreto 809/2021 que regula los equipos a presión. Debería tenerse cuidado con su lugar de emplazamiento seleccionando lugares despejados y aislados por muros a cierta distancia, hay algunas excepciones como los bancos de prueba y el uso in situ del botellón. En cualquier caso, el almacenamiento no debe realizarse en interiores o lugares con mala ventilación por el riesgo de explosión e incendio. Los suelos también deben ser ignífugos de categoría A1 y a resultas del peso, debe ser un firme capaz de soportar esas cargas sin deformarse.

El volumen interno del botellón es fácil de obtener una vez conocidas las dimensiones y procederemos a ello para conocer el número de envases a utilizar para poder llegar a los 50kg que se nos pide en el pliego de condiciones.

$$\begin{aligned} V_{envase} &= \frac{D_i^2}{4} \pi * L + \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{D_i}{2}\right)^3 = \frac{0,35^2}{4} \pi * 2 + \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{0,35}{2}\right)^3 \\ &= 0,2148718475 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Como se puede observar es una simple suma del volumen de una esfera y un cilindro. Correspondiendo L a la longitud y Di al diámetro interno.

Todas las dimensiones del botellón junto con el acoplamiento tipo E y el guada válvulas están en la ilustración que prosigue a estas palabras.

Debo destacar que se ha obviado el volumen de la abertura y el espacio de tubería hasta una válvula de cierre.

Para calcular el volumen real de hidrogeno comprimido en los envases usaremos la fórmula ideal de los gases ideales corregida con el factor de compresibilidad y la carta de compresibilidad para el hidrogeno. También disponible en las siguientes páginas. Usaremos este método al ser menos engorroso que el modelo de gas real.

La ecuación a utilizar sería la inferior.

$$P * v = Z * R' * T$$

Siendo:

- Z el factor de compresibilidad, que lo obtendremos del diagrama.
- $R'_{h2} = R / M = 8,314472 \text{ J/K*mol} / 2,01568\text{g/mol} = 4,035596 \text{ J/K*g}$
Es la constante especifica del hidrogeno en este caso.
- “v” el volumen específico en m³/g.
- T en kelvin y P en pascales.



Ilustración 16 Botellón, debe pintarse en color rojo por norma UNE-EN 1089-3:2011; que debe llevar por ser portador de hidrógeno. Debe pintarse la ojiva y el cilindro de rojo.

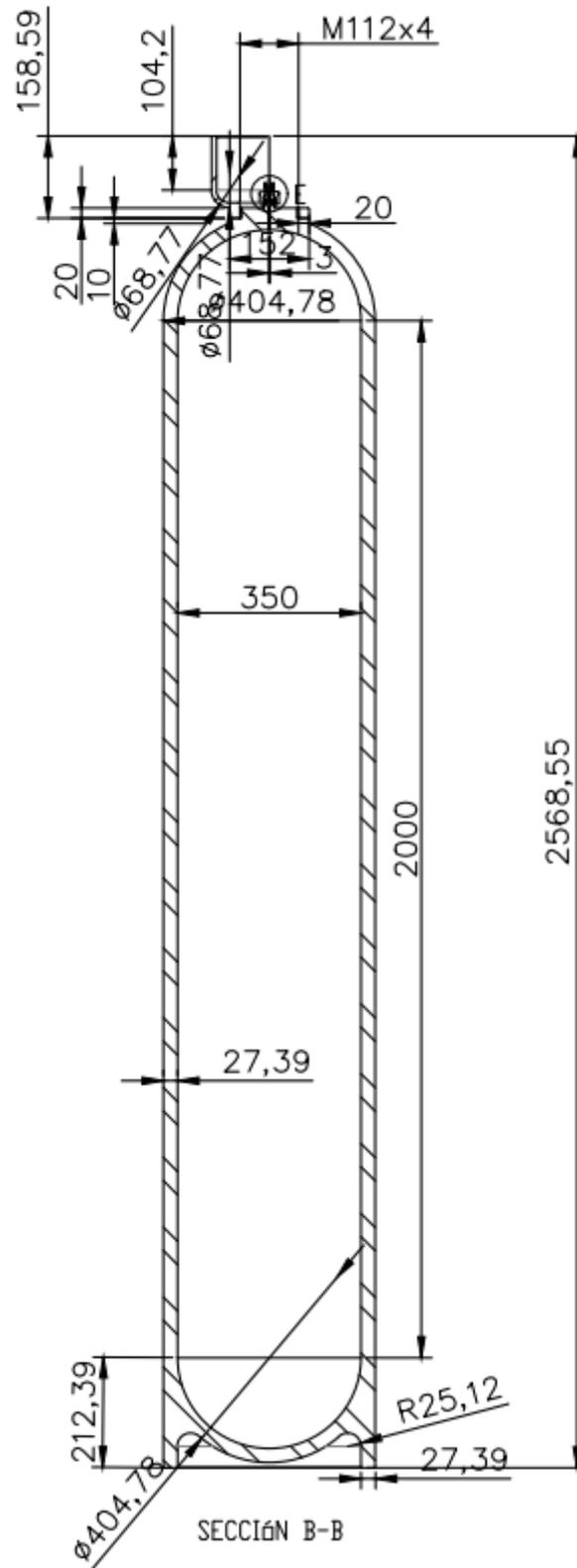
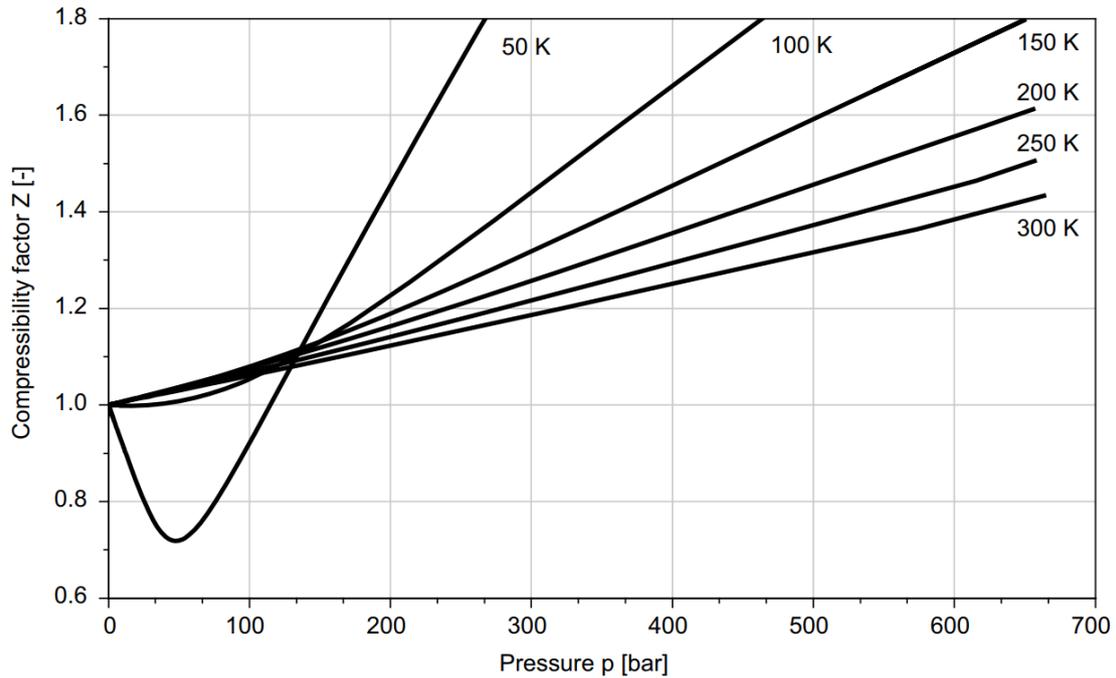


Ilustración 17 Plano acotado del botellón



Gráfica 13 Factor de compresibilidad del hidrógeno frente a presión y temperatura, también llamado carta de compresibilidad. Fuente: (HIRSCHER, 2010)

De la ecuación anterior despejamos en v y resolvemos interpolando en la carta de compresibilidad para el valor de Z .

$$v = \frac{Z * R' * T}{P} = \frac{1,13 * 4,035596 * 298,15}{20.000.000} = 6,79808 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{g}$$

La masa por botellón quedará:

$$m = \frac{V}{v} = \frac{0,2148718475}{6,79808 * 10^{-5}} = 3,1607725 \text{ kg por envase}$$

Para obtener el total de botellones necesarios lo dividimos entre 50Kg que es el requerimiento del pliego de condiciones.

$$N = \frac{50 \text{ kg}}{3,1607725 \text{ kg/envase}} = 15,8189 \cong 16 \text{ envases}$$

2.3.2 Cálculo de unión atornillada de bridas

Procederemos al cálculo de los tornillos por métodos EC3, CTE y Código estructural, el antiguo EAE o instrucción del acero estructural.

Realmente no son de aplicación en estructuras que no sean de edificación, pero son métodos válidos para el cálculo de uniones atornilladas.

El EC3 o Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero está basado en la norma UNE-EN 1993-1-1:2013 y resto de sus partes como la UNE-EN 1993-1-8:2013 para uniones y UNE-EN 1993-1-9:2013 para estructuras a fatiga, transposiciones de las normas europeas EN 1993-1-1:2005 y el resto de sus partes, respectivamente a las anteriores citadas serían la N 1993-1-8:2005 y N 1993-1-9:2005, por citar las usadas entre otras varias de la norma.

El CTE, código técnico de la edificación, está regido por el RD 314/2006 y sus correcciones.

El código estructural es el más reciente y se corresponde al RD 470/2021 por el que se aprueba el nuevo código estructural y deroga el anterior RD 751/2011 Instrucción de acero estructural (EAE).

También se calculará la fatiga de la unión atornillada debido a su sometimiento a cargas repetitivas debidas a la presión de la cámara de compresión sobre la brida del cilindro que trabaja en ciclos de tracción. Para este cálculo se ha visto insuficiente los términos de estas normas y se calculará mediante el método de cálculo de la parábola de Wöhler más completo, aunque varía mucho según la bibliografía usada. Habiendo más o menos coeficientes reductores y con distintas metodologías, gráficas y tablas usadas para su obtención.

2.3.2.1 Cálculo de límite de fatiga

En primer lugar, deberemos calcular los factores de corrección para poder calcular el límite de fatiga (S_n) a 10^6 ciclos para asegurarnos la vida infinita a los

esfuerzos y calcular directamente con él en lugar de la resistencia última a rotura, que daría lugar a pocos ciclos de vida, los que permitiese el factor de seguridad.

Usaremos el método de la curva de Wöhler o curva S-N, este cálculo se representa mediante la siguiente ecuación del límite de fatiga real, con sus de coeficientes reductores:

$$S_n = C_a * C_b * C_c * C_d * C_e * S_n'$$

Para su cálculo debemos obtener el límite de fatiga teórico de la probeta, S_n . En este caso toma este valor de 0,5 en el caso de 10^6 ciclos para obtener un valor de vida infinita en esta clase de aceros, hay materiales que no presentan este valor o que incluso no presentan límite de fatiga. La elección del material debe ser cuidadosa.

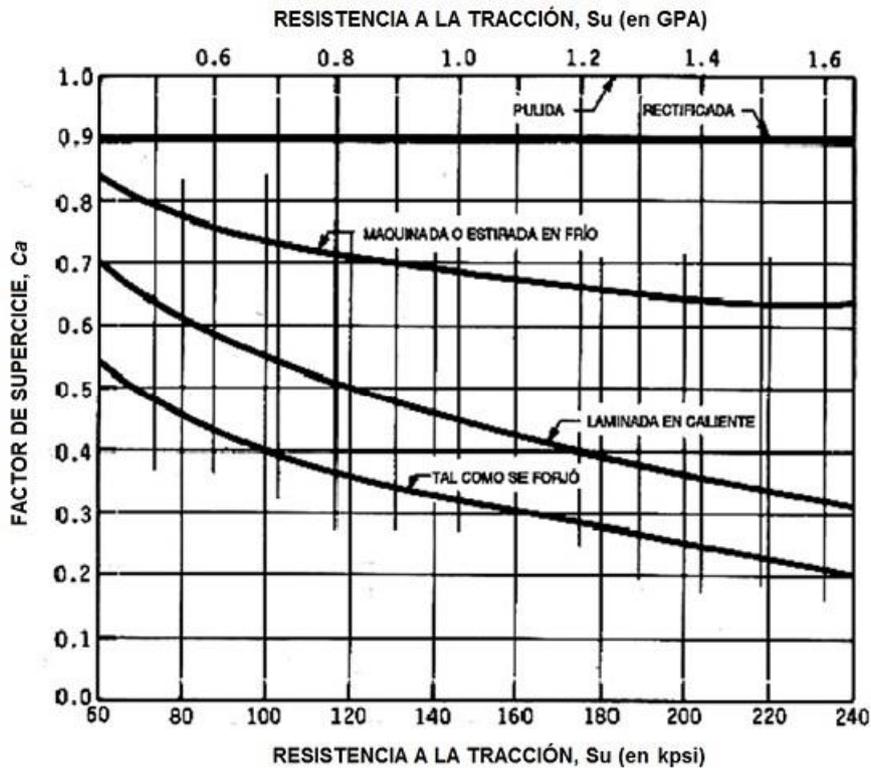
$$S_n = 0,5 * S_u$$

Siendo S_u el límite de rotura del material. Por tanto:

$$S_n = 0,5 * 800MPa = 400MPa$$

Procederemos ahora a la obtención de los coeficientes reductores, en primer lugar, C_a o coeficiente por acabado superficial.

C_a Se obtiene mediante diagramas, para su extracción se debe entrar con el límite de rotura y el acabado superficial de la pieza.



Gráfica 14 Ca, Coeficiente de factor de superficie. Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)

Entrando en el diagrama con $S_u = 800 \text{ MPa}$ y un acabado por maquinado, obtenemos un $C_a = 0,71$.

C_b es el coeficiente por tamaño y para nuestro caso, siendo una carga axial, ya que las cortantes son ridículamente bajas, y siendo el diámetro superior a 10mm, el valor de C_b estará comprendido entre 0,6 y 0,7 en función de la excentricidad de la carga. Para nuestro caso $C_b = 0,7$

C_c , coeficiente de confianza o seguridad funcional. Se obtendrá mediante la ecuación y la tabla de probabilidad de supervivencia.

Probabilidad de supervivencia (%)	<i>D</i>
85	1,0
90	1,3
95	1,6
99	2,3
99,9	3,1
99,99	3,7

Tabla 6 Probabilidad de supervivencia de los autores Stilen, Cummings y Schulte.

Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)

Para una probabilidad deseada del 99,99% para evitar fallos del material por fatiga, tenemos una $D = 3,7$ y sustituyendo en la siguiente expresión obtendremos:

$$C_c = 1 - 0,08 * D = 1 - 0,08 * 3,7 = 0,704$$

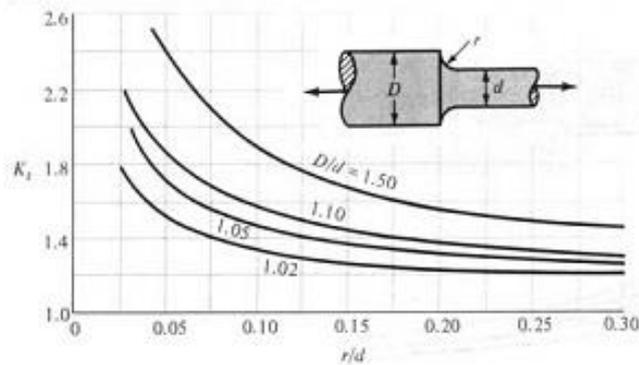
C_d llamado coeficiente de temperatura por razones obvias, es aplicable a partir de los 160°F en adelante, de otro modo C_d es 1. En nuestro caso los tornillos no superan esos 160°F que se corresponden a 71,11°C, por tanto, $C_d = 1$.

Coeficiente de sensibilidad a la entalla, C_e . es debido a las discontinuidades de espesor en el material, originado por grietas, ranuras, entallas, orificios, resaltes o cualquier otra modificación en sus parámetros dimensionales.

Para obtener su valor necesitaremos obtener varios factores y coeficientes.

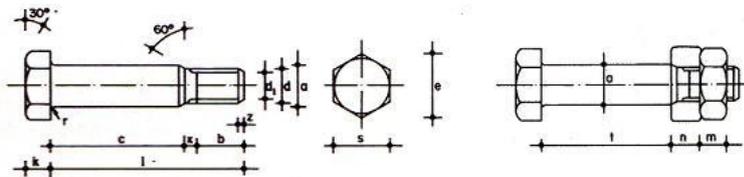
El primero de ellos es K_t , factor de concentración de tensiones elástico, obtenido a partir de diagramas.

D.7.- Barra circular con entalle circular sometida a tensión, $\sigma_0 = F/A$, donde $A = \pi \cdot d^2/4$



Gráfica 15 Diagrama de factor de concentración de tensiones elástico con respecto a diámetros. Fuente: (Rodríguez Galbarro, s.f.)

Interpolando en el diagrama con los siguientes valores obtenidos de la tabla para tornillos calibrados:



Tornillo tipo	Vástago					Cabeza				Área neta del núcleo A_n cm ²	Área resistente A_r cm ²
	Diámetro de la caña y del agujero a mm	Diámetro exterior de la rosca d mm	Diámetro interior de la rosca d_3 mm	Longitud roscada b mm	Longitud de la salida x mm	Espesor k mm	Medida entre caras s mm	Medida entre aristas e ≈ mm	Radio del acuerdo r mm		
TC 10	11	10	8.160	17.5	2.5	7	17	19.6	0.5	0.523	0.580
TC 12	13	12	9.853	19.5	2.5	8	19	21.9	1.0	0.762	0.843
TC 16	17	16	13.546	23.0	3.0	10	24	27.7	1.0	1.440	1.570
TC 20	21	20	16.933	26.0	4.0	13	30	34.5	1.0	2.250	2.750
TC 22	23	22	18.933	28.0	4.0	14	32	36.9	1.0	2.820	3.030
TC 24	25	24	20.319	29.5	4.5	15	36	41.6	1.0	3.240	3.530
TC 27	28	27	23.319	32.5	4.5	17	41	47.3	1.0	4.270	4.590
TC 30	31	30	25.706	35.0	5.0	19	46	53.1	1.0	5.190	5.610
TC 33	34	33	28.706	38.0	5.0	21	50	57.7	1.0	6.470	6.940
TC 36	39	36	31.093	40.0	6.0	23	55	63.5	1.0	7.590	8.170

Tabla 7 Tabla de tornillos calibrados para obtener dimensiones. Fuente: (Rodríguez Galbarro, Estudio y Tipología de las Uniones Atornilladas, s.f.)

$$\frac{D}{d} = \frac{39}{31,093} = 1,25$$

$$\frac{r}{d} = \frac{7}{31,093} = 0,225$$

Obtenemos $K_t = 1,7$.

Calculamos el factor de sensibilidad a entalla, q , con "a" que es una dimensión característica del material, en nuestro caso el diámetro, y r es el radio de la entalla, para nuestro caso la diferencia de diámetros entre el vástago y el núcleo de la rosca.

$$q = \frac{1}{1 + a/r} = \frac{1}{1 + 39/7} = 0,1521739$$

Proseguimos con K_f , coeficiente de concentración de tensiones a la fatiga.

$$K_f = 1 + q * (K_t - 1) = 1 + 0,1521739 * (1,7 - 1) = 1,07608$$

Y con la inversa se logra C_e .

$$C_e = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{1,07608} = 0,93$$

Una vez logrados todos los coeficientes sustituimos en la ecuación S_n .

$$\begin{aligned} S_n &= C_a * C_b * C_c * C_d * C_e * S_n' = 0,71 * 0,7 * 0,704 * 1 * 0,93 * 400MPa \\ &= 130,158 MPa \end{aligned}$$

Esta será la nueva resistencia de cálculo de los tornillos a fatiga para vida infinita o 10^6 a ciclos para este tipo de acero S316L.

Según el código estructural del RD 470/2021 los tornillos deben mantener unas distancias mínimas entre bordes y entre ellos mismos. Realizaremos a continuación dichas comprobaciones.

$$d_0 = 39mm$$

$$e_1 \geq 1,2 * d_0 = 1,2 * 39mm = 46,8mm < 277 - 213,5 = 63,5mm$$

En otras normas como el EC3 esta distancia crece a $1,5*d_0$, por eso la distancia es mayor.

e_2 no se puede calcular ya que no hay filas consecutivas de tornillos.

$$e_2 \geq 1,2 * d_0$$

Como en el caso anterior no se puede calcular p_1 por no haber filas consecutivas de tornillos en la dirección de la transmisión de carga.

$$p_1 \geq 2,2 * d_0$$

Los tornillos perpendiculares a la transmisión de la carga también cumplen la condición.

$$p_2 \geq 2,4 * d_0 = 2,4 * 39mm = 93,6mm < 131,96mm = \sqrt{125,5^2 + 40,8^2}$$

En el EC3 las normas piden;

$$p_2 \geq 3 * d_0 = 3 * 39mm = 117mm < 131,96mm$$

Situación que también se cumple, al igual que todas las anteriores.

2.3.2.2 Cálculo de esfuerzos

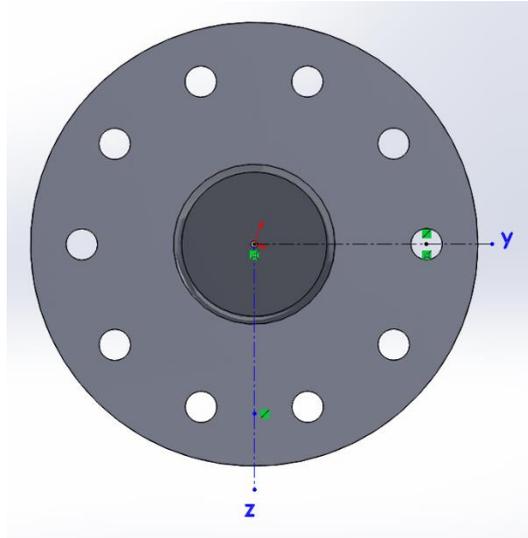


Ilustración 18 Brida de unión entre cilindro distal y central.

El centro de gravedad de la pieza (c.d.g.) está en su centro geométrico. Desde el punto de vista de la ilustración anterior.

Por tanto $y = 0$ y $z = 0$. Con relación a este centro calcularemos las posiciones de los tornillos para un diámetro de 39mm de agujero para tornillos TC36 y en un solo cuadrante, ya que las posiciones del resto son iguales en términos absolutos. El radio hasta el centro del agujero del tornillo es 213,5mm y están separados por 36° entre ellos.

1. $Z = 0$ $Y = 213,5$ mm
2. $Z = \sin 36^\circ * 213,5 = 125,5$ mm $Y = \cos 36^\circ * 213,5 = 172,7$ mm
3. $Z = \sin 72^\circ * 213,5 = 203$ mm $Y = \cos 72^\circ * 213,5 = 66$ mm

En relación al c.d.g. se debe calcular $\sum r_i^2$

$$\sum y^2 = 4 * 66^2 + 4 * 172,7^2 + 2 * 213,5^2 = 227880,66 \text{mm}^2$$

$$\sum z^2 = 4 * 203^2 + 4 * 125,5^2 + 2 * 0 = 227837 \text{mm}^2$$

$$\sum r^2 = \sum y^2 + \sum z^2 = 455726,66 \text{mm}^2$$

Calculamos los esfuerzos.

Cortante

$$Q_z = 191,61kg * \frac{9,81m}{s^2} = 1879,69N$$

$$Q_y = 0$$

Torsor

$$M_t = 0$$

Axil

$$N = \frac{0,2^2m}{4} * \pi * 21.000.000N/m^2 = 659734,45N$$

Flector

$$M_y = M * g * x = 191,61kg * \frac{9,81m}{s^2} * 0,13m = 244,36N$$

$$M_z = 0$$

Calculando los esfuerzos cortantes V para cada tornillo y teniendo en cuenta que serán todos iguales. Realmente este esfuerzo sería despreciable para este tipo de estructura, pero se calculará con fines académicos. N es el número de tornillos a usar.

$$V = \frac{Q_z}{N} = \frac{1879,69N}{10} = 187,969N$$

Los esfuerzos a tracción quedarían del siguiente modo.

$$N_i = \frac{N}{n} + \frac{M_y}{\Sigma z^2} * z_i + \frac{M_z}{\Sigma y^2} * y_i$$

Para los tornillos superiores, ya que son los más solicitados a tracción, y redondeando a 666000N la fuerza axial, quedaría lo siguiente.

$$N_1 = \frac{660000N}{10} + \frac{244,36Nmm}{227837mm^2} * 213,5mm * \cos 18^\circ = 66000 + 1,0725$$

$$= 66001,0725N \cong 66000N$$

2.3.2.3 Resolución con el EC3

Resolviendo para el Eurocódigo EC3 en estructuras de acero (UNE-EN 1993-1-1:2013) con tornillos TC36 de calidad 8.8, pero con sus valores calculados a fatiga. Ya que si fuera una situación estática valdría con tornillos TC20, pero estos fallarían a unos determinados ciclos.

La Resistencia a cortante se soluciona mediante la ecuación:

$$F_{V,Rd} = \alpha_v * f_{ub} * A_s / \gamma_{M2}$$

Donde:

$\alpha_v = 0,6$ para tornillos de calidad 8.8.

f_{ub} es la tensión de rotura del tornillo, para nuestro caso sería 800 MPa, pero estamos calculando a fatiga y será la previamente calculada en 131,92MPa

A_s el área resistente del tornillo, si el corte pasa por el área no roscada, se puede usar el área del vástago A en lugar de A_s , pero usaremos A_s para asegurar la resistencia.

$\gamma_{M2} = 1,25$ El factor de seguridad aplicable al tornillo.

$$F_{V,Rd} = \alpha_v * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}} = 0,6 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 51733,74N$$

Supera holgadamente el cortante existente de 187,969N por tornillo, por soportar únicamente el peso propio de la pieza, es más, un solo tornillo podrá sujetar toda la pieza a cortante si fuese factible, pero más adelante veremos que a tracción no ocurre lo mismo.

Resistencia a tracción se solventa por un método similar al de cortante

$$F_{t,Rd} = k_2 * f_{ub} * A_s / \gamma_{M2}$$

Siendo:

$K_2 = 0,9$; un factor para tornillos sin cabeza avellanada.

El resto de factores permanecen iguales.

$$F_{t,Rd} = k_2 * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}} = 0,9 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 77600,62N$$

Supera el axil de 66000N por tornillo. El tornillo supera la resistencia fatiga.

Interacción cortante-tracción se comprueba mediante la expresión:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1$$

Que con la notación usada en estos cálculos sería:

$$\frac{V_i}{F_{V,Rd}} + \frac{N_i}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{173,84N}{51733,74N} + \frac{66000}{1,4 * 77600,62N} = 0,61 \leq 1$$

Cumple la condición, por tanto, los tornillos soportarán el esfuerzo de fatiga según el EC3.

2.3.2.4 Solución mediante Código Estructural (RD 470/2021)

El Código Estructural es reciente y aprobado por el RD 470/2021 que aprueba el nuevo código y deroga el anterior EAE o Instrucción de acero estructural aprobada por el derogado RD 751/2011. Realmente en este aspecto que toca para el cálculo de este tipo de unión solo cambia el cálculo de la interacción a cortadura-tracción, que pasa a ser el mismo que en el EC3. Realmente solo varía la apreciación del valor de los coeficientes.

Resistencia a cortante.

$$F_{V,Rd} = \alpha * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}}$$

En este caso α no es función de calidad del tornillo y hace referencia a la zona del tornillo por la que pasa el esfuerzo cortante.

- $\alpha = 0,6$ si el plano cortante no pasa por la zona roscada del tornillo.
- $\alpha = 0,5$ si pasa por la zona roscada.
- $\alpha = 0,6$ si pasa por la zona roscada y si la calidad del tornillo es 8.8

como tenemos una calidad 8.8 quedará $\alpha = 0,6$.

$$F_{V,Rd} = \alpha * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}} = 0,6 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 51733,74N$$

Como en el caso anterior, supera las cortantes.

La resistencia a tracción es igual que en el EC3.

$$F_{t,Rd} = k_2 * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}} = 0,9 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 77600,62N$$

Evidentemente también supera los 66000N de axil como en el caso del EC3 al ser el mismo cálculo y con el mismo coeficiente k_2 .

La interacción cortante tracción viene dada por esta expresión actualmente.

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1$$

En el anterior código EAE su cálculo era:

$$\left(\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

Pero procedemos con el actual.

$$\frac{173,84N}{51733,74N} + \frac{66000}{1,4 * 77600,62N} = 0,61 \leq 1$$

Que también cumple la condición y por tanto los tornillos soportan los esfuerzos de fatiga.

2.3.2.5 Solución mediante el CTE

El CTE es el código técnico de la edificación, aprobado por el RD 314/2006 en vigor con algunas correcciones añadidas. Y es casi igual a los anteriores, cambiando algunos pequeños detalles.

La resistencia a cortante en la sección transversal del tornillo es:

$$F_{V,Rd} = n * 0,5 * f_{ub} * \frac{A}{\gamma_{M2}}$$

Siendo:

- n el número de planos de corte, en nuestro caso 1.
- F_{ub} la resistencia última o de rotura del acero del tornillo 131,92N/mm² en nuestro caso por calcularlo a fatiga.
- A es el área de la caña del tornillo A_d o el área resistente del tornillo A_s , según se encuentren los planos de cortadura en el vástago o la la parte roscada del tornillo respectivamente. Usaremos A_s por seguridad y hasta ver los tornillos disponibles, aunque se deban usar tornillos calibrados con la zona del vástago en el corte para evitar desplazamientos en los cilindros.

$$F_{V,Rd} = n * 0,5 * f_{ub} * \frac{A}{\gamma_{M2}} = 1 * 0,5 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 43111,456N$$

Cumple con las cortantes siendo muy superior.

La resistencia a tracción del tornillo usa la expresión idéntica a los anteriores códigos. Pero sin coeficiente k, directamente es 0,9.

$$F_{t,Rd} = 0,9 * f_{ub} * \frac{A_s}{\gamma_{M2}} = 0,9 * 131,92 * \frac{817}{1,25} = 77600,62N$$

Cumple, superando los 66000N del axil.

La sollicitación combinada será como en anteriores ocasiones:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} = \frac{173,84N}{51733,74N} + \frac{66000}{1,4 * 77600,62N} = 0,61 \leq 1$$

Cumple como en el caso de los anteriores.

2.3.2.6 Capacidad resistente y punzonamiento

En vista de que en todos los casos los cálculos son iguales para las tres normas, calcularemos la capacidad resistente y la resistencia a punzonamiento a parte, siendo válida para las tres normativas.

Capacidad resistente, antes llamada aplastamiento, nos muestra si la pieza en la zona contigua al tornillo será aplastada, es decir, si sufrirá deformación.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{Mb}}$$

Siendo:

- D el diámetro del tornillo
- T el espesor de la pieza donde está el agujero para anclar los tornillos.
- f_u la resistencia a tracción del acero de la pieza, en este caso acero AISI S316L, con una $f_u = 520$ MPa.
- α_b es el menor de:

$$\circ \frac{e_1}{3*d_0} = \frac{277-213,5}{3*39} = 0,5427$$

$$\circ \frac{p_1}{3*d_0} - 1/4 \quad \text{No se puede calcular al no haber filas consecutivas de tornillos}$$

$$\circ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{520} = 1,5384$$

$$\circ 1$$

- k_1 el menor de:

- $2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 * \frac{176,48}{39} - 1,7 = 10,97$

- $1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 * \frac{131,96}{39} - 1,7 = 3,03$

- 2,5

De aquí sacamos que $\alpha = 0,5427$ y $k_1 = 2,5$, para resolver a seguidamente.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 * 0,5427 * 520 * 39 * 50}{1,25} = 1100595,6N$$

Valor muy superior al cortante que actúa sobre la unión. Por tanto, se cumple la condición.

$$F_{b,Rd} = 1100595,6N > 1879,969N = F_{V,Ed}$$

La resistencia a punzonamiento es exigida por la norma para comprobar que la chapa en contacto con la cabeza del tornillo no sea punzonada o atravesada por esta. La fórmula usada será:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 * \pi * d_m * t_p * f_u}{\gamma_{Mb}}$$

Siendo:

- f_u ; resistencia a tracción de la chapa. $f_u = 520MPa$
- d_m el diámetro medio circunscrito e inscrito entre las caras de la cabeza del tornillo. Medida entra caras de la cabeza del tornillo.
- t_p ; espesor de la chapa.

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 * \pi * d_m * t_p * f_u}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 * \pi * 55 * 50 * 520}{1,25} = 2156389,19N$$

Muy superior al esfuerzo de tracción, por tanto, cumple la condición.

$$B_{p,Rd} = 2156389,19N > 66000N = F_{t,Ed}$$

La unión no fallará en ningún punto.

2.3.3 Cálculo de Segmentos

Ante la falta de desarrollos teóricos, se tenía la necesidad de abordar el cálculo de las características de los segmentos para poder realizar los cálculos de pérdidas de los mismos por rozamientos. En este apartado se presentan los resultados obtenidos por tales métodos.

2.3.3.1 Segmentos de 131mm de diámetro para hueco de eje.

En primera instancia buscaremos el diseño de la abertura en planta del cilindro con su diámetro abierto, para ello nos basaremos en las recomendaciones de luz para motores que se dan en el libro Automotive technology principles, diagnosis and service, de James D. Halderman. (Halderman, 2021)

$$\frac{\theta_1}{360^\circ} * \pi * \varnothing_{seg\ extendido\ interno} = \pi * \varnothing_{seg\ comprimido\ interno} - \delta$$

Donde:

- θ_1 es el ángulo de abertura del segmento en reposo; sin tensiones aplicadas.
- $\varnothing_{seg\ extendido\ interno}$ longitud del diámetro interno del segmento extendido, sin tensiones y en su parte interna, asimilándolo a un círculo completamente cerrado.
- $\varnothing_{seg\ comprimido\ interno}$ diámetro interno que le correspondería al segmento una vez alojado en el hueco de 131mm.
- δ Luz o hueco del segmento recomendada según Halderman, de 4 milésimas por unidad de longitud de diámetro de cilindro.

$$\frac{\theta_1}{360^\circ} * \pi * 0,129 = \pi * 0,125 - 0,131 * 0,004$$

$$\theta_1 = 348,3717366^\circ$$

Comprobamos si la recomendación de Halderman es correcta con la elongación del segmento por temperatura y nos queda margen para otras posibles dilataciones del cilindro, aunque estas serán menores al estar refrigerado por agua. Las dilataciones del eje son absorbidas por las holguras mecanizadas en el mismo con este propósito.

$$L_o * \alpha * \Delta T = 0,131 * \pi * 0,00001 * 150 = 0,0006173229m$$

$$L_o * \alpha * \Delta T = 0,125 * \pi * 0,00001 * 150 = 0,0005890486m$$

Donde:

- L_o Longitud inicial y a temperatura ambiente a estudiar, en nuestro caso, 25°C
- α coeficiente de dilatación del metal, en este caso acero de fundición de la base del segmento.
- ΔT diferencia de temperatura entre la estimada más alta que alcanzará el segmento.

Aquí vemos que la hipótesis de Halderman no parece correcta al menos para estas temperaturas, tal vez pueda serlo para temperaturas medias inferiores. Por lo cual, se debe recalcular la abertura.

$$\frac{\theta_1}{360^\circ} * \pi * 0,129 = \pi * 0,125 - 0,0007$$

$$\theta_1 = 348,2153946^\circ$$

Ahora comparamos la elongación térmica y vemos si es compatible con la luz calculada y no es mayor. Haremos el cálculo para la parte interna y externa.

$$\delta = \emptyset_{seg_{extendido}_{interno}} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \emptyset_{seg_{comprimido}_{interno}}$$

Donde las variables son las mismas que en caso anterior, para la parte interna se puede usar como comprobación de cálculo y evitar errores, ya que δ debe ser igual a lo calculado en el apartado anterior, si no hubiese un error de apreciación de la luz necesaria. pero sí es necesario calcular el apartado para el diámetro externo y que este nos sirva además de para la comprobación de la luz, también para el cálculo del solape de los escalones del segmento.

Parte interna.

$$\begin{aligned}\delta &= \varnothing_{seg\ extendido\ interno} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \varnothing_{seg\ comprimido\ interno} \\ &= 0,129 * \pi * \frac{348,2153946^\circ}{360^\circ} - \pi * 0,125 = -0,0007\end{aligned}$$

Es negativo porque es longitud que falta del segmento, es compatible con el desplazamiento térmico de 0,0005890486m del segmento.

Parte externa, cambian los diámetros.

$$\begin{aligned}\delta &= \varnothing_{seg\ extendido\ externo} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \varnothing_{seg\ comprimido\ externo} \\ &= 0,135 * \pi * \frac{348,2153946^\circ}{360^\circ} - \pi * 0,131 = -0,001317m\end{aligned}$$

Compatible con el desplazamiento térmico de 0,0006173229m del segmento.

Calculamos el solape entre partes inferior y superior del escalón del segmento por la parte externa, la más crítica por la mayor distancia. El solape debe tener algo de entidad para evitar choques al dilatar, por tanto, la distancia del escalón debe ser algo mayor que la luz. En nuestro caso pondremos 0,0015.

$$\frac{\theta_2}{360^\circ} * \pi * \varnothing_{seg\ extendido\ externo} = 0,0015$$

$$\frac{\theta_2}{360^\circ} * \pi * 0,135 = 0,0015$$

$$\theta_2 = 1,273239544^\circ$$

Este ángulo será el del escalón en los planos.

2.3.3.2 Segmentos de 200mm de diámetro para cilindros.

En primera instancia buscaremos el diseño de la abertura en planta del cilindro con su diámetro abierto, pero no cometeremos el mismo error del

apartado anterior de 131mm de coger la referencia de Halderman. (Halderman, 2021).

Calcularemos directamente la elongación del segmento por temperatura y le daremos margen para otras posibles dilataciones del cilindro, aunque estas serán menores al estar refrigerado por agua. Las dilataciones del émbolo son absorbidas por las holguras mecanizadas en el mismo con este propósito, quedando más ajustadas en este caso.

$$L_o * \alpha * \Delta T = 0,193 * 0,00001 * 225 = 0,00043425m$$

Distancia suficiente para el margen de 0,0005mm que tiene de desplazamiento.

$$L_o * \alpha * \Delta T = 0,2 * \pi * 0,00001 * 275 = 0,0017278m$$

$$L_o * \alpha * \Delta T = 0,194 * \pi * 0,00001 * 275 = 0,00167604m$$

Calculamos el ángulo de abertura con la luz sobredimensionada para evitar otras dilataciones.

$$\frac{\theta_1}{360^\circ} * \pi * \emptyset_{seg_{extendido}_{interno}} = \pi * \emptyset_{seg_{comprimido}_{interno}} - \delta$$

$$\frac{\theta_1}{360^\circ} * \pi * 0,198 = \pi * 0,194 - 0,0019$$

$$\theta_1 = 351,62765675^\circ$$

Ahora comparamos la elongación térmica y vemos si es compatible con la luz calculada y no es mayor. Haremos el cálculo para la parte interna y externa.

$$\delta = \emptyset_{seg_{extendido}_{interno}} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \emptyset_{seg_{comprimido}_{interno}}$$

Donde las variables son las mismas que en caso anterior, para la parte interna se puede usar como comprobación de cálculo y evitar errores, ya que δ debe ser igual a lo calculado en el apartado anterior, si no hubiese un error de apreciación de la luz necesaria. pero sí es necesario calcular el apartado para el diámetro externo y que este nos sirva además de para la comprobación de la luz, también para el cálculo del solape de los escalones del segmento.

Parte interna.

$$\begin{aligned}\delta &= \phi_{seg_{extendido_{interno}}} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \phi_{seg_{comprimido_{interno}}} \\ &= 0,198 * \pi * \frac{351,62765675^\circ}{360^\circ} - \pi * 0,194 = -0,0019\end{aligned}$$

Es negativo porque es longitud que falta del segmento, es compatible con el desplazamiento térmico de 0,0017278m del segmento.

Parte externa, cambian los diámetros.

$$\begin{aligned}\delta &= \phi_{seg_{extendido_{externo}}} * \pi * \frac{\theta_1}{360^\circ} - \pi * \phi_{seg_{comprimido_{externo}}} \\ &= 0,204 * \pi * \frac{351,62765675^\circ}{360^\circ} - \pi * 0,2 = -0,0023383m\end{aligned}$$

Compatible con el desplazamiento térmico de 0,0006173229m del segmento.

Calculamos el solape entre partes inferior y superior del escalón del segmento por la parte externa, la más crítica por la mayor distancia. El solape debe tener algo de entidad para evitar choques al dilatar, por tanto, la distancia del escalón debe ser algo mayor que la luz. En nuestro caso pondremos 0,00255.

$$\frac{\theta_2}{360^\circ} * \pi * \phi_{seg_{extendido_{externo}}} = 0,00255$$

$$\frac{\theta_2}{360^\circ} * \pi * 0,204 = 0,00255$$

$$\theta_2 = 1,43239448^\circ$$

Este ángulo será el del escalón en los planos.

2.3.4 Calculo de la flecha máxima que alcanza el segmento sin sobrepasar su límite elástico para su instalación.

2.3.4.1 Segmentos para 200mm

Se asimilará la fuerza de resorte del segmento a las fuerzas estructurales de una viga para poder ejercer su cálculo.

Para calcular la flecha máxima, calcularemos la tensión axial máxima en el punto central longitudinal del segmento y asimilándolo a un empotramiento, ya que convergen por igual las dos fuerzas de cada lado del segmento, para ello usaremos el límite elástico del material que se corresponde a $R_{0,2\%} = 276 \text{ MPa}$ o N/mm^2 .

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F}{I} * z$$

Donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ esfuerzo axial.
- M_F momento flector. Es $201\text{mm} * F$ en nuestro caso. F es la fuerza que aún no conocemos. Los 201mm son de la distancia que hay en el segmento entre ejes neutros.
- I momento de inercia de la sección.
- z distancia al eje neutro en z .

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F}{I} * z = \frac{201 * F}{\frac{2 * 3^3}{12}} * 1,5 = F * 67$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = F * 67$$

$$F = \sigma_{m\acute{a}x} * 67 = \frac{276\text{N}}{67\text{mm}^2} = 4,119\text{N}$$

Ya se ve que es una fuerza muy pequeña y casi despreciable, pero la calcularemos con fines académicos.

La flecha en el punto de aplicación la obtendremos por el siguiente método.

$$\Sigma MA = 0$$

$$4,119 * x + M = 0$$

$$M(x) = -4,119 * x \text{ Nmm}$$

Para valores de x que van entre 0 y 201mm.

Usando la segunda derivada de la ecuación de la curva elástica con respecto de

x:

$$E * I * \frac{d^2v}{dx} = M(x)$$

$$E * I * \frac{d^2v}{dx} = -4,119 * x$$

$$\int E * I * \frac{d^2v}{dx} = \int -4,119 * x * dx$$

$$E * I * \int \frac{d^2v}{dx} = -4,119 * \int x * dx$$

$$E * I * \int \frac{d^2v}{dx} = -4,119 * \int x * dx$$

$$E * I * \frac{dv}{dx} = -4,119 * \frac{x^2}{2} + C$$

$$E * I * \theta = -4,119 * \frac{x^2}{2} + C$$

$$E * I * \int \frac{dv}{dx} = \int \left(-4,119 * \frac{x^2}{2} + C \right) dx$$

$$E * I * v = \frac{-4,119}{2} * \frac{x^3}{3} + C * x + C_2$$

$$E * I * v = \frac{-4,119 * x^3}{6} + C * x + C_2$$

Con esta integración obtenemos las siguientes ecuaciones.

La ecuación del momento flector, que calcula el momento presente a lo largo de la viga.

$$M = -4,119 * x$$

La ecuación del ángulo o pendiente; nos permite calcular la inclinación presente en toda la viga.

$$E * I * \theta = -4,119 * \frac{x^2}{2} + C$$

La ecuación de la curva elástica permite hallar las flexiones presentes en la viga.

$$E * I * v = \frac{-4,119 * x^3}{6} + C * x + C_2$$

Teniendo las condiciones en B y en A podemos calcular C y C₂, a continuación, podremos conocer la flecha en A, que es el extremo abierto donde aplicamos la fuerza.

Para x=201mm, $\theta = 0$ (ángulo de la pendiente) y $\Delta=0$ (flecha o v, depende de la bibliografía), tenemos:

$$E * I * \theta = -4,119 * \frac{x^2}{2} + C$$

$$E * I * 0 = -4,119 * \frac{201^2}{2} + C$$

$$C = 83205,8595 \text{ Nmm}^2$$

Sustituyendo valores en esta otra ecuación:

$$E * I * v = \frac{-4,119 * x^3}{6} + C * x + C_2$$

$$E * I * 0 = \frac{-4,119 * 201^3}{6} + 83205,8595 * 201 + C_2$$

$$C_2 = -11149585,173 \text{ Nmm}^3$$

La ecuación de la curva elástica quedará:

$$v = \frac{\frac{-4,119 * x^3}{6} + 83205,8595 * x - 11149585,173}{E * I}$$

Y:

$$\theta = \frac{-4,119 * \frac{x^2}{2} + 83205,8595}{E * I}$$

Sustituyendo valores en A, x=0, tenemos:

$$\theta = \frac{-4,119 * \frac{x^2}{2} + 83205,8595}{E * I} = \frac{-4,119 * \frac{0}{2} + 83205,8595 Nmm^2}{210000 N/mm^2 * 4,5 mm^4} = 0,0880485 rad$$

$$v = \frac{\frac{-4,119 * x^3}{6} + 83205,8595 * x - 11149585,173}{E * I}$$

$$= \frac{\frac{-4,119 * 0^3}{6} + 83205,8595 * 0 - 11149585,173 Nmm^3}{210000 N/mm^2 * 4,5 mm^4} = -11,7985 mm$$

La flecha es negativa por lo que va hacia abajo, o hacia un costado del plano del segmento, esa flecha es por cada lado del segmento, por tanto, tenemos 23,597mm de expansión de circunferencia media.

Mediante este cálculo veremos que la distancia es sobradamente válida para la instalación del segmento sin rotura.

$$(0,198 * \pi + 23,597) - 0,205 * \pi = 0,001605 m$$

Entran bien, pero se debe ser cuidadoso en la instalación con la herramienta de instalación de segmentos.

2.3.4.2 Segmentos para 131mm

Análogamente para los segmentos alojados en el hueco del eje de 131mm de diámetro. Reciclamos los cálculos cambiando las fuerzas y las dimensiones y recalculando C y C₂.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F}{I} * z$$

$$F = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} * I}{d * z} = \frac{276 * 4,5}{130,5 * 1,5} = 6,3448 N$$

Teniendo las condiciones en B y en A podemos calcular C y C₂, a continuación, podremos conocer la flecha en A, que es el extremo abierto donde aplicamos la fuerza.

Para B: $x=130,5\text{mm}$, $\theta = 0$ (ángulo de la pendiente) y $\Delta=0$ (flecha o v , depende de la bibliografía), tenemos:

$$M = -6,3448 * x$$

$$E * I * \theta = -6,3448 * \frac{x^2}{2} + C$$

$$E * I * 0 = -6,3448 * \frac{130,5^2}{2} + C$$

$$C = 54026,76 \text{ Nmm}^2$$

Sustituyendo valores en esta otra ecuación:

$$E * I * v = \frac{-6,3448 * x^3}{6} + 54026,76 * x + C_2$$

$$E * I * 0 = \frac{-6,3448 * 201130,5^3}{6} + 54026,76 * 201 + C_2$$

$$C_2 = -4700327,9 \text{ Nmm}^3$$

Sustituyendo valores en A, $x=0$, tenemos:

$$\theta = \frac{-6,3448 * \frac{x^2}{2} + 54026,76}{E * I} = \frac{-6,3448 * \frac{0}{2} + 54026,76 \text{ Nmm}^2}{210000 \text{ N/mm}^2 * 4,5 \text{ mm}^4} = 0,05717 \text{ rad}$$

$$v = \frac{\frac{-6,3448 * x^3}{6} + 54026,76 * x - 4700327,9}{E * I}$$

$$= \frac{\frac{-6,3448 * 0^3}{6} + 54026,76 * 0 - 4700327,9 \text{ Nmm}^3}{210000 \text{ N/mm}^2 * 4,5 \text{ mm}^4} = -4,97389 \text{ mm}$$

La flecha es negativa por lo que va hacia abajo, o hacia un costado del plano del segmento, esa flecha es por cada lado del segmento, por tanto, tenemos 9,94778mm de expansión de circunferencia media.

Mediante este cálculo veremos que la distancia es válida para la instalación del segmento sin rotura, ni deformación.

$$(0,129 * \pi + 0,00994778) - 0,132 * \pi = 0,000523m$$

Muy justo, se debe extremar el cuidado en la instalación con la herramienta de instalación de segmentos.

2.3.5 Cálculo de la fuerza ejercida por el segmento contra el cilindro

Se asimilará la fuerza de resorte del segmento a las fuerzas estructurales de una viga para poder ejercer su cálculo, se idealizará para considerar una distribución homogénea de la fuerza del segmento sobre en la superficie del cilindro.

2.3.5.1 Para segmentos de alojamiento en 131mm

Con la abertura del segmento calculo la curvatura y con ella la fuerza que se ejerce sobre las paredes del cilindro.

Es decir, a 360° le resto lo que no es abertura y lo divido entre dos para cada lado del segmento y lo convierto en radianes para usarlo en la ecuación del ángulo.

$$\frac{360 - 348,2153946^\circ}{2} * \frac{2 * \pi \text{ rad}}{360} = 0,10284\text{rad}$$

Ahora en la ecuación del ángulo cambia el signo de la fuerza, por estar haciendo la fuerza en sentido contrario.

$$E * I * \theta = F * \frac{x^2}{2} + C$$

$$\theta = \frac{F * \frac{x^2}{2} + C}{E * I}$$

$$F = \frac{(\theta * E * I - C) * 2}{x^2} = \frac{(0,10284 * 210000 * 4,5 - 54026,76) * 2}{130,5^2} = 5,068N$$

2.3.5.2 Para segmentos de alojamiento en 200mm

Del mismo modo que en la sección anterior, calculamos la abertura y la fuerza, pero con las medidas y fuerzas nuevas.

$$\frac{360 - 351,62765675^\circ}{2} * \frac{2 * \pi \text{ rad}}{360} = 0,07306247\text{rad}$$

$$F = \frac{(\theta * E * I - C) * 2}{x^2} = \frac{(0,07306247 * 210000 * 4,5 + 83205,8595) * 2}{130,5^2} = 7,65N$$

2.3.6 Perdidas de potencia por rozamiento de los segmentos

El rozamiento se calculará a partir de tres componentes: el peso, la presión ejercida por el hidrógeno sobre la cara transversal del segmento y la fuerza que el propio segmento ejerce sobre el cilindro. La fuerza ejercida por la presión es variable durante la compresión, el resto se consideran fijas.

El coeficiente de fricción se considerará 0,16, aunque supuestamente podría llegar a 0,6 eso no está probado bajo estas condiciones de ensayo y podría no ser cierto. Un valor conservador es 0,16.

Potencia perdida por peso.

Se usará W, aunque en algunas bibliografías podría ser confundida con la energía.

La fórmula sería la siguiente:

$$W_R = M * g * \mu * v = 140,67kg * \frac{9,81m}{s^2} * 0,16 * \frac{0,04m}{s} = 8,83W$$

Donde:

- M es el peso.
- “g” la gravedad.
- μ el coeficiente de rozamiento.
- “v” la velocidad.

Potencia perdida por fuerza de los segmentos de 131mm.

$$W_R = 8 * F * \mu * v = 8 * 5,068N * 0,16 * \frac{0,04m}{s} = 0,26W$$

F es la fuerza que ejerce cada segmento sobre el cilindro y 8 es el número de ese tipo de segmentos, en la sección siguiente cambia a 6 por que son 6 de 200mm.

Potencia perdida por fuerza de los segmentos de 200mm.

$$W_R = 6 * F * \mu * v = 6 * 7,65N * 0,16 * \frac{0,04m}{s} = 0,29W$$

La suma de estas dos potencias es 0,55W, es totalmente despreciable. En cambio, la debida a la presión no lo es y afecta a los segmentos en contacto con el área de alta presión. Una en cada embolo y otro en el cilindro central.

Potencia perdida variable por presión.

$$W_R = P * A * \mu * v * 0,7$$

P es la presión y A el área tangente, 0,7 es un coeficiente de la zona que no iguala presión, se debe a la forma de tonel del segmento de compresión.

Para el caso más extremo, donde se corte el hidrogeno a un cilindro por estar lleno y ser la última carrera, la presión máxima sería 346 bar en el cilindro central, quedando la ecuación con unas perdidas en ese segmento de:

$$W_R = 34,63 * 10^6 * 0,002 * 0,194 * \pi * 0,16 * 0,04 * 0,7 = 189,1W$$

Su contraparte a 200bar tendría las siguientes perdidas:

$$W_R = 20 * 10^6 * 0,002 * 0,194 * \pi * 0,16 * 0,04 * 0,7 = 109,21W$$

$$W_R = 20 * 10^6 * 0,002 * 0,131 * \pi * 0,16 * 0,04 * 0,7 = 73,75W$$

Las pérdidas totales por segmentos estarían sobre los 381,44W. Una cifra baja en comparación con la potencia total de la bomba.

2.3.7 Potencia de la bomba auxiliar

$$W = \frac{Q * P}{\eta} = \frac{0,0007257m3 * 34,63 * 10^6}{0,75\%} = \frac{25131W}{0,75\%} = 33508W$$

El rendimiento total de la bomba accesoria estará en la media.

Aunque es un caso extremo, la bomba no pasaría de 294bar en caso de llenar el cilindro opuesto. Pero la energía de presión a 30 bar proviene del electrolizador. Se evitaría el llenado en el último ciclo para evitar fugas. Un inconveniente de esa decisión es que aumentaría mucho el requerimiento de presión en la bomba auxiliar, llegando a los 346 bar, eso supondría una bomba más cara. También adecuación de los racores y tuberías para aguantar esa presión, los actuales de la marca Dilo están certificados hasta 320bar.

$$W = \frac{Q * P}{\eta} = \frac{0,0007257m3 * 29,4 * 10^6}{0,75\%} = 28447,44W$$

Esta sería la potencia máxima, llenando ambos cilindros de los extremos.

Lógicamente la potencia sube desde el mínimo de 30bar hasta los 200 de los depósitos de almacenamiento dejando la potencia media de llenado en el punto de descarga a 115bar. La potencia incluso varía durante el ciclo si se dispone de un motor lo suficientemente ágil como para adaptarse a las fluctuaciones tan rápidas de potencia. Lo adecuado sería un motor de corriente continua de algún vehículo eléctrico.

2.3.8 Capacidades de la bomba

La bomba tiene capacidad de funcionamiento continuo a 200bar para dar servicio a maquinas a través de las tuberías de servicio si se ponen con otro regulador distinto al de 10 bar, aunque habrá que dimensionar los acumuladores de presión y ver cuál es el consumo másico, ya que la bomba no puede administrar más de 2,727 gramos por segundo., en momentos puntuales podría suministrarlos desde el almacenamiento. Pero la presión bajaría y el sistema no podría llenarse, si la demanda fuese de un caudal constante.

Ahora se explica la capacidad de llenado a esa presión y en qué tiempo lo lograría para 50kg.

$$P * \frac{V}{m} = Z * R' * T$$

Donde:

- P presión, N/m².
- V volumen, m³
- "m" masa en gramos.
- Z factor de compresibilidad.
- T temperatura en Kelvin.
- R' constante de los gases ideales del dihidrógeno, en J/g*K.

Masa total a comprimir "m":

$$3000000 * \frac{0,2^2 * \frac{\pi}{4} * 0,15 + 0,0001663284814}{m} = 1,01821 * 4,124462 * 298,15$$

$$m = 11,68927145g$$

Ahora se calcula longitud de cilindro que puede convertirse en almacenamiento.

$$20000000 * \frac{0,2^2 * \frac{\pi}{4} * L + 0,0001663284814}{11,68927145} = 1,077 * 4,124462 * 512$$

$$L = 0,0370173m$$

Volviendo a usar la misma fórmula de los gases ideales con el factor de compresibilidad, obtenemos la masa real bombeada.

$$20000000 * \frac{0,2^2 * \frac{\pi}{4} * 0,0370173}{m} = 1,077 * 4,124462 * 512$$

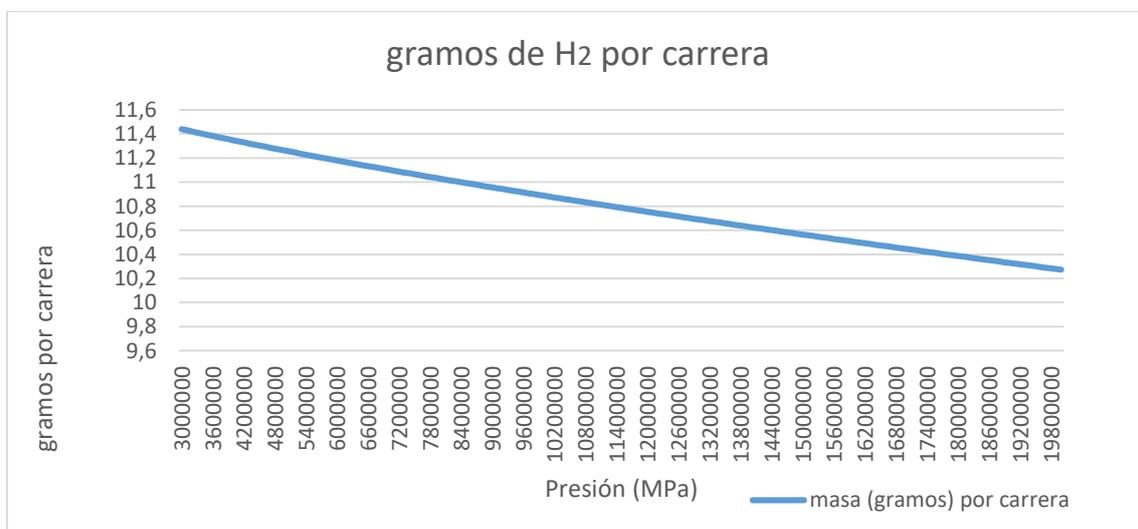
$$m = 10,2266086g$$

Bombeando de forma continua a este ritmo se llegaría a los 50kg a 200 bares continuos en 5,092923 horas o lo que es lo mismo, 5 horas, 5 minutos y 34,52 segundos.

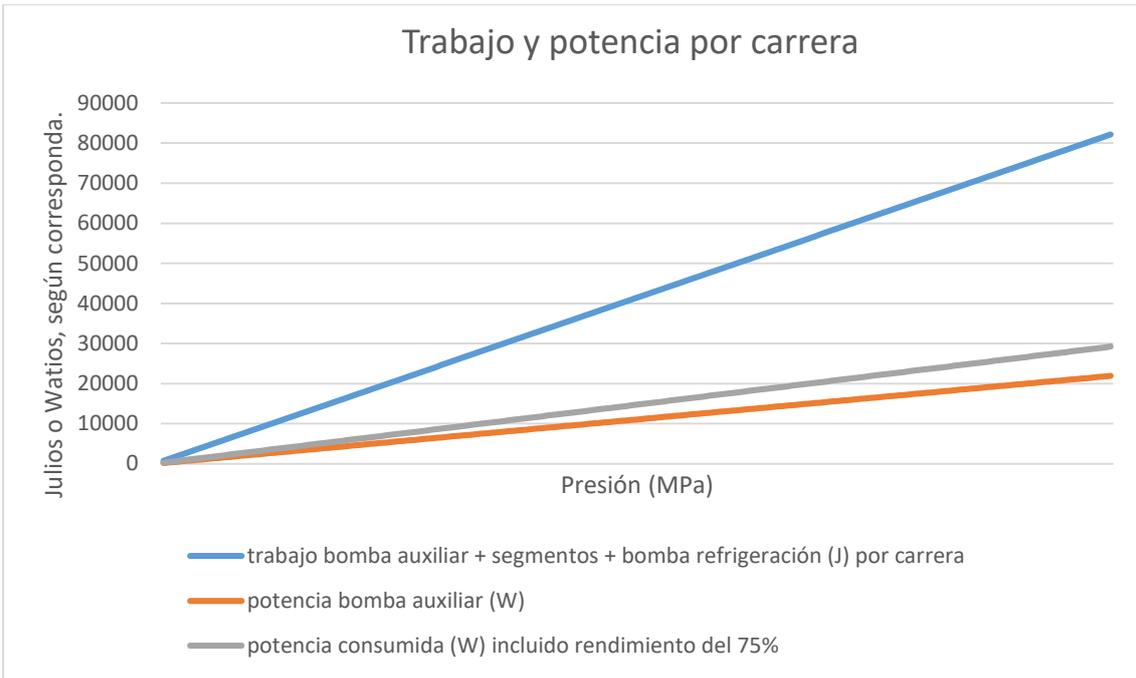
$$\frac{50000g}{10,2266086g/ciclo} = 4889,206ciclos * \frac{3,75s}{ciclo} * \frac{1h}{3600s} = 5,092923horas$$

2.3.9 Graficas de la bomba

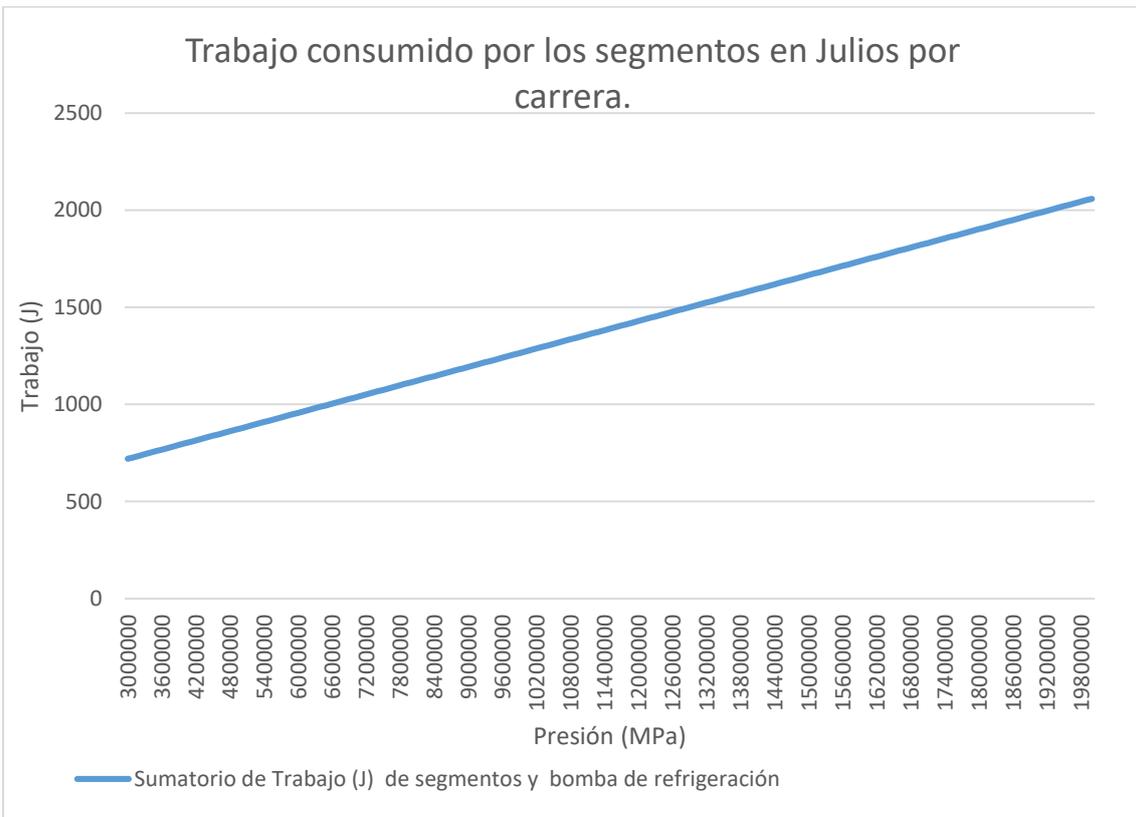
Han sido elaboradas varias graficas de las características de la bomba y sus consumos, hay que hacer notar que pueden contener errores de entre el 1,8% y el 7,6%, estando en su zona media en el 5,6%. Debido a no poder incluir datos de las tablas del factor de compresibilidad. A continuación, serán presentadas estas curvas características de la bomba.



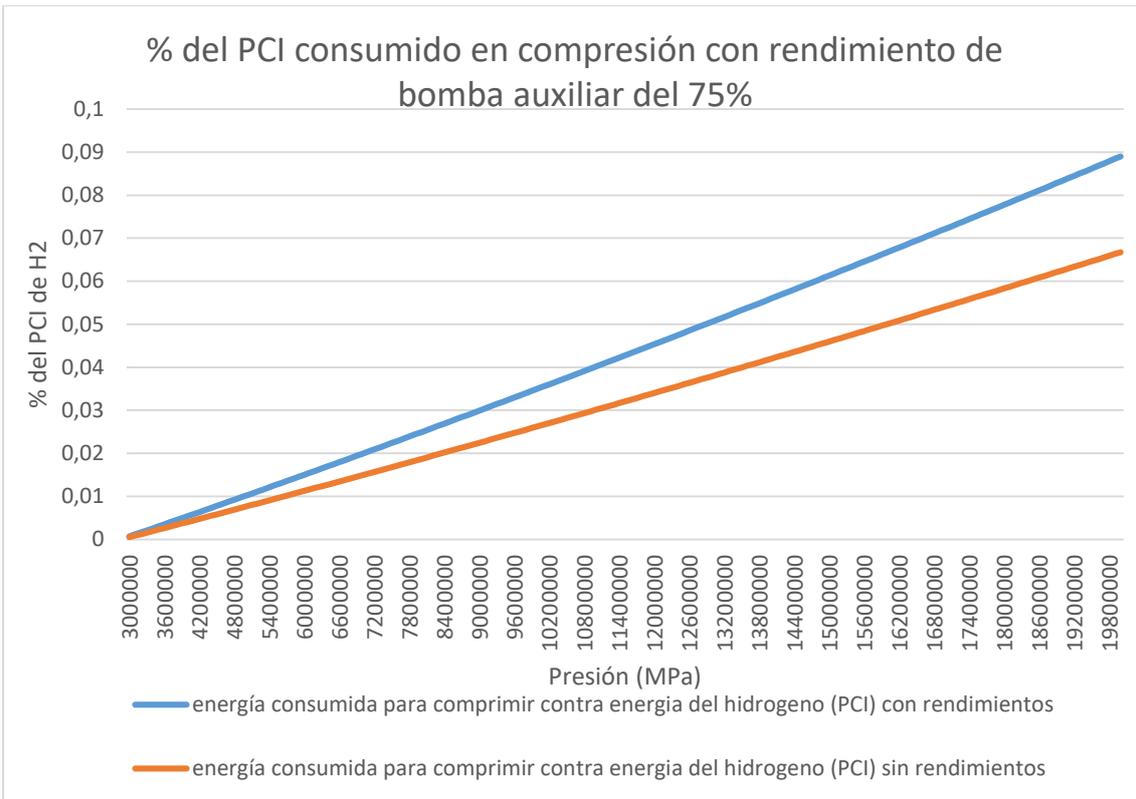
Gráfica 16 Gramos comprimidos por carrera de émbolo.



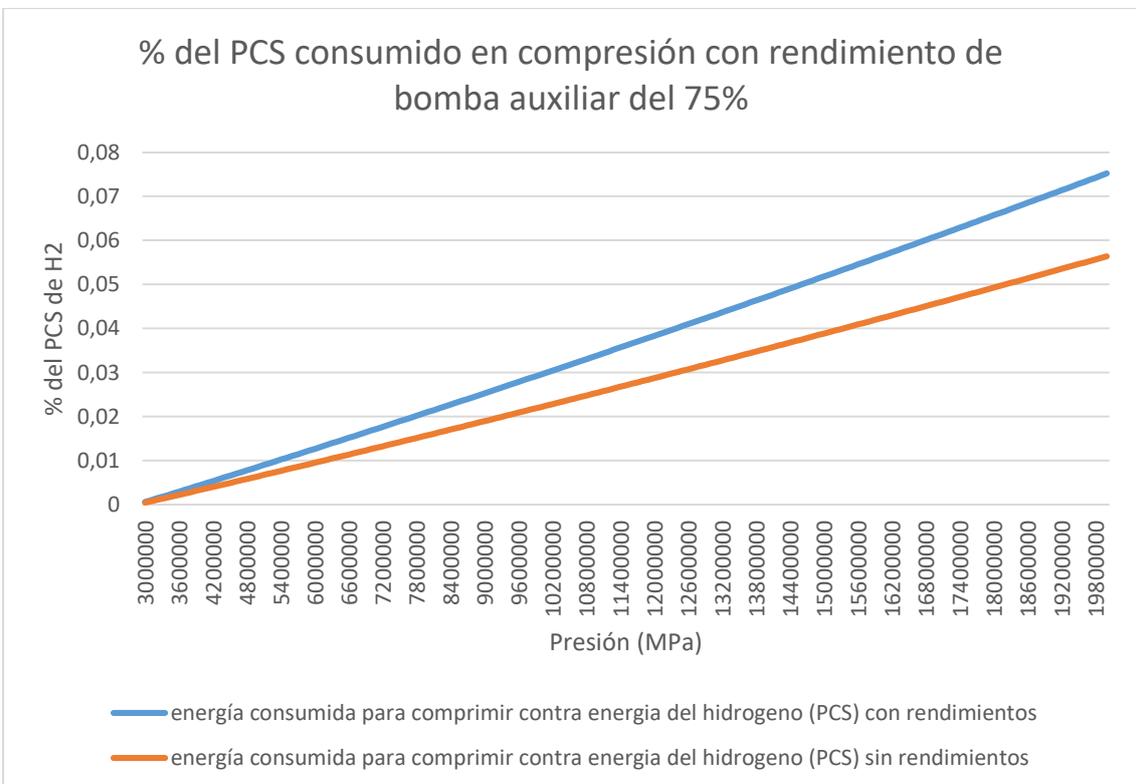
Gráfica 17 Energía y potencia consumida por la bomba.



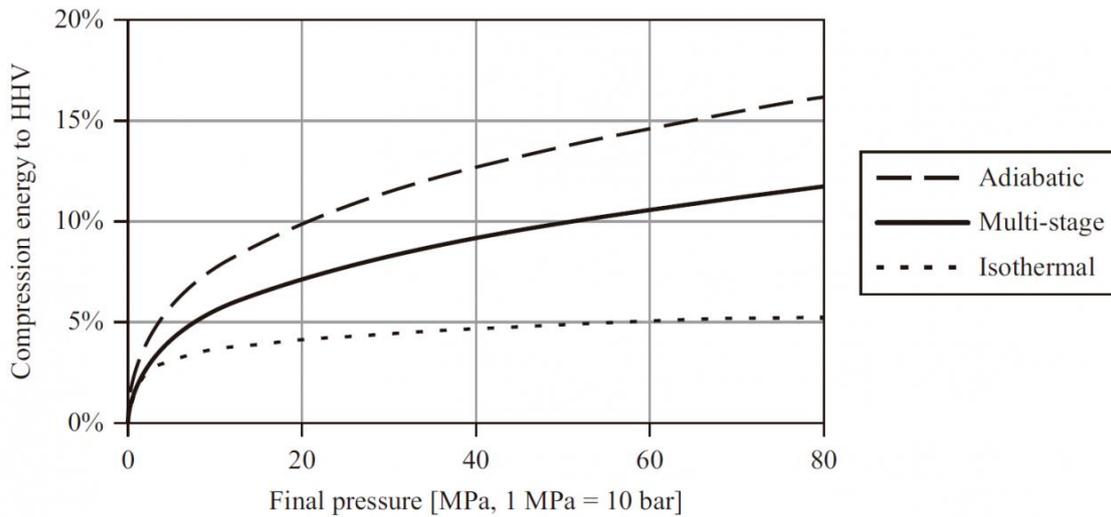
Gráfica 18 Trabajo o pérdidas por rozamiento de los segmentos por carrera.



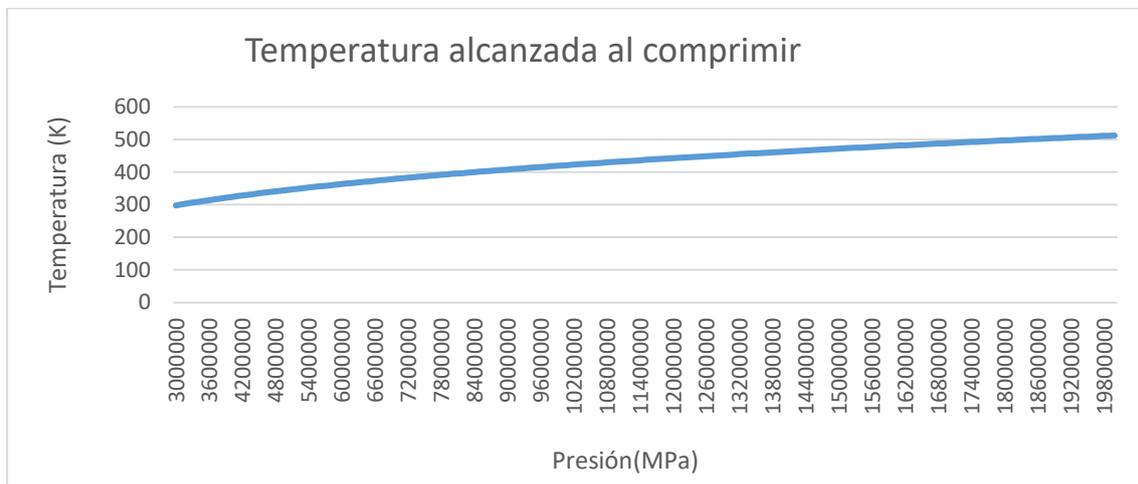
Gráfica 19 tanto por uno del poder calorífico inferior consumido según la presión del sistema de almacenamiento.



Gráfica 20 Tanto por uno del poder calorífico inferior consumido según la presión del sistema de almacenamiento.



Gráfica 21 Coste energético para la compresión del hidrógeno en función del PCS.
Fuente: (SynerHy, 2022)



Gráfica 22 Temperatura del hidrógeno dentro de los cilindros una vez comprimido.

En la gráfica 22 se puede observar como la bomba de este proyecto roza el rendimiento multietapa, pero hay que tener en cuenta que parte de 30MPa que provienen del hidrolizador, aunque esto también es válido para el resto de las máquinas. Cada hidrolizador tiene su presión de entrega.

2.3.9 Refrigeración del caudal de la bomba de agua

El agua proveniente de la bomba auxiliar de agua requiere refrigeración y con ese objetivo debe instalarse un intercambiador de calor.

Aquí se calculará el flujo de aire necesario para su refrigeración.

$$\dot{W} - \dot{Q} = \dot{m}(u_2 + P_2 * v_2 - u_1 - P_1 * v_1)$$

Donde:

- \dot{W} trabajo.
- \dot{Q} flujo térmico.
- \dot{m} flujo másico.
- u energía interna específica.
- P_2 presión dos o uno según el subíndice.
- v_2 volumen específico.

Interpolando en tablas, sustituyendo e igualando \dot{Q} a cero:

$$\dot{W} = \dot{m}(u_2 + P_2 * v_2 - u_1 - P_1 * v_1)$$

$$\begin{aligned} \frac{29,5 * 10^6 N}{m^2} * \frac{0,000725708 m^3}{s} \\ = \frac{0,000725708 kg}{s} \\ * \left(u_2 + 29,5 * \frac{10^6 N}{m^2} * \frac{0,98881 m^3}{kg} - \frac{104880 J}{kg} - \frac{10^5 N}{m^2} * \frac{0,001 m^3}{kg} \right) \end{aligned}$$

$$u_2 = 435085 J/kg$$

Mirando en las tablas de agua como líquido comprimido y haciendo doble interpolación entre los valores de 250bar, 300bar, 100°C y 200°C, observamos que se encuentra a 105,74°C y 295bar en estado líquido.

Debido a ello, debemos enfriarlo mediante un intercambiador de aire y necesitaremos saber el caudal de aire requerido. Calentaremos el aire hasta 200 grados, aunque eso dependerá mucho del diseño final del intercambiador.

Primero hay que restarle la energía interna a 25°C del agua.

$$\dot{Q} = m_{\dot{a}gua}(u_2) - m_{\dot{a}ire}(u_1)$$

$$0 = 0,000725708kg/s(435085J/kg - 104727,49J/kg) \\ - m_{\dot{a}ire}(1006J/kg * 80K)$$

$$m_{\dot{a}ire} = 0,0029789g/s$$

$$\frac{m_{\dot{a}ire}}{\rho} = \frac{0,0029789kg/s}{1,19kg/m^3} = \frac{0,002503m^3}{s} \text{ ó } 2,5 \text{ litros/s}$$

La potencia va a ser muy baja, se podría despreciar, para los cálculos de potencia. Viendo curvas de ventiladores, está muy por debajo de todas. Puede que sea suficiente con convección natural, aunque no compensará un intercambiador más grande.

2.3.10 Refrigeración del hidrógeno por aire

En primera instancia es necesario calcular el caudal másico con las ecuaciones de gases ideales con el factor de compresibilidad.

$$P * \frac{V}{m} = Z * R' * T$$

Donde:

- P presión.
- V volumen.
- "m" Masa.
- Z factor de compresión
- R' constante universal del hidrógeno, o la constante de los gases ideales dividida por el peso medio molecular del dihidrógeno.
- T temperatura

$$20 * 10^6 * \frac{0,2^2 * \pi}{4} * L + 0,0001663284814}{11,68927145} = 1,077 * 4,124472 * 512$$

$$L = 0,0370173m$$

Volvemos a la misma fórmula, pero con el volumen bombeable.

$$P * \frac{V}{m} = Z * R' * T$$

$$20 * 10^6 * \frac{0,2^2 * \pi}{4} * 0,0370173}{m} = 1,077 * 4,124472 * 512$$

$$m = 10,2266086g$$

El flujo de calor sería:

$$\dot{Q} = \frac{m * c_p * \Delta T}{t} = \frac{10,2266086g * 14,5J/gK * 213,85K}{3,75s} = 8.456,25J/s$$

Donde:

- \dot{Q} flujo de calor o potencia térmica.
- m masa.
- c_p calor específico a presión constante.
- T temperatura.
- "t" tiempo.

Para un intercambiador los flujos másicos serían:

$$\dot{Q}_{hidrogeno} - \dot{m}_{aire} * c_p * \Delta T = 0$$

$$8.456,25 - \dot{m}_{aire} * 1010,5J/kgK * 200K = 0$$

$$\dot{m}_{aire} = 0,0418419kg/s$$

El caudal de aire necesario sería:

$$Q = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho} = \frac{0,0418419kg/s}{1,19kg/m^3} = 0,0351612m^3/s$$

La velocidad se calcularía entre el área:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,0351612}{\frac{0,4^2 * \pi}{4}} = \frac{0,279804m}{s}$$

ó 1km/h, muy silencioso.

Se deberá escoger un ventilador que cumpla con el caudal, aunque prácticamente valdría con la convección natural del aire, dependiendo del diseño del intercambiador.

2.3.11 Traslado de gases

Mediante la Fórmula de Renouard cuadrática calcularemos la presión necesaria para el traslado y las posibles pérdidas de presión.

$$P_1^2 - P_2^2 = 51,5 * S * L_e * Q^{1,82} * D^{-4,82}$$

Donde:

- P_1 presión absoluta inicial (bar).
- P_2 Presión absoluta final (bar).
- S densidad ficticia o de cálculo (adimensional).
- L_e longitud equivalente del tramo (m).
- Q caudal de gas (m^3N/h), en condiciones normales (1,01325 bar)
- D diámetro de la tubería (mm).

$$200^2 - P_2^2 = 51,5 * 0,0748 * 30 * 128,32287^{1,82} * 8^{-4,82}$$

$$P_2 = 199,911877 \text{ bar}$$

Prácticamente no pierde presión.

Si queremos conocer la velocidad por la tubería.

$$V = \frac{378 * Q * Z}{P * D^2}$$

Donde:

- V velocidad del gas en m/s.
- Q caudal del gas en m^3N/h , en condiciones normales
- P presión absoluta en bar.
- D diámetro de la tubería en mm.
- Z factor de compresibilidad.

Falseando el caudal pulsante como si fuese constante, para lograr su valor máximo.

$$V = \frac{378 * Q * Z}{P * D^2} = \frac{378 * 519,98 * 1,0765}{200 * 8^2} = 16,53 \text{ m/s}$$

2.3.12 Cálculo de transferencia de calor en los cilindros con brida

Se calculará la transferencia de calor del hidrogeno del cilindro hacia el agua de refrigeración.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{t\acute{e}rmica}} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{1}{h_i * 2 * \pi * r_1 * L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k_{acero} * L} + \frac{1}{h_{ext} * 2 * \pi * r_2 * L}}$$

Donde:

- h_i coeficiente de película, de convección o transmisión superficial del fluido interno.
- h_{ext} coeficiente de película, de convección o transmisión superficial del fluido externo.
- r_1 radio interno.
- r_2 radio externo.
- L longitud de tubería.
- T_{int} temperatura del fluido interno.
- T_{ext} temperatura del fluido externo.
- $\Sigma R_{t\acute{e}rmica}$ sumatorio de resistencias térmicas.
- ΔT diferencia de temperatura
- \dot{Q} potencia térmica.

Necesitamos calcular los coeficientes de convección. Comenzamos por h_i del hidrógeno. Para ello necesitamos calcular su número de Reynolds.

$$Re_{D_{H_2}} = \frac{u * d}{\nu} = \frac{0,04m/s * 0,2m}{0,009343m^2/s} = 0,85625$$

Donde:

- $Re_{D_{H_2}}$ número de Reynolds, adimensional.
- “u” velocidad de fluido, m/s.
- “d” diámetro de la tubería.
- “v” viscosidad cinemática, m²/s

El número de Nusselt para este caso de flujo interno laminar por el número de Reynold tan bajo, inferior a 2.300, se puede sacar de una tabla, con el valor de 4,364.

$$Nu_D = 4,364$$

Prosiguiendo con el cálculo, el coeficiente de película es igual a:

$$h_i = \frac{K_{H_2} * Nu_{D_{H_2}}}{D_1} = \frac{0,1815W/mK * 4,364}{40,2} = 3,96W/m^2K$$

Donde:

- h_i coeficiente de convección, W/mK.
- K_{H_2} coeficiente de conductividad térmica, W/mK.
- $Nu_{D_{H_2}}$ número de Nusselt, adimensional.
- D_1 diámetro

De forma análoga hacemos el mismo proceso para calcular el coeficiente de convección del agua. Previamente necesitamos conocer la velocidad del agua y la viscosidad cinemática.

$$u = \frac{Q}{A} = \frac{0,001m^3/s}{\frac{(0,31^2 - 0,3^2) * \pi}{4} m^2} = 0,2087278m/s$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,001Pa * s}{1000kg/m^3} = 10^{-6}m^2/s$$

μ es la viscosidad dinámica y ρ la densidad.

$$Re_{D_{H_2}} = \frac{u * d}{v} = \frac{0,20872278m/s * 0,25m}{10^{-6}m^2/s} = 52181,95$$

El número de Prandtl se calcula según la siguiente expresión:

$$Pr_{agua} = \frac{\mu * c_p}{k} = \frac{0,001Pa * s * 4200J/kgK}{0,561W/mK} = 7,4866$$

Donde;

- Pr_{agua} número de Prandtl, adimensional.
- μ viscosidad dinámica, Pa*s.
- c_p calor específico a presión constante.
- k conductividad térmica, W/mK.

Sacamos el número de Nusselt. Donde μ es la viscosidad evaluada a la temperatura del fluido y μ^o viscosidad evaluada a la temperatura de la pared.

$$Nu_D = 0,027 * Re^{0,8} * Pr^{0,33} * \left(\frac{\mu}{\mu^o}\right)^{0,14} = 0,027 * 52181,95^{0,8} * 7,4866^{0,33} * (1)^{0,14} \\ = 311,812$$

El coeficiente de convección resultará:

$$h_{ext} = \frac{K_{agua} * Nu_{D_{agua}}}{D_1} = \frac{0,561W/mK * 311,8128}{0,2} = 874,63W/m^2K$$

Prosiguiendo con la transferencia de calor resolveremos la expresión.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{t\acute{e}rmica}} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\frac{1}{h_i * 2 * \pi * r_1 * L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * k_{acero} * L} + \frac{1}{h_{ext} * 2 * \pi * r_2 * L}}$$

$$\dot{Q} = \frac{520K - 298,15K}{\frac{1}{3,96 * 2 * \pi * 0,1 * 0,08} + \frac{\ln(0,15/0,1)}{2 * \pi * 16,2 * 0,08} + \frac{1}{874,63 * 2 * \pi * 0,15 * 0,08}}$$

$$= \frac{221,85}{5,0238 + 0,0498 + 0,01516}$$

$$\dot{Q} = 43,596W$$

Es muy poca transferencia de calor para enfriar el hidrogeno, el problema está en la poca convección del hidrógeno aumentando su resistencia térmica. En vehículos se ven formas forjadas en los pistones para aumentar la turbulencia y mejorar la mezcla, se podría estudiar algo parecido para implementar en el embolo y mejorar la transferencia de calor.

Poniendo un ejemplo de la capacidad térmica del acero y el agua con las mismas temperaturas, solo ellos serían capaces de conducir hasta 3415,18W.

$$\dot{Q} = \frac{221,85}{0,0498 + 0,01516} = 3415,18W$$

2.3.13 Consumo bombas de agua de refrigeración de cilindros y de las roscas centrales.

Las bombas de refrigeración tendrán un consumo bajo, pero es necesario calcularlo.

Conociendo su caudal de 1 litro cada una, ya que necesitan crear una ligera turbulencia para disipar energía, estimamos la potencia de los cuatro circuitos simultáneamente.

Usando Bernoulli para calcular la altura hidráulica de la bomba y estimando unas perdidas exageradas por tuberías, intercambiador y accesorios de 1metro, también se estimará altura de agua del depósito de medio metro y una altura hasta el intercambiador de 3m.

Anteriormente necesitamos conocer la velocidad del caudal por la tubería general de los tres circuitos

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,004}{\frac{0,05^2 * \pi}{4}} = 2,0372m/s$$

Donde:

- Q caudal.
- “v” velocidad.
- A área.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 * g} + H - \lambda = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 * g}$$

Donde:

- “z” altura geométrica.
- P presión.
- V velocidad.
- “g” gravedad.
- “ γ ” igual a la densidad por la gravedad.
- H altura de presión de la bomba.
- “ λ ” pérdidas de presión en tuberías y accesorios.

$$0 + 0,5 + 0 + H - 1 = 3 + 0 + \frac{2,0372^2}{2 * 9,81}$$

$$H = 3,7115m$$

Calculando la potencia de la bomba para los cuatro circuitos y con la misma nomenclatura anterior:

$$P = \gamma * Q * H$$

$$P = 9810 * 0,004 * 3,7115 = 145,64W$$

El calor absorbido será una cantidad muy baja 43,6W*2 cilindros desde el hidrógeno y aproximadamente la mitad de la potencia que generen los segmentos, suponiendo que la mitad se absorba por el segmento y la otra mitad por el cilindro. Lo que sería $1512,77 \text{ J} / (3,75s * 2) = 287,265W$ a 200bar y plena potencia de la bomba. Serían unos 487,73W a disipar.

$$\dot{Q} = m_{agua} \dot{h} (h_2 - h_1)$$

$$287,265W = 4kg/s(h_2 - 104727,49J/kg)$$

$$h_2 = 104799,3J/kg$$

Con las tablas líquido saturado sabemos que h_2 para 1 bar es 417460J/kg por tanto podemos relacionar mediante la temperatura sabiendo que es a 99,63°C. así conoceremos su temperatura y conocer la temperatura a la que podrá intercambiarse calor en el intercambiador.

$$H_1/T_1 = H_2/T_2$$

$$\frac{417460J}{kg} * \frac{T_2}{99,63°C} = 104799,3J/kg$$

$$T_2 = 25,01115°C$$

Prácticamente no se calienta, se disiparía el calor a través de las tuberías y el depósito, no tiene sentido instalar un intercambiador.

3. ASPECTOS ECONÓMICOS

3.1 Descripción del presupuesto

Se han realizado presupuestos para 3 líneas de negocio, una unidad individual para una industria concreta y su necesidad, por lo que se enfocara como un encargo de estudio a una ingeniería sin personal dedicado a ventas, y los otros dos son enfocados a la venta. Ya que se presupuestan los costes en función de las unidades de los lotes. Estas son de 100 unidades y 1.000. Para visualizar mejor las tablas se puede hacer zoom en ellas. Esas unidades se estimarán como unidades de venta anuales. Evidentemente, las mil unidades harán referencia a venta a mercados internacionales, con un mayor personal y mayores costos en logística.

concepto	Tipo fabricación	unidades por ensamble	1 unidad a 2,2	1 juego a 2,2	material a 2,2	Fabricación	Molde
Cilindro con brida x 2	fundición +mecanizado	2	979,46	1958,92	364,46	315	300
Cilindro maestro	fundición +mecanizado	1	2601,96	2601,96	1541,96	660	400
Eje	fundición +mecanizado	1	929	929	379	300	250
Chaveta x 2	mecanizado	2	52,52	105,04	0,02	52,5	0
Chapa de unión x 8	mecanizado	8	18,77	150,16	0,01	18,76	0
Tubo contador x 4	mecanizado a partir de tubo	4	186,25	745	9,25	177	0
Segmentos 131mm x 8	comprados a fabricante	8	40,04	320,32	0,04	40	0
Segmentos 200mm x 6	comprados a fabricante	6	60,04	360,24	0,04	60	0
Rosca interna refrigerada x 2	fundición +mecanizado	2	399,09	798,18	214,09	150	35
Émbolo x 2	mecanizado	2	228,7	457,4	63,7	165	0
Botellones x 16	fundición +mecanizado	16	2143,14	34290,24	1543,14	300	300
Guardaválvulas x16	fundición +mecanizado	16	127,15	2034,4	22,15	70	35
Tornillos TC36	comprados	20	5	100			
Arandelas		20	3	60			
Tuercas		20	4	80			
Infraestructura	contenedor 40' acondicionado a cuenta del cliente		7800	7800			
Tuberías y racores		1	2500	2500			
Electroválvulas		1	1500	1500			
Sistemas de control		1	6000	6000			
Intercambiadores de calor agua/aire		1	550	550			
Intercambiadores de calor de tubos		2	3000	3000			
Bomba refrigeración agua		1	400	400			
Motor 40kW DC y MCU		1	3000	3000			
Bomba alta presión		1	12000	12000			
Memoria	40diasx12h/dx35€/h			16800			
Mano de obra de instalación				4000			
Sumatorio				102540,86	4137,86	2308,26	1320
Beneficio industrial	6%	102540,86		6152,4516			
Sumatorio + IVA 21%				131518,907	precio unitario		
Impuestos sobre beneficios	2 primeros años 15%	6152,4516	922,86774				
	beneficio tras impuestos		5229,58386				

Tabla 8 Costes a 1 unidad.

concepto	Tipo fabricación	unidades por ensamble	100 unidades a 2,2	100 juegos a 2,2	material a 2,2	Fabricación	Molde
Cilindro con brida x 2	fundición +mecanizado	2	722,95	1445,9	364,46	233,49	125
Cilindro maestro	fundición +mecanizado	1	2401,96	2401,96	1541,96	660	200
Eje	fundición +mecanizado	1	829	829	379	300	150
Chaveta x 2	mecanizado	2	7,965	15,93	0,015	7,95	0
Chapa de unión x 8	mecanizado	8	7,63	61,04	0,01	7,62	0
Tubo contador x 4	mecanizado a partir de tubo	4	154,25	617	9,25	145	0
Segmentos 131mm x 8	comprados a fabricante	8	40,04	320,32	0,04	40	0
Segmentos 200mm x 6	comprados a fabricante	6	60,04	360,24	0,04	60	0
Rosca interna refrigerada x 2	fundición +mecanizado	2	337,09	674,18	214,09	88	35
Émbolo x 2	mecanizado	2	128,7	257,4	63,7	65	0
Botellones x 16	fundición +mecanizado	16	2143,14	34290,24	1543,14	300	300
Guardaválvulas x16	fundición +mecanizado	16	122,15	1954,4	22,15	65	35
tornillos TC36	comprados	20	5	100			
arandelas		20	3	60			
tuercas		20	4	80			
infraestructura	contenedor 40' acondicionado a cuenta del cliente		7800	7800			
tuberías y racores		1	2500	2500			
electroválvulas		1	1500	1500			
Sistemas de control		1	2040	2040			
Intercambiadores de calor agua/aire		1	550	550			
Intercambiadores de calor de tubos		2	3000	3000			
Bomba refrigeración agua		1	400	400			
motor 40kW DC y MCU		1	3000	3000			
bomba alta presión		1	12000	12000			
Memoria	40diasx12h/dx35€/h				168		
Mano de obra de instalación					0		
Sumatorio				76425,61	4137,855	1972,06	845
100 Bombas		100	76425,61	7642561			
Personal logística		1	1500 €/mes	27279			
Personal ventas		2	1500 €/mes	54558			
Dirección		1	2500 €/mes	45465			
Personal montajes		8	1800 €/mes	261878,4			
Logística interna		100	50	15000			
Logística a cliente		100	500	150000			
Vehículos de empresa		2	300 €/mes	7200			
Alquileres		1	98000 €/mes	1176000			
grúa		1	35000 € segunda mano	35000			
Suministros		1	1000 €/mes	12000			
Ventas +		6%	9426941,4	9992557,884			
Beneficio industrial		6%	9426941,4	565616,484		precio unitario	
Sumatorio + IVA 21%						120909,9504	
Impuestos sobre beneficios	2 primeros años 15%		565616,484	84842,4726			
	beneficio tras impuestos			480774,0114			

Tabla 9 Costes a 100 unidades.

Los gastos en la grúa se han obtenido de una grúa portacontenedores de segunda mano a la venta en www.milanuncios.com (Alquitrailer, 2023). Los precios de alquiler de las naves industriales se han buscado en www.fotocasa.es (Fotocasa, a, b). Los costes laborales se han calculado con los costes laborales de aportaciones a la seguridad social: desempleo, contingencias comunes, FOGASA y formación profesional. En principio sin pluses, ya que es una empresa de nueva creación. Por ello los dos primeros años tributará el impuesto sobre beneficios al 15%. Aunque puede ser el caso de tener más desgravaciones fiscales que rebajen el impuesto, como pueda ser el leasing de los vehículos o por contratación de personal con minusvalía.

Se aprecia claramente que cuantas más unidades fabricadas, se reducen los costos y es posible ofrecer un precio unitario menor. Curiosamente el margen de beneficios por unidad se reduce. El Margen de beneficio no es muy amplio y tal vez sea escaso para hacer un acopio de provisiones para realizar inversiones en la empresa y hacer frente a posibles contingencias que surjan. Debiera

hacerse un estudio de viabilidad económica más profundo para analizar la viabilidad a futuro. Podría ser necesario ampliar el margen de beneficio.

concepto	Tipo fabricación	unidades por ensamblaje	1000 unidades a 2,2	1000 juegos a 2,2	material a 2,2	Fabricación	Molde	
Cilindro con brida x 2	fundición +mecanizado	2	722,95	1445,9	364,46	233,49	125	
Cilindro maestro	fundición +mecanizado	1	2401,96	2401,96	1541,96	660	200	
Eje	fundición +mecanizado	1	829	829	379	300	150	
Chaveta x 2	mecanizado	2	7,564	15,128	0,014	7,55	0	
Chapa de unión x 8	mecanizado	8	7,53	60,24	0,01	7,52	0	
Tubo contador x 4	mecanizado a partir de tubo	4	153,25	613	9,25	144	0	
Segmentos 131mm x 8	comprados a fabricante	8	40,05	320,4	0,05	40	0	
Segmentos 200mm x 6	comprados a fabricante	6	60,05	360,3	0,05	60	0	
Rosca interna refrigerada x 2	fundición +mecanizado	2	337,09	674,18	214,09	88	35	
Émbolo x 2	mecanizado	2	128,7	257,4	63,7	65	0	
Botellones x 16	fundición +mecanizado	16	2143,13	34290,08	1543,13	300	300	
Guardaválvulas x16	fundición +mecanizado	16	122,15	1954,4	22,15	65	35	
tuornillos TC36	comprados	20	5	100				
arandelas		20	3	60				
tuercas		20	4	80				
infraestructura	contenedor 40' acondicionado a cuenta del cliente		7800	7800				
tuberías y racores		1	2500	2500				
electroválvulas		1	1500	1500				
Sistemas de control		1	2004	2004				
Intercambiadores de calor agua/aire		1	550	550				
Intercambiadores de calor de tubos		2	3000	3000				
Bomba refrigeración agua		1	400	400				
motor 40kW DC y MCU		1	3000	3000				
bomba alta presión		1	12000	12000				
Memoria	40diasx12h/dx35€/h				16,8			
Mano de obra de instalación					0			
sumatorio					76232,788	4137,864	1970,56	845
100 Bombas	1000	76425,61			76425610			
Personal contabilidad	1	1700 €/mes			30916,2			
Personal logística	1	1500 €/mes			27279			
Personal ventas	8	1500 €/mes			218232			
Dirección	1	2500 €/mes			45465			
Personal montajes	80	1800 €/mes			2618784			
Logística interna	1000	50	3		150000			
Logística a cliente	1000	1500	3		4500000			
Vehículos de empresa	2	300 €/mes			7200			
Alquileres	1	42500 €/mes			510000			
grua	1	35000 € segunda mano			35000			
Suministros	1	10000 €/mes			120000			
Ventas +	6%	84688486,2	89769795,37					
Beneficio industrial	6%	84688486,2		5081309,172		precio unitario		
Sumatorio + IVA 21%					108621452,4		108621,4524	
Impuestos sobre beneficios	2 primeros años 15%	5081309,172	762196,3758					
	beneficio tras impuestos		4319112,796					

Tabla 10 Costes a 1000 unidades.

El precio final unitario de la bomba a 1000 unidades parece competitivo a pesar de la escasa cantidad de precios que se ha podido observar.

El presupuesto se ha desarrollado de una forma grosera y solo tiene la pretensión de ser una mera aproximación por la dificultad de calcular con precisión los costes de los talleres de fundición en la elaboración de los moldes de arena y cera, en su uso de moldes a cera perdida, tiempos de mecanizado y soldadura de ciertos elementos como las boquillas o la chapa del cilindro con brida mediante soldadura TIG (tungsten inert gas).

En lo que respecta a los segmentos se optó por la compra, ya que la técnica de deposición de plasma de disulfuro de molibdeno y DLC (diamond like carbon), es cuestionable que esté a disposición de muchas empresas.

El precio de venta tampoco es excesivamente caro con respecto a segmentos normales en diámetros de pistón de motores comunes, según lo observado en distintas tiendas online, aunque fluctúa bastante el precio según la medida, tal vez por la demanda de ciertas medidas y no otras, pudiendo ser medidas mayores más económicas que otras inferiores. Se debería preguntar por la disposición a hacer trabajos a medida a varias empresas, aunque sería lógico pensar que el acabado de doble escalón en las puntas del segmento aumentará el precio, sumado a lotes mucho más cortos de lo habitual. Pero como los recubrimientos serán de unas micras similares, es de suponer que se podría usar el mismo autoclave de deposición por plasma junto con otros lotes de diferentes medidas y encargos de distintas empresas.

Un punto de exceso que resalta es el precio de los botellones, otra opción habría sido el aluminio 7075 con un liner de polímero como protección a la corrosión por hidrógeno, a un precio de 2540€ la tonelada frente a los 2200€ del acero inoxidable S316L y una densidad menor para el aluminio de 2,8toneladas por metro cubico frente a las 8,025 toneladas del S316L. Los precios son aproximaciones basadas en precios obtenidos en múltiples vendedores de spanish.alibaba.com y es.made-in-china.com, ya que son los únicos que publican precios por tonelada, comparándolos con precios de chatarras y valorando que estos últimos deben ser considerablemente menores por los costes de reciclado, se estima que pueden ser costes orientativos, aunque haya demasiada variabilidad. Teniendo este acero unas capacidades mecánicas algo pobres, se hace difícil justificar la decisión del acero, pero en vista a la longevidad, puede ser una buena jugada, ya que los plásticos en general son atacados por el hidrógeno. El liner tardará pocos años en degradarse y el aluminio alguno más, por no hablar de la falta de límite de fatiga del aluminio, sus ciclos de vida son limitados, pero teniendo en cuenta que se dará un ciclo diario o casi cinco diarios como máximo, llegará mucho antes el final de su vida útil por corrosión en lugar de por fatiga. La diferencia de precios estaría en torno a 850€ por botellón.

El precio de la bomba es alto, pero comparando con ciertos productos de la competencia, no resulta tan cara. Llegando a precios excesivos para las bombas de electrolineras, que ofrecen precios de 500.000 a 1.000.000 de € para

presiones de 500 y 950 bar respectivamente (Gaitan, 2023)(min.22-23), con capacidades de entrega del orden de 20kg/h y 50kg/h de hidrógeno para cada bomba, para poder repostar un coche en unos seis minutos, que viene siendo el estándar, en el caso de la de 20kg/h sería mediante el uso de doble bomba. Teniendo en cuenta el caudal, las bombas comienzan a no ser tan caras, ya que la primera dobla el caudal de la bomba de este trabajo y la segunda la quintuplica (Hiperbaric, a) (Hiperbaric, b).

En cualquier caso, no es barato y creo que pocas empresas requerirán de estos servicios, preferirán almacenar a presiones menores, o directamente a presiones entregadas por el electrolizador, aunque esos depósitos de gran volumen tampoco son económicos. El criterio finalmente es del comprador. Todos los sistemas tienen sus fortalezas y debilidades.

A tenor de lo visto en otras instalaciones, los guardaválvulas son opcionales al tenerlos integrados en los palés, mediante chapa de acero que cubre las válvulas.

3.2 Análisis de rentabilidad

La rentabilidad de la instalación va a depender enormemente de la fuente de hidrógeno escogida, pudiendo variar enormemente, a día de hoy el hidrógeno gris, a partir del gas natural es la fuente más rentable y disponible de hidrogeno. Solo podrían hacerle sombra los yacimientos naturales de hidrógeno. Por tanto, la hidrólisis es cara energética y económicamente hablando. Si se opta por el hidrogeno verde hidrolizar al día los 50kg requeridos en el pliego de condiciones, supondría una potencia en placas fotovoltaicas muy grande. Haciendo un cálculo rápido y para una zona muy soleada con una irradiación equivalente de 4,5horas diarias.

$$\frac{50kg * 39,405kWh/kg}{0,7 \text{ rendimiento}} = 4,5h * \frac{1kWh}{m^2} * 0,21 * Am^2$$
$$Am^2 = \frac{50kg * 33,26kWh/kg}{0,7 * 4,5h * \frac{1kW}{m^2} * 0,21} = 2978,46m^2 \text{ de panel}$$

Esos casi 3.000 metros cuadrados serían en la mejor orientación y en una muy buena zona solar. En Algunas zonas del País Vasco la cantidad de Area requerida de panel sería el doble, teniendo en cuenta una buena orientación e inclinación. A pesar de que el precio de las placas actualmente está muy bajo llegando a los 135,52€ por paneles de 550W (Autosolar, a), Serían 1153 paneles como mínimo a 135,52€, unos 157.000 únicamente en paneles, sin tener en cuenta rendimientos de inversores, precios de accesorios de instalación, los inversores, etc. Los inversores han bajado de precio, 5.185€ para inversores trifásicos de 100kW (Autosolar, b), se podrían instalar 7 en paralelo para 630kW, resultando en 36.300 más accesorios e instalación. Estaríamos hablando de una instalación de unos 220.000€ con perfiles de montaje planos y con IVA (Autosolar, c).habría que añadirle la instalación y otros accesorios como cables ,distinto equipamiento eléctrico, alquiler de grúas si es sobre cubierta, etc... Sería una inversión total de 245.000€ aproximadamente.

Suponiendo un coste de electricidad medio de 0,15€/kWh y añadiéndole los impuestos a la luz eléctrica e IVA, el sistema fotovoltaico nos ahorraría anualmente 200.391,76€/año, por lo que en menos de año y cuarto la inversión

estaría amortizada. Siempre que la orientación y la inclinación del tejado sean óptimas. Aunque no fuese así la inversión sería algo mayor y con un periodo de retorno algo mayor, pero sigue siendo una buena inversión en caso de disponer del capital para realizarse.

Esta instalación obligaría a inscribirse como productor de energía eléctrica y pagar sus correspondientes tasas e impuestos de actividad industrial al superar los 100kW por ser un generador de electricidad. Se debe solicitar en el registro nacional de instalaciones de producción de energía eléctrica (REPRO) de la comunidad autónoma (Raulhola, 2022).

Este es un gas que se produce por necesidades de la industria química, petroquímica, el sector de la siderurgia, fertilizantes, industria alimentaria y algunos otros.

De momento no tiene sentido invertir en estaciones de servicio de hidrógeno por la poca cantidad de clientes potenciales, salvo zonas urbanas puntuales donde puedan existir cierta cantidad de vehículos o flotas de autobuses a hidrógeno en ciudades. Los precios son altos, ya que en los mejores modelos de Toyota llega a consumir 1,15 kilos de hidrógeno a los 100 kilómetros reales y no con ciclos NEDC o WLTP. Esto supondría un precio de 12,45€ por 1,15kg de hidrógeno con una electricidad a una media de 0,15€/kWh. A ese precio no podría competir contra los diésel, pero teniendo en cuenta que la electricidad producida fotovoltaicamente se paga en un entorno de 0,038€/kWh (Molina, 2022), haría caer el precio a casi un cuarto en caso de producción fotovoltaica por el coste de oportunidad. Solo teniendo en cuenta el coste de electricidad, ya que habría de amortizarse la inversión en los equipos e instalaciones, pero no sería descabellado pensar en la mitad de precio, 6,23€/100km. Ese coste sería menor al de un motor diésel consumiendo 4,5litros a 1,6€/litro (Geoportal, s.f.), mas no a igualdad de precio de vehículo. Algo que junto a la escasez de estaciones de servicio que dispensen hidrógeno, ahuyenta a posibles compradores.

El hidrógeno tendrá futuro como gas industrial por la dependencia de él en muchos procesos. Por ese motivo el proyecto está enfocado al sector industrial y no a la movilidad. Pero con la bajada de precios de tecnologías como

la solar fotovoltaica, se está abriendo su ventana de oportunidad en la competición frente a otros combustibles de automoción. Esa opción debe tenerse presente a futuro según la evolución del sector y lanzar otros modelos de bomba a mayores presiones y caudales.

La dificultad de acceso a fuentes de hidrógeno por ausencia de distribuidores cercanos, puede ser una opción en zonas remotas, es raro que haya grandes industrias, una excepción podría ser la industria alimentaria. Aunque será un nicho de mercado para las bombas muy excepcional en caso de existir, ya que el suelo industrial está muy delimitado.

En cualquier caso, es un sector en el que hay competencia, e ingresar con un nuevo modelo de bomba necesitaría mucho esfuerzo en marketing, y tener unas características destacables sobre el resto.

No se han indicado costes de equipamiento ni amortización ya que se entiende que se fabrican las piezas por un tercero y se ensamblan mediante una empresa contratista. Debido a los altos costes de los equipos de una acería y el desconocimiento de precios de equipos como un horno de arco eléctrico para fusión, aunque sean de segunda mano, las instalaciones y adecuaciones que conllevaría, hacen arriesgada la inversión en tales equipos. Si no se dispone de una fundición previamente y no se pretende disponer de la fundición para otros trabajos sería del todo inviable. Los tornos y otras máquinas para mecanizado por contraparte, pueden ser caras, aunque costeables, y siempre tienen compra/venta en el mercado industrial de segunda mano. Por tanto, podría plantearse la fabricación y montaje, añadiendo los costes laborales, sociales, de maquinaria, de alquiler de locales, marketing/ventas, portes, suministros y otros. Desde luego, estos gastos solo serían justificables en caso de lotes grandes, por encima de las 1000 unidades. Y haría aumentar precios por los altos costes de maquinaria, locales y adecuación de los mismos. A ello hay que sumarle el beneficio industrial y acopios para reinversión y daños de maquinaria. Si no hay un mercado claro y bien definido para este tipo de maquinaria de almacenamiento, no estaría justificado el gasto. Es más bien un nicho de mercado a medida para las necesidades de una tipología de industrias. A pesar de poder adecuarse a multitud de necesidades, el sistema tiene sus limitaciones.

Si una cartera clara de clientes o un mercado que pueda absorber 1000 unidades es difícil justificar la adquisición de maquinaria pesada como el horno de arco eléctrico e invertir en sus instalaciones que tendrán un coste aún más caro, lo que obligara a subir los costes de la bomba, haciéndola menos atractiva con respecto a las ofertas de la competencia.

4. Conclusiones

La solución escogida para este proyecto ha sido compleja, pero finalmente satisfactoria pese algunos cambios y miniaturizaciones, ya que versiones previas eran muy grandes, aunque mejorasen el rendimiento, pero eran moles que dispararían el presupuesto constructivo de la bomba.

Los segmentos pueden ser el verdadero talón de Aquiles del proyecto si no cumplen las expectativas, aun así, puede que funcionen mejor de lo esperado, ofreciendo rozamientos 3 veces inferiores. Aunque eso no se puede saber sin un estudio tribológico en profundidad hasta el fallo. La bibliografía para este fin era escasa, alguna de pago, y no ofrecían mucha información sobre el asunto. Por lo que ha sido necesario desarrollar un método propio para el análisis de estos dispositivos, basado en la teoría de estructuras. En otros trabajos que pude consultar, en todos se determinaba el arrastre o rozamiento por ensayos empíricos en bancos de pruebas con dinamómetros.

Por esta razón no puedo afirmar que la maquina funcionará sin problemas en periodos razonables sin mantenimiento de los segmentos, pero si espero que lo haga mejor que las de segmentos de teflón o grafito, de las que dudo mucho de la vida útil de sus segmentos.

Otra mejora incorporada que no he visto en otras máquinas es incorporar cerca del escape la válvula que cambia la posición entre admisión y escape. Se ha recurrido a este método para mejorar el rendimiento volumétrico de compresión a tener un menos volumen de recámara, otros diseños incorporan dos agujeros con válvulas antirretorno, que aumentan el volumen.

Un punto malo en este aspecto ha sido la dificultad de no poder llegar al final del pistón aprovechando todo el recorrido del cilindro para mejorar el rendimiento volumétrico, debido a que el émbolo golpearía la pared de la cámara y progresivamente se iría causando un daño en el fondo de la cámara. Esto se soluciona en sistemas hidráulicos mediante un sistema de amortiguación mediante elementos de caucho que funcionan como colchones con el propio fluido de trabajo que los llena y vacía en contacto con el émbolo.

Desgraciadamente al ser un diseño monoetapa, la temperatura asciendo por encima de los 160°C lo que dañaría los elementos de caucho. No pudiéndose utilizar esta técnica para este caso.

Del mismo modo hay limitaciones en la celeridad de actuación de las válvulas de control de entrada y salida a los tres cilindros, además de ciertas desviaciones típicas en los tiempos de actuación. Es crucial la compra de válvulas de control fiables en los tiempos de cierre y con poca demora de actuación, de modo contrario, se complicará enormemente la labor de programación o incluso se tendrá que hacer más lenta la llegada al final de carrera para evitar golpes del émbolo en el fondo del cilindro, en caso de no disponer de válvulas de calidad en lo referente a tiempos de reacción.

Este diseño es altamente modificable, teóricamente incluso se podría hacer funcionar con agua a presión de un salto de agua, aunque lógicamente, para presiones mucho menores. El límite lo pone la imaginación y la resistencia de los materiales.

5. Bibliografía

- Alquitrailer. (22 de agosto de 2023). GRUA PORTACONTENEDORES. Recuperado el 11 de septiembre de 2023, de <https://www.milanuncios.com/gruas/grua-portacontenedores-463922155.htm>: <https://www.milanuncios.com/gruas/grua-portacontenedores-463922155.htm>
- Amos, J. (28 de enero de 2017). El "metal maravilla": los investigadores que aseguran haber creado el codiciado hidrógeno metálico que puede revolucionar la ciencia. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de BBC: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-38776151#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20met%C3%A1lico%20dar%C3%ADa%20a%20los%20cohetes%20una,espacial%20estadounidense%20tambi%C3%A9n%20est%C3%A1%20fascinada%20con%20el%20material.>
- Amos, W. A. (2004). Updated Cost Analysis of Photobiological Hydrogen Production from *Chlamydomonas reinhardtii* Green Algae. National Renewable Energy Laboratory. Colorado: National Renewable Energy Laboratory. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35593.pdf>
- Apilados. (22 de octubre de 2017). Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques. Recuperado el 2 de agosto de 2023, de Apilados: <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- Austin. (22 de octubre de 2020). Guía completa para el recubrimiento DLC (recubrimiento tipo diamante). Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de DEK: <https://www.dekmake.com/es/gu%C3%ADa-para-el-recubrimiento-dlc/>
- Autosolar. (a). Panel Solar 550W Monocristalino PERC Tensite. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Autosolar: <https://autosolar.es/panel-solar-24-voltios/panel-solar-550w-monocristalino-perc-tensite>

Autosolar. (b). Inversor Trifásico Growatt MAX 100KTL3-X LV. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Autosolar: <https://autosolar.es/inversores-de-red-trifasicos/inversor-trifasico-growatt-max-100ktl3-x-lv>

Autosolar. (c). Estructura 4 Paneles 30-45mm Coplanar Falcat. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Autosolar: <https://autosolar.es/estructuras-cubierta-metalica/estructura-4-paneles-30-45mm-coplanar-falcat>

Bixler, C. (21 de julio de 2017). Efectos del hidrógeno en el medio ambiente. Recuperado el 5 de agosto de 2023, de <https://www.puomotores.com>: <https://www.puomotores.com/13108240/efectos-del-hidrogeno-en-el-medio-ambiente>

Cabello, L. (26 de agosto de 2021). Foelectrocatalisis, el proyecto de innovación de Repsol y Enagás que simplifica la electrolisis, busca novio. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de <https://www.pv-magazine.es/>: <https://www.pv-magazine.es/2021/08/26/foelectrocatalisis-el-proyecto-de-innovacion-de-repsol-y-enagas-que-simplifica-la-electrolisis-busca-novio/>

Ciencia de Hoy. (s.f.). El proceso de fabricación del caucho. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Ciencia de Hoy: <https://cienciadehoy.com/el-proceso-de-fabricacion-del-caucho/#:~:text=La%20alta%20viscosidad%20%28resistencia%20al%20flujo%29%20de%20la,%28hasta%20300%20grados%20Fahrenheit%29%20para%20causar%20la%20vulcanizaci%C3%B3n.>

Comisión Europea. (s.f.). Cumplir el Pacto Verde Europeo. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Comisión Europea: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_es

Comisión Europea. (s.f.). Un Pacto Verde Europeo. Esforzarnos por ser el primer continente climáticamente neutro. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de commission.europa.eu: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

Competición, A. M. (22 de junio de 2021). Pistones, segmentos y bulones - "Preparación de motores de serie para competición" Cap.8 Hd. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=V1D1oNaulbl>

D. Graf, N. M. (2008, august 21). Economic comparison of solar hydrogen generation by means of thermochemical cycles and electrolysis. International Journal of Hydrogen Energy, 4511-4519. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319908006587>

DILO. (s.f.). <https://dilo.com/es/productos-de-alta-presion/productos>. Recuperado el 24 de julio de 2023, de DILO: https://dilo.com/fileadmin/dilo_us/4._High_Pressure_Products/HP_Catalog_English_05.2020_Rev_1.pdf

Ecolventos. (11 de Marzo de 2023). ¿Qué es y para qué sirve un electrolizador?: Pieza clave en la producción de Hidrógeno. Recuperado el 31 de julio de 2023, de Ecolventos: <https://ecoinventos.com/electrolizador/#:~:text=La%20principal%20caracter%20de%20estos%20electrolizadores%20son%20que,m%20bajos%20en%20torno%20a%20tres%20kilovatios%20hora>.

Engineers Edge. (2023). Molybdenum Disulfide (MoS₂) Coatings Lubrication Review. (E. Edge, Editor) Recuperado el 10 de agosto de 2023, de Engineers Edge: https://www.engineersedge.com/lubrication/molybdenum_disulfide_characteristics.htm

engineers edge. (n.d.). Molybdenum disulfide (MoS₂) coating lubrication review. <https://www.engineersedge.com/>. Retrieved agosto 10, 2023, from https://www.engineersedge.com/lubrication/molybdenum_disulfide_characteristics.htm

Fdez-Bolaños Badía, C. (2005). Trabajo Fin de Carrera. En U. d. Escuela Superior de Ingenieros, Energetica del hidrógeno. Contexto, estado actual

y perspectivas de futuro. (págs. 73-78). Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3823/fichero/2.4+Propiedades+del+Hidr%C3%B3geno.pdf>

Fotocasa. (a). Nave industrial de alquiler en Barrio Aretxalde, Lezama. Recuperado el 11 de septiembre de 2023, de Fotocasa: <https://www.fotocasa.es/es/alquiler/local-comercial/lezama/lezama/164815524/d?from=list>

Fotocasa. (b). Nave industrial de alquiler en Avenida Bilbao, Ortuella. Recuperado el 11 de septiembre de 2023, de Fotocasa: <https://www.fotocasa.es/es/alquiler/local-comercial/ortuella/ortuella/163880833/d?from=list>

Gaitan, A. (23 de Abril de 2023). CÓMO SE COMPRIME EL HIDRÓGENO PARA SU USO EN VEHÍCULOS | La ALTERNATIVA al ELÉCTRICO. Recuperado el Julio de 2023, de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=gf7wa1WuSsk>

Geoportal. (s.f.). Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Geoportal: <https://geoportalgasolineras.es/geoportal-instalaciones/Inicio>

González Calleja, D. (2022). Bancada. En D. González Calleja, Motores (pág. 89). San Fernando de Henares: Ediciones Paraninfo, SA. Recuperado el 24 de julio de 2023, de https://books.google.es/books?id=qPV2EAAAQBAJ&pg=PA89&lpg=PA89&dq=%22segmento+en+escal%C3%B3n%22&source=bl&ots=-LpeltmC_9&sig=ACfU3U0tGe0u8NqqNfh9QMWuL0PFjun-gQ&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi-p4Cmv5qBAxUtQaQEHRVIDCYQ6AF6BAgNEAM#v=onepage&q=%22segmento%20en%20esc

Green Power. (30 de mayo de 2020). ¿Cómo funciona la generación de hidrógeno por electrólisis de agua? Recuperado el 31 de julio de 2023, de Green Power: <http://www.gprectifier-es.com/news/how-does-hydrogen-generation-by-water-electrol-35028216.html>

- Grueso Garrido, I. (2020). El Hidrógeno y sus propiedades. En I. Grueso Garrido, Diseño y cálculo de un depósito de almacenamiento de hidrógeno para un vehículo industrial. (pág. 3). Alcoi, Valencia, España: Universitat Politècnica de València. Recuperado el 27 de julio de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/156053/Grueso%20-%20Dise%C3%B1o%20y%20c%C3%A1lculo%20de%20un%20dep%C3%B3sito%20de%20almacenamiento%20de%20hidr%C3%B3geno%20para%20un%20veh%C3%ADculo%20industri....pdf?sequence=2>
- Guasumba-Maila, J. E., Oramas-Proañó, D. D., Sáez-Erazo, E. J., & Grandafuel, C. A. (10 de agosto de 2021). Efecto de los Aditivos Lubricantes Cuando se Prueba en Régimen de Lubricación. Polo del Conocimiento, 1097-1117. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8094456.pdf>
- Halderman, J. D. (2021). Automotive Technology principles, diagnosis and service, 6th edition (6ª edición ed.). Pearson. Retrieved agosto 3, 2023
- Hand, E. (23 de febrero de 2023). HIDDEN HYDROGEN. Does Earth hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel? Recuperado el 30 de julio de 2023, de <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earth-may-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>
- Hiperbaric. (a). Hiperbaric 1KS 95. (Hiperbaric, Editor) Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Hiperbaric: <https://www.hiperbaric.com/es/compresion-h2/equipo-de-compresion/hiperbaric-1ks-95/>
- Hiperbaric. (b). Hiperbaric 1KS 50. (Hiperbaric, Editor) Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Hiperbaric: <https://www.hiperbaric.com/es/compresion-h2/equipo-de-compresion/hiperbaric-1ks-50/>
- Hirscher, M. (2010). Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage. (M. Hirscher, Ed.) WILEY-VCH.

- IEA. (2022, September). Global Hydrogen Review 2022. (IEA, Ed.) Retrieved from <https://www.iea.org:https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>
- International Energy Agency. (2022). Global Hydrogen Review 2022. En I. E. Agency, Global Hydrogen Review 2022 (pág. 71). International Energy Agency. Recuperado el 31 de julio de 2023, de <https://www.iea.org:https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>
- Investing. (7 de septiembre de 2023). Futuros gas natural - Oct 2023 (NGV3). Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Investing: <https://es.investing.com/commodities/natural-gas-historical-data>
- ISO/TC 197. (7 de noviembre de 2005). BUSINESS PLAN ISO/TC 197 Hydrogen technologies. Recuperado el 20 de agosto de 2023, de ISO - International Organization for Standardization: <https://www.bing.com/search?q=BUSINESS+PLAN+ISO%2FTC+197+Hydrogen+technologies&cvid=0e64485713444c76992ad5cf53ae7700&aqs=edge..69i57.2547295j0j4&FORM=ANAB01&PC=U531>
- Kong, H., Hart, H.-G., Yoon, E.-S., Kwon, O.-K., & Myshkin, N. (1998, marzo). Evaluation of the wear life of MoS₂-bonded-films in tribo-testers with different contact configuration. WEAR, 215(1-2), pp. 25-33. Retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/271461/1-s2.0-S0043164800X00415/1-s2.0-S0043164897002883/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEFAaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQCrK%2FI4LsMX2D5dqsx0vZvpaL1QEAluuE%2Fah3uIMrBowIlgROyHKhWjBQQPWsWJgfNXEM6XyfLnkBkCsL7pogwQ>
- Kunze, D. K. (2011, febrero 15). Cryo-compressed hydrogen-storage -recent advances and experimental results. (BMW Group) Retrieved agosto 4, 2023, from <https://www.yumpu.com:https://www.yumpu.com/en/document/read/27282439/bmw-cryo-compressed-hydrogen-storage-conclusion/22>

Lacasta, M. J. (17 de abril de 2023). La extracción de hidrógeno, a expensas de un cambio legislativo. Recuperado el 30 de Julio de 2023, de <https://www.diariodelaltoaragon.es/>: <https://www.diariodelaltoaragon.es/noticias/comarcas/2023/04/17/la-extraccion-de-hidrogeno-a-expensas-de-un-cambio-legislativo-1645339-daa.html>

Lidering. (s.f.). Sellos de anillos segmentados de grafito para trabajar a altas velocidades. Recuperado el 6 de agosto de 2023, de <https://www.lidering.com/>: <https://www.lidering.com/blog/sellos-de-anillos-segmentados-de-grafito-para-trabajar-a-altas-velocidades/>

López, R. O. (2017). Degradación ambiental y en condiciones adversas de adhesivos estructurales: Análisis y consideraciones técnicas para su aplicación industrial. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid. Obtenido de <https://scholar.archive.org/work/6t7eddxmu5hqhrjrfqfewwknj4>

Márquez Gil, A. M. (2001). Hidrogenas existentes. En A. M. Márquez Gil, ESTACIÓN DE PRODUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO PARA FLOTA DE VEHÍCULOS (HIDROGENERA) (pág. 24). Badajoz: Universidad de extremadura, Escuela de Ingenierías industriales. Obtenido de https://www.bing.com/ck/a?!&&p=710d147ab94556a6JmltdHM9MTY5ND A0NDgwMCZpZ3VpZD0zMGI0ZDVkZS01MWVilTZkMjUtMTM4OS1jNm UyNTBjMDZjNjQmaW5zaWQ9NTE3OQ&pfn=3&hsh=3&fclid=30b4d5de-51eb-6d25-1389-c6e250c06c64&psq=TFMUJEX_2022_Marquez_Gil.pdf&u=a1aHR0cHM6 Ly9kZWwhlc2EudW

Martín-Gil, J., & Martin-Gil, F. J. (enero de 2005). Sistemas de almacenamiento del hidrógeno en nanotubos de carbono: nuevos métodos de síntesis de nanotubos de carbono. (C. España, Editor) Recuperado el 8 de septiembre de 2023, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/256087413_Sistemas_de_almacenamiento_del_hidrogeno_en_nanotubos_de_carbono_nuevos_metodos_de_sintesis_de_nanotubos_de_carbono

- Matalucci, S. (19 de enero de 2023). Almacenamiento de hidrógeno en tanques criogénicos. (P. magazine, Editor) Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de PV magazine: <https://www.pv-magazine.es/2023/01/19/almacenamiento-de-hidrogeno-en-tanques-criogenicos/>
- Material Mundial. (s.f.). Acero Inoxidable 316 Ficha Técnica, Acero AISI 316 Propiedades, Inox 316 S. Recuperado el 26 de July de 2023, de Material Mundial Grados: <https://www.materialmundial.com/inox-ss316-aisi-astm-acero-inoxidable-316-ficha-tecnica-propiedades-ss/>
- Melis, T. (2008). Maximizing Light Utilization Efficiency and Hydrogen Production in . University of California, Berkeley, Plant & Microbial Biology. Berkeley, E.E.U.U.: Department of Energy. Retrieved from https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress08/ii_f_2_melis.pdf
- Merino, Á. (28 de octubre de 2022). Verde, azul o negro: los distintos tipos de hidrógeno. Recuperado el 3 de agosto de 2023, de <https://elordenmundial.com>: <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/tipos-hidrogeno/>
- MITECO. (21 de agosto de 2023). Información comparativa sobre el coste de los combustibles de automoción en €/100km. Obtenido de <https://eurospor100km.energia.gob.es/>: <https://eurospor100km.energia.gob.es/Paginas/Index.aspx>
- Molina, P. S. (13 de abril de 2022). La guerra dispara los precios: con 38 €/ MWh España ofrece el precio más bajo para la solar, pero seguirá subiendo. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de PV-Magazine: <https://www.pv-magazine.es/2022/04/13/la-guerra-dispara-los-precios-con-38-e-mwh-espana-ofrece-el-precio-mas-bajo-para-la-solar-pero-seguira-subiendo/#:~:text=Los%20precios%20de%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20en%20nuestro,ahora%20se%20sit%C3%BAan%20en%2038>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023, agosto 12). Interactive Best Research-Cell Efficiency Chart. Retrieved agosto 12, 2023, from

<https://www.nrel.gov/efficiency.html>

<https://www.nrel.gov/pv/interactive-cell-efficiency.html>

Noshiro, J., Watanabe, S., Sakurai, T., & Miyake, S. (2006, May 22). Friction properties of co-sputtered sulfide/DLC solid lubricating films. (P. Professor Allan Matthews, Ed.) *Surface and Coatings Technology*, 200(20-21), Pages 5849-5854. Retrieved from https://www.engineersedge.com/lubrication/molybdenum_disulfide_characteristics.htm

Pérez, L. (10 de febrero de 2022). Métodos de almacenamiento del hidrógeno. Recuperado el 3 de agosto de 2023, de <https://synerhy.com/https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>

Raulhola. (5 de mayo de 2022). Trámite Para Legalizar Una Instalación Fotovoltaica. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de AC Fotovoltaica: <https://acfotovoltaica.es/tramite-legalizar-instalacion-fotovoltaica/>

Richter Precision Inc. (7 de septiembre de 2023). DIAMOND-LIKE CARBON (DLC) PVD COATINGS. Obtenido de Richter Precision Inc.: <http://www.richterprecision.com/services/pvd-coatings/diamond-like-carbon-dlc/>

Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). Aceros Inoxidables: Clasificación y Propiedades. (H. Rodríguez Galbarro, Editor) Recuperado el 8 de septiembre de 2023, de Ingemecanica: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn102.html>

Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). Estudio y Tipología de las Uniones Atornilladas. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de [ingemecanica.com: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn31.html](https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn31.html)

Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). Resistencia Mecánica a. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de [ingemecanica.com: https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn217.html](https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn217.html)

- Rodríguez, H. (22 de septiembre de 2022). Propiedades del hidrógeno (H). Recuperado el 5 de agosto de 2023, de <https://www.nationalgeographic.com.es>: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hidrogeno-h_18653
- Sarkar, N. (s.f.). electrólisis del agua formando hidrógeno y oxígeno ilustración vectorial Vector Pro. Obtenido de <https://es.vecteezy.com/>: <https://es.vecteezy.com/arte-vectorial/18891985-electrolisis-del-agua-formando-hidrogeno-y-oxigeno-ilustracion-vectorial>
- Swagelok. (s.f.). Tipos de Corrosión. Recuperado el 8 de septiembre de 2023, de Swagelok: <https://www.swagelok.com/es/toolbox/material-selection-guide/corrosion-types#galvanic>
- SynerHy. (13 de mayo de 2022). Métodos de almacenamiento y transporte de hidrógeno. Recuperado el 15 de agosto de 2023, de <https://synerhy.com>: <https://synerhy.com/2022/05/metodos-de-almacenamiento-y-transporte-de-hidrogeno/>
- Tapia Martín, E. (2012). PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE CICLOS TERMOQUÍMICOS. En E. Tapia Martín, ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO CON CICLOS TERMOQUÍMICOS Y ENERGÍA SOLAR TÉRMICA DE ALTA TEMPERATURA. (pág. 41). Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70388/fichero/Cap3+Produccion+de+hidrogeno+mediante+ciclos+termoquimicos.pdf>
- Tatum, J. (2023). Heat and thermodynamics. En J. Tatum, Heat and thermodynamics (pág. capítulo 10). Victoria, Canadá: University of Victoria. Obtenido de [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Book%3A_Heat_and_Thermodynamics_\(Tatum\)](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Thermodynamics_and_Statistical_Mechanics/Book%3A_Heat_and_Thermodynamics_(Tatum))

Tecmikro. (2023). Recuperado el 10 de agosto de 2023, de Tecmikro: <https://tecmikro.com/sensores/442-sensor-de-efecto-hall-ugn3503-49e-a1302.html>

TresCantos. (23 de julio de 2023). ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO. (Ariema, Editor) Recuperado el 25 de agosto de 2023, de Ariema: <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>

UNE. (Versión corregida, Marzo 2023). UNE-EN 13445-3:2021 Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 3: Diseño (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en junio de 2021.). Madrid, España: UNE.

Wang, B. (2016, noviembre 4). Harvard researchers created solid metallic hydrogen in the lab and studied it – This is already huge but could be fantastic if properties are as predicted. Retrieved septiembre 8, 2023, from Nextbigfuture: <https://www.nextbigfuture.com/2016/11/harvard-researchers-created-solid.html>

Wikipedia. (28 de enero de 2021). Adsorción por oscilación al vacío. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Adsorci%C3%B3n_por_oscilaci%C3%B3n_a_l_vac%C3%ADo#:~:text=La%20adsorci%C3%B3n%20por%20oscilaci%C3%B3n%20al%20vac%C3%ADo%20%28VSA%29%20es,la%20especi e%20y%20la%20afinidad%20por%20los%20adsorbentes.

Wikipedia. (20 de noviembre de 2022). Politetrafluoroetileno. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Politetrafluoroetileno>

Wikipedia. (2023a, julio 30). Biohydrogen. Retrieved agosto 1, 2023, from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Biohydrogen#Production_by_algae

Wikipedia. (4 de septiembre de 2023b). Caucho. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Caucho>

Wikipedia. (24 de feb de 2023c). Conductividad eléctrica. Recuperado el 31 de julio de 2023, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_el%C3%A9ctrica

Wikipedia. (23 de mayo de 2023d). Dihidrógeno. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dihidr%C3%B3geno>

Wikipedia. (23 de mayo de 2023d). Dihidrógeno. Recuperado el 30 de julio de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Dihidr%C3%B3geno>

Wikipedia. (14 de junio de 2023e). Energía solar fotovoltaica. Recuperado el 31 de julio de 2023, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica

Wikipedia. (25 de junio de 2023f). Hidrógeno. Recuperado el 30 de julio de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>

Wikipedia. (13 de febrero de 2023g). Pacto Verde Europeo. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Pacto_Verde_Europeo

Wikipedia. (15 de agosto de 2023h). Sistema de Linde-Hampson. Recuperado el 20 de agosto de 2023, de Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Linde-Hampson

Wikipedia. (2023i, julio 25). Steam reforming. Retrieved julio 31, 2023, from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_reforming

Wikipedia. (27 de junio de 2023j). Viscosidad. Recuperado el 30 de julio de 2023, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Viscosidad>

6. Anexo I: Pliego de condiciones. Normativa aplicable.

Plan de pruebas.

6.1 Pliego de condiciones

PROYECTO DE DISEÑO DE BOMBA Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO DE ALTA PUREZA.

PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES

CAPITULO I.- DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PLIEGO.

Artículo 1.1. OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

Las partes, el promotor Juan Nadie, y el diseñador Aritz Lazcano conforman las partes contratante y contratado respectivamente para el desarrollo de una bomba de alta pureza de hidrógeno, cuyos requisitos serán detallados en este documento. En adición a lo anterior también se exigirá un almacenaje del hidrógeno.

El siguiente Pliego de Condiciones Técnicas Particulares abarca las propiedades con las que deberán contar los materiales de diseño que serán elegidos por sus cualidades y capacidades, debidamente justificadas. Pudiendo prevalecer un criterio concreto ante otro. Con el fin de lograr un buen diseño para el fin buscado en este proyecto de bomba de alta pureza y su almacenamiento con título "Proyecto de diseño de bomba y almacenamiento de hidrógeno de alta pureza". Deben de definirse los elementos principales del sistema. Título provisional que podrá ser modificado para definir mejor el proyecto.

Artículo 1.2. DOCUMENTOS DEL PROYECTO.

El proyecto debe estar formado por los documentos enumerados a continuación:

- Documento nº 1: Memoria y Anejos.
- Documento nº 2: Planos.
- Documento nº 3: Pliego de Condiciones.
- Documento nº 4: Presupuesto.

El contenido de los documentos será descrito en la Memoria.

Será entendido por documento contractual todos aquellos que estén incluidos en el contrato y sea de obligado cumplimiento, salvo modificaciones, replanteamientos pactados, autorizados y presupuestados. Estos documentos en caso de concesión de la licitación son:

- Pliego de Condiciones
- Presupuesto orientativo orientado a costes, y a beneficios industriales en caso de optar por la fabricación en serie.

Los demás documentos son informativos y están constituidos por la memoria y sus anejos, planos y cálculos.

Los precios quedan fijados en el presupuesto de investigación, solo por modificación contractual por ambas partes se podrá modificar alguna de las condiciones de este contrato. El presupuesto de investigación no debe superar los 20.000€. Este presupuesto no debe interferir con los costes de producción de la bomba u otros.

El Diseñador será responsable de llegar a un concepto funcional que cumpla los requerimientos técnicos exigidos al equipo de bombas y almacenamiento.

El Diseñador debe cumplir la legislación vigente en este tipo de diseños de bombas y hacer uso de las técnicas más adecuadas.

Artículo 1.3. DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.

El estudio de diseño queda descrito en la Memoria y Planos del Proyecto, en donde se detallan y especificaciones de diseño a aplicar.:

1. El equipo debe satisfacer un rendimiento aceptable, del orden del de otros sistemas similares.
2. Se da libertad al diseñador para ejecutar el diseño en base a lo que crea más conveniente, siempre que satisfaga las condiciones requeridas.
3. El diseño se ciñe únicamente a la bomba, pero deberán ser descritos mínimamente los equipos auxiliares.
4. El almacenamiento debe disponer de 50kg de hidrógeno.
5. Debe poder llenarse en un día de invierno siempre que disponga del hidrógeno necesario. No se tendrán en cuenta fenomenologías extrañas como nevadas para este cálculo, en el caso de uso de instalaciones solares para proporcionar energía.
6. El proyectista solo debe atender al diseño de la bomba y el almacenamiento sin importar el origen del hidrógeno, aunque este debe mantenerlo en las mismas condiciones que lo recibe. Significando esto que, si la fuente es un hidrolizador PEM, se debe mantener la pureza del 99,999%

Artículo 1.4. PROGRAMA DE ESTUDIO Y PLAZOS

El programa previsto se estima en 40 días naturales, en los cuales el proyectista debe llegar a unos resultados mínimos de funcionalidad.

CAPITULO II.- CONDICIONES QUE DEBEN REUNIR LOS MATERIALES.

Artículo 2.1. CONDICIONES GENERALES.

Los materiales usados en el diseño deberán cumplir ciertos parámetros de calidad y funcionalidad.

1. Los materiales deben de cumplir con unos parámetros mínimos de diseño que incluyen la vida a fatiga para más de $2 \cdot 10^6$ ciclos. Lo que viene a ser la llamada vida infinita del material para dicha aplicación.
2. Los materiales deben estar siempre dentro de unos márgenes de precios razonables, asegurarse que el presupuesto no se aquilate en exceso y que los distribuidores den precios razonables.
3. El proyectista deberá cumplir con la legislación pertinente en el diseño del proyecto.
4. Si se presentan diseños muy exóticos, tal prototipado deberá ser consultado con el promotor.
5. Se permitirá aumentar el presupuesto si la perdurabilidad de los materiales lo justifica.
6. El presupuesto debe mantenerse competitivo respecto a otras máquinas de similares características técnicas.

6.2 Normativa aplicable

6.2.1 Aplicables a envases

Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10. (MIE APQ-5). «BOE» núm. 176, de 25 de julio de 2017, páginas 65747 a 65956 (210 págs.)

Real Decreto 709/2015, de 24 de julio, por el que se establecen los requisitos esenciales de seguridad para la comercialización de los equipos a presión. «BOE» núm. 210, de 2 de septiembre de 2015, páginas 77695 a 77769 (75 págs.)

Real Decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias. «BOE» núm. 243, de 11/10/2021.

UNE 192011-0:2018/1M:2023 Procedimiento para la inspección reglamentaria. Equipos a presión. Parte 0: Requisitos generales. Fecha de edición: 2023-03-22.

UNE-EN 1089-3:2011 Botellas para el transporte de gas. Identificación de las botellas de gas (excepto de GLP). Parte 3: Código de colores. Fecha Edición: 2011-11-29.

UNE-EN 13445-3:2021 Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 3: Diseño. Fecha ratificación: 2021-06-01.

UNE-EN 13445-5:2021 Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 5: Inspección y control (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en junio de 2021.). Fecha ratificación: 2021-06-01.

6.2.2 Aplicables a la bomba

Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009, por la que se instaure un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. «DOUE» núm. 285, de 31 de octubre de 2009, páginas 10 a 35 (26 págs.)

6.2.3 Aplicables a tornillos

ISO 261:1998 ISO general purpose metric screw threads — General plan. Publication date: 1998-12.

ISO 262:2023 ISO general purpose metric screw threads — Selected sizes for bolts, screws, studs and nuts. Publication date: 2023-04.

ISO 68-1:1998 ISO general purpose screw threads — Basic profile — Metric screw threads. Publication date: 1998-12.

ISO 68-1:1998/Amd 1:2020 ISO general purpose screw threads — Basic profile — Part 1: Metric screw threads — Amendment 1. Publication date: 2020-01.

ISO 965-1:2013 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 1: Principles and basic data. Publication date: 2021-09.

ISO 965-1:2013/Amd 1:2021 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 1: Principles and basic data — Amendment 1. Publication date: 2021-09.

ISO 965-2:1998 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 2: Limits of sizes for general purpose external and internal screw threads — Medium quality. Publication date: 1998-12.

ISO 965-2:1998/Amd 1:2021 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 2: Limits of sizes for general purpose external and internal screw threads — Medium quality — Amendment 1. Publication date: 2021-07.

ISO 965-3:2021 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 3: Limit deviations for screw threads. Publication date: 2021-07.

ISO 965-4:2021 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 4: Limits of sizes for hot-dip galvanized external screw threads to mate with internal screw threads tapped with tolerance position H or G after galvanizing. Publication date: 2021-07.

ISO 965-5:1998 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 5: Limits of sizes for internal screw threads to mate with hot-dip galvanized external screw threads with maximum size of tolerance position h before galvanizing. Publication date: 1998-12.

ISO 965-5:1998/Amd 1:2021 ISO general purpose metric screw threads — Tolerances — Part 5: Limits of sizes for internal screw threads to mate with hot-dip galvanized external screw threads with maximum size of tolerance position h before galvanizing — Amendment 1. Publication date: 2021-07.

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. «BOE» núm. 74, de 28/03/2006.

Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. «BOE» núm. 190, de 10 de agosto de 2021, páginas 97664 a 99452 (1789 págs.)

UNE-EN 1993-1-1:2013 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios. Fecha de edición: 2013-04-10.

UNE-EN 1993-1-8:2013 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-8: Uniones. Fecha de edición: 2013-04-10.

UNE-EN 1993-1-9:2013 Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. Fecha de edición: 2013-04-10.

UNE-EN ISO 3506-1:2021 Elementos de fijación. Características mecánicas de los elementos de fijación de acero inoxidable resistente a la corrosión. Parte 1: Pernos, tornillos y bulones con grados y clases de propiedades específicas. (ISO 3506-1:2020). Fecha de edición: 2021-03-24.

6.2.4 Aplicable a arandelas de gas para racores

DIN 3852-1:2014-05 Stud ends and ports of fittings, valves and plug screws - Part 1: Dimensions for metric fine pitch thread. Fecha: 2014-05.

DIN EN ISO 1179-1:2014-03 Connections for general use and fluid power - Ports and stud ends with ISO 228-1 threads with elastomeric or metal-to-metal sealing - Part 1: Threaded ports. Fecha: 2014-03.

DIN EN ISO 1179-2:2023-05 Connections for general use and fluid power - Ports and stud ends with ISO 228-1 threads with elastomeric or metal-to-metal sealing - Part 2: Heavy-duty (S series) and light-duty (L series) stud ends with elastomeric sealing (type E). Fecha: 2023-05.

DIN EN ISO 1179-3:2008-08 Connections for general use and fluid power - Ports and stud ends with ISO 228-1 threads with elastomeric or metal-to-metal sealing - Part 3: Light-duty (L series) stud ends with sealing by O-ring with retaining ring (types G and H). Fecha: 2008-08.

DIN EN ISO 1179-4:2008-08 Connections for general use and fluid power - Ports and stud ends with ISO 228-1 threads with elastomeric or metal-to-metal sealing - Part 4: Stud ends for general use only with metal-to-metal sealing (type B). Fecha: 2008-08.

6.2.5 Aplicables a la instalación

Directiva 1999/92/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 1999, relativa a las disposiciones mínimas para la mejora de la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas. «DOCE» núm. 23, de 28 de enero de 2000, páginas 57 a 64 (8 págs.)

Directiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014, sobre la armonización de las legislaciones de los Estados miembros en materia de aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas (refundición). «DOUE» núm. 96, de 29 de marzo de 2014, páginas 309 a 356 (48 págs.)

Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales. «BOE» núm. 303, de 17 de diciembre de 2004, páginas 41194 a 41255 (62 págs.)

Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia. «BOE» núm. 72, de 24 de marzo de 2007, páginas 12841 a 12850 (10 págs.)

Real Decreto 513/2017, de 22 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones de protección contra incendios. «BOE» núm. 139, de 12 de junio de 2017, páginas 48349 a 48386 (38 págs.)

Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que

intervengan sustancias peligrosas. «BOE» núm. 251, de 20 de octubre de 2015, páginas 97531 a 97567 (37 págs.)

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. «BOE» núm. 224, de 18 de septiembre de 2002, páginas 33084 a 33086 (3 págs.)

6.2.6 Normas de aplicación para trabajadores expuestos en el lugar de la instalación y los montadores que realicen los ensayos de presión y fugas.

Directiva 89/391/CEE, Directiva del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo. «DOCE» núm. 183, de 29 de junio de 1989, páginas 1 a 8 (8 págs.)

Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales. «BOE» núm. 269, de 10/11/1995.

Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. «BOE» núm. 145, de 18 de junio de 2003, páginas 23341 a 23345 (5 págs.)

6.3 Plan de pruebas

En planta deberán comprobarse las piezas mediante pruebas de ultrasonido o radiografía en búsqueda de grietas o daños en el material, poniendo especial atención en el área de las soldaduras, buscando cambios de densidad debidos a carburos de cromo. Aunque debido al material de aporte como al base, no se debería dar dicha formación de carburos por la baja aleación de carbono. Pero pueden seguir existiendo otros daños típicos en la soldadura, como agrietamiento por tensiones o coqueas, por un deficiente caudal de gas protector u otros fallos de soldadura. Tras esta certificación de calidad se procederá al envío al almacén mediante una empresa de logística.

Una vez construida la bomba y su almacenaje, adquiridos el resto de accesorios y realizadas las pruebas de calidad, se deberá proceder a su montaje y realizar varias pruebas en el lugar de su instalación.

La primera y muy relevante para la seguridad es la prueba de estanqueidad con nitrógeno en primera instancia y si todo es correcto y no hay fugas se procederá al ensayo con helio, e igualmente que en el caso anterior, si no hay rastro de fugas, se procederá a la siguiente fase.

Antes de proceder al ensayo con hidrógeno, debe asegurarse que el sistema antiincendios está presente, en orden de funcionamiento, correctamente configurado y conectado. También debe certificarse el resto de elementos de seguridad, como la ventilación, muros de fuego, pasacables ignífugos, correcto funcionamiento de los sistemas habituales como válvulas pilotadas y manuales, filtros, bombas y demás accesorios como válvulas antirretorno. Estos elementos del circuito han debido ser probados previamente con los demás gases.

También deberá probarse el sistema de almacenamiento de gas, es decir, los botellones, mediante a llamada prueba hidrostática, llamada así por realizarse con agua y se realiza a presión de ensayo, es decir, al 50% extra de la presión nominal. En nuestro caso será 300bar. Y no debe haber fugas, por lo que no debe descender la presión en un periodo de 24 horas. Debe hacerse tal

comprobación con el objetivo de superar la prueba una vez llegue en ente certificador y evitar retrasos en la apertura de la instalación.

Una vez realizadas las comprobaciones pertinentes anteriores, podrá procederse a la prueba de estanqueidad con hidrógeno y será importante que los operarios porten detectores portátiles de hidrógeno para evitar accidentes, ya que el gas es inodoro, por tanto, sería difícil detectar una fuga y peligroso si es de alta presión.

Si todas las pruebas de presión y puesta en marcha se llevan a cabo de manera satisfactoria, debería realizarse antes de la puesta en servicio y con la presencia de las autoridades certificadoras, el ensayo de presión, que consistirá en someter a los envases, en este caso en particular a 300 bares de presión, un 50% más que la presión nominal, como se ha descrito anteriormente. Si todo es correcto los depósitos serán marcados en sus placas identificativas con la fecha del ensayo a presión, para conocer la fecha de la próxima revisión y ensayo. Y la instalación de almacenamiento será autorizada tras realizarse los trámites pertinentes.

Otra prueba muy importante a realizar sería la prueba de durabilidad de los segmentos, ya que hay un gran vacío de información sobre segmentos en general y muy en particular de segmentos trabajando en seco, por tal causa, se debería hacer la prueba tribológica en régimen de funcionamiento normal para probar si el desgaste de los segmentos es correcto o no. La mayoría de segmentos para cilindros secos son de grafito o teflón, el grafito presenta interacciones químicas con el hidrogeno, el teflón no soporta temperaturas superiores a 270°C, por lo que su uso no aparenta ser adecuado para un gas que se calentara dentro del cilindro por encima de 245°C. La totalidad de trabajos que he podido consultar relacionados con segmentos acababan indefectiblemente haciendo una prueba tribológica para comprobar las características de los mismos. Sin poder predecir de antemano su comportamiento. A pesar de que varios mostraban las mismas bibliografías de los mismos autores sobre los trabajos teóricos, las fuentes consultadas no parecían muy útiles, practicas o sencillas de implementar. Uno de los más útiles fue un estudio de los anillos de compuestos de sulfuro de molibdeno (Kong, Hart, Yoon, Kwon, & Myshkin, 1998), pero estaba basado en compuestos con base

polimérica de tipo epoxica y otros. Según las pruebas esto parecía haberlos fallar antes de tiempo, aunque presentaban coeficientes de fricción excepcionalmente bajos, llegando a 0,06 en varios compuestos. A pesar de ello, las pruebas realizadas eran con la aguja de un rodamiento y con un anillo de pequeña dimensión, con formas de trabajo que poco tienen que ver. Por dicho motivo es crucial hacer un buen estudio tribológico de los segmentos, para conocer sus tiempos de recambio y si es viable. A consecuencia de esto las velocidades escogidas para la compresión con extremadamente conservadoras, de 4cm/s frente a los 9m/s que pueden hacer muchos segmentos lubricados, o tal vez incluso haya que ralentizar la velocidad para aumentar la vida útil. De cualquier modo, los segmentos escogidos de sulfuro de molibdeno y DLC, no llevan partículas poliméricas y son fabricados por deposición de plasma, y soportan temperaturas del rango de los 1100°C en ausencia de oxígeno. Por tanto, se estima que su degradación sea menor para las mismas condiciones. (Noshiro, Watanabe, Sakurai, & Miyake, 2006)

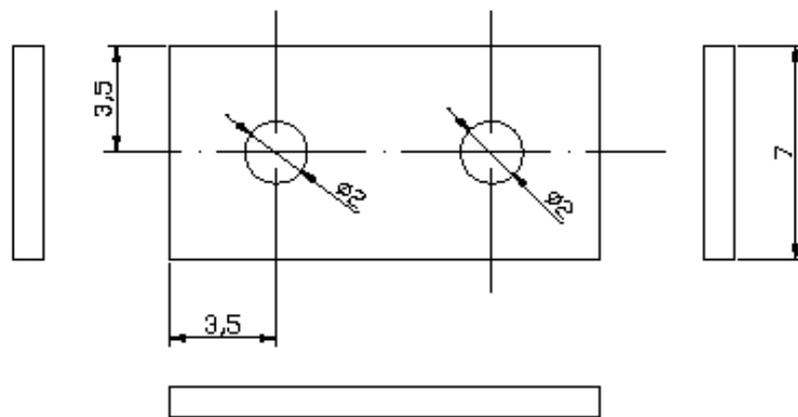
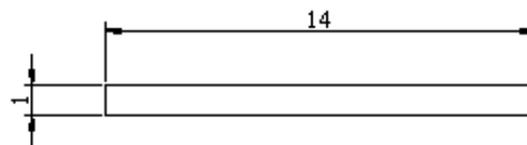
También se ha sido conservador en el cálculo del rozamiento, calculándose este en 0,16 en lugar de los prometidos 0,6, pero según otros trabajos es lo esperable en este tipo de compuestos. Aunque solo he tenido acceso al abstract y usaban los mismos métodos de medida. (engineers edge) los métodos son ASTM 2625 B, ASTM 2625 A y mil STD 141A y ASTM D1894.

Otro punto de interés es comprobar las velocidades de apertura y más importante aún, de cierre de las válvulas pilotadas. Ya que de ello y su precisión depende enormemente que los pistones no golpeen la culata del cilindro y puedan provocar daños a largo plazo o no tan largo. Aunque la fuerza sería similar a la presión, se suma la inercia, pero lo preocupante es el picado por contacto. Es algo a evitar. Para ello deben usarse mediciones de tiempo de respuesta, para lograrlo se dispone del tubo o anillo contador, que marcará la velocidad y posición del eje, en función de la respuesta del sistema, deberá programarse un adelanto de cierre u otro sistema de respuesta como ralentización previa a la llegada del émbolo al final de carrera. También deberá calibrarse el sensor de efecto hall analógico alojado en el cajetín de la rosca interna del cilindro maestro. Esto deberá llevarse a cabo por un programador experto en el uso del sistema de control elegido por el cliente, la sencillez de un

PLC y sus precios más altos o la economía de un microcontrolador con IDE (entorno de desarrollo integrado) de Arduino u otros, muchos de ellos se pueden usar en varios IDE como los ESP32. Estos últimos pueden ser baratos pero el desarrollo del software puede llevar bastantes más horas. Para lotes largos de 100 o 1.000 unidades compensa los costes de programación y tiene un menor consumo energético, aunque eso no marcará la diferencia.

7. Anexo II: Planos y esquemas.

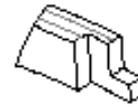
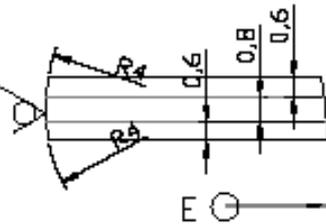
Debido a las limitaciones de Word con el tamaño de los planos y que realiza una captura de bitmap, los planos no se visualizan con una calidad adecuada a pesar de usar los pdf originales y estarán limitados a un tamaño de hoja A3, puede que al pasarse a la hoja de Word el tamaño de plano no se corresponda correctamente con el de la hoja donde esta dibujado.



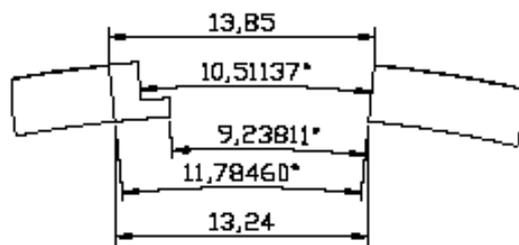
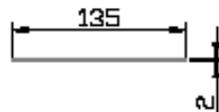
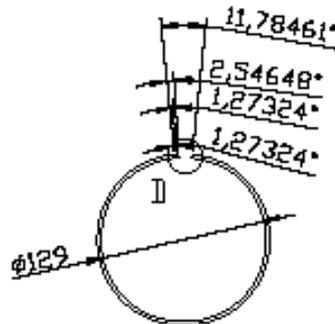
Material EN 10027-1 S420N	Acabado: N5 Tornado acabado común	Dibujado	Aritz	Lazcano Berueta	 ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS S.L.	SERVICIO TÉCNICO DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
		Comprobado				
Escala 5:1	Chapa de unión del tubo de conteo				Nº de plano: 1 de 12	

Deposición por plasma

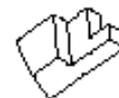
DETALLE E
ESCALA 5 : 1



DETALLE A
ESCALA 3 : 1

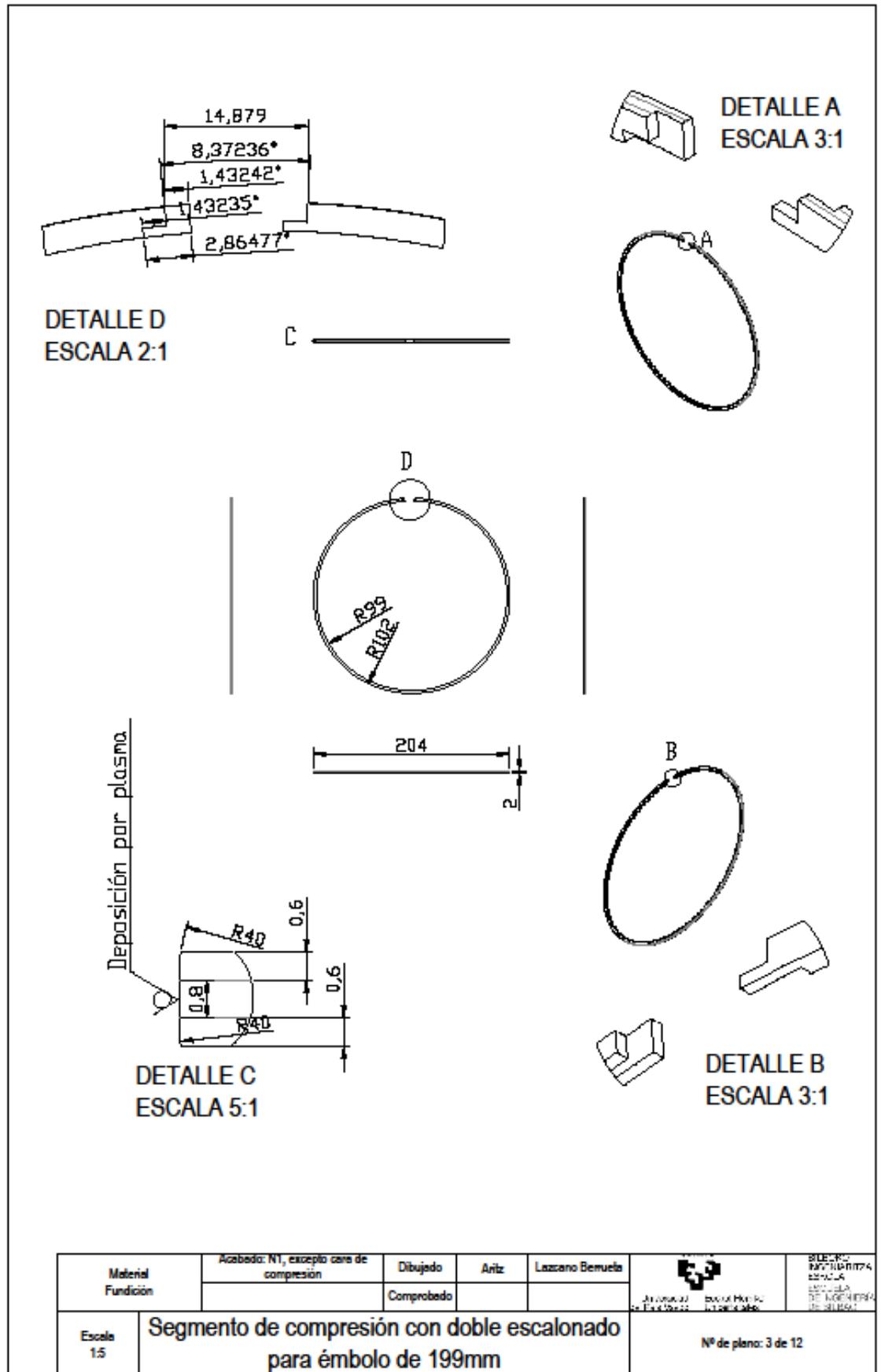


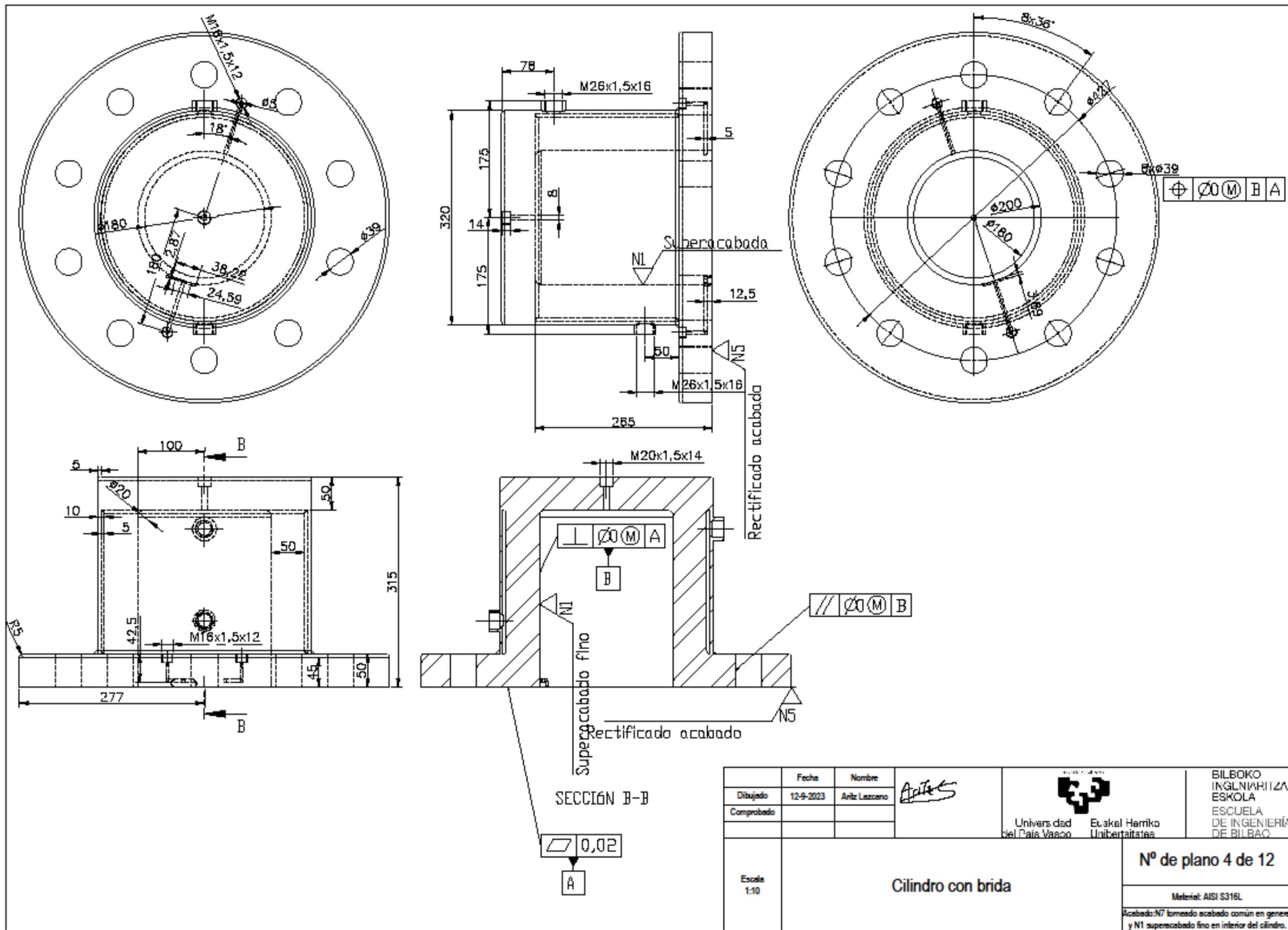
DETALLE II
ESCALA 3 : 1



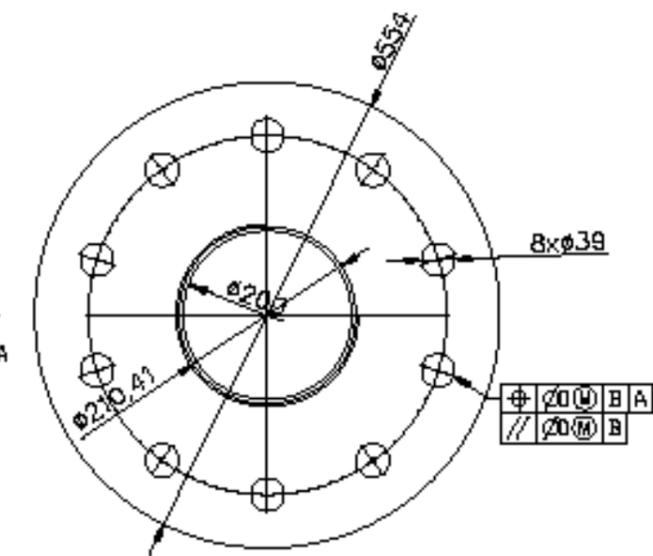
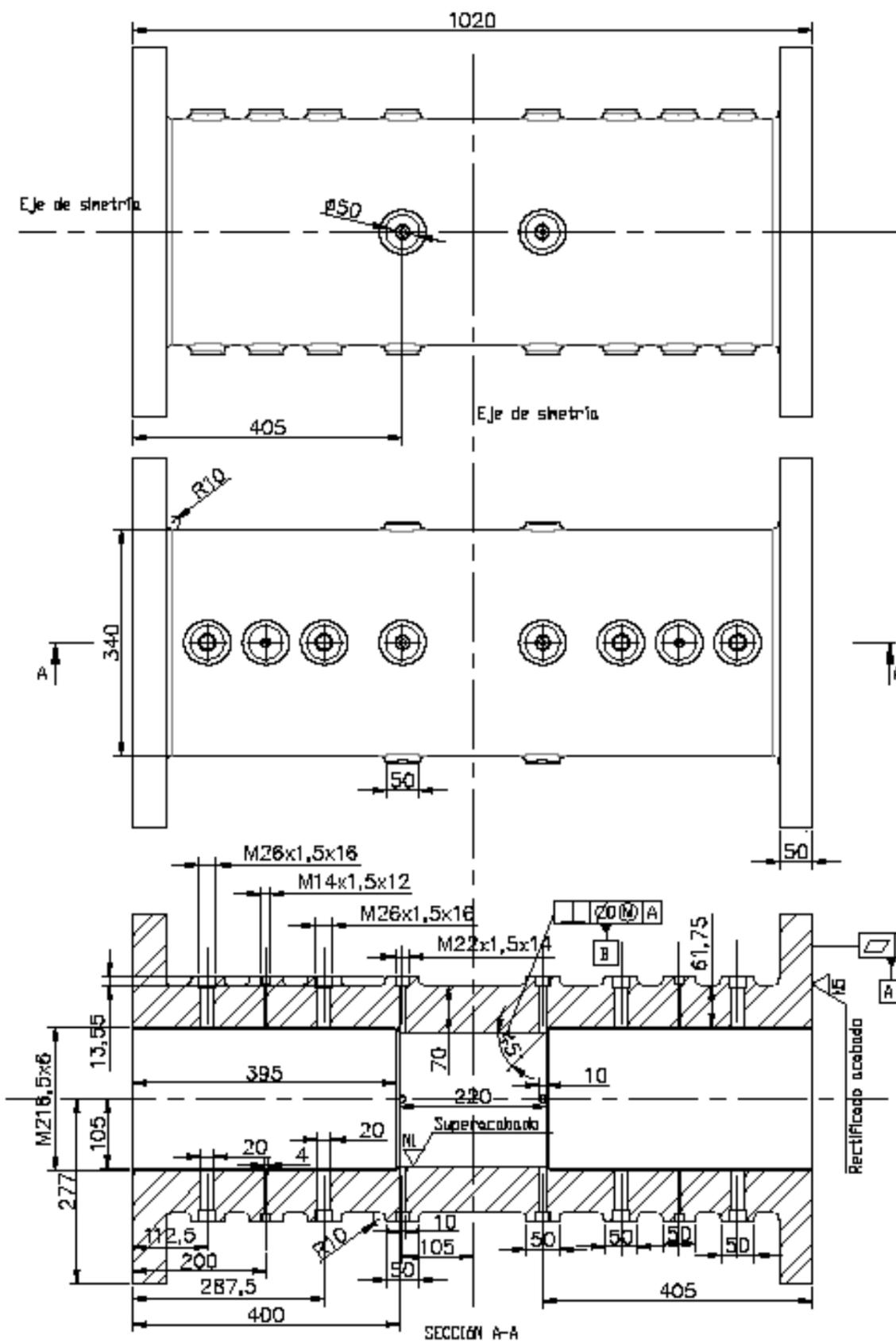
DETALLE C
ESCALA 3 : 1

Material Fundición	Acabado: N1, excepto cara de compresión	Dibujado	Artz	Lazzano Berrueta	 SILECPO PARTES ESCALA 1:1 DE 1000000 DE 1000000
		Comprobado			
Escala 1:5	Segmento de compresión con doble escalonado para eje de 130mm				Nº de plano: 2 de 12

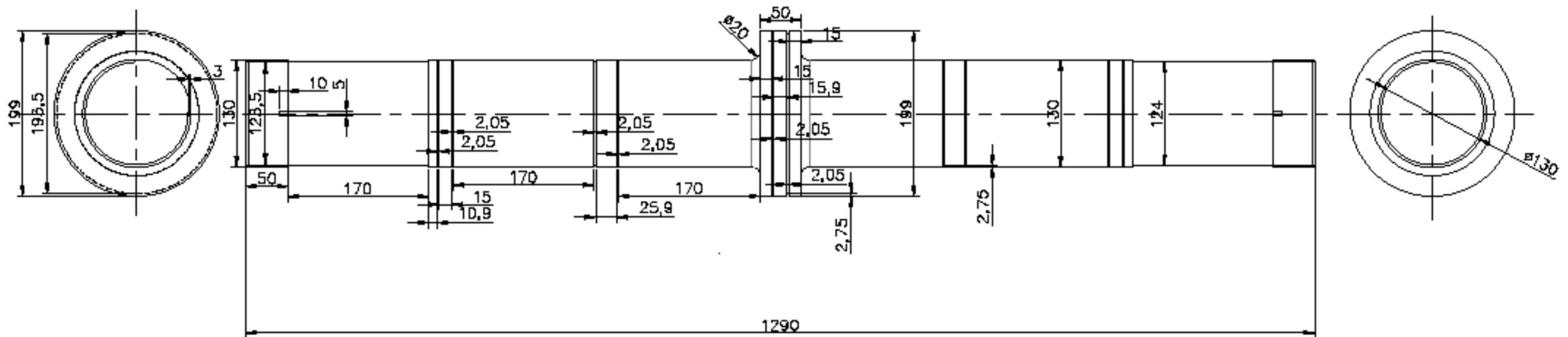




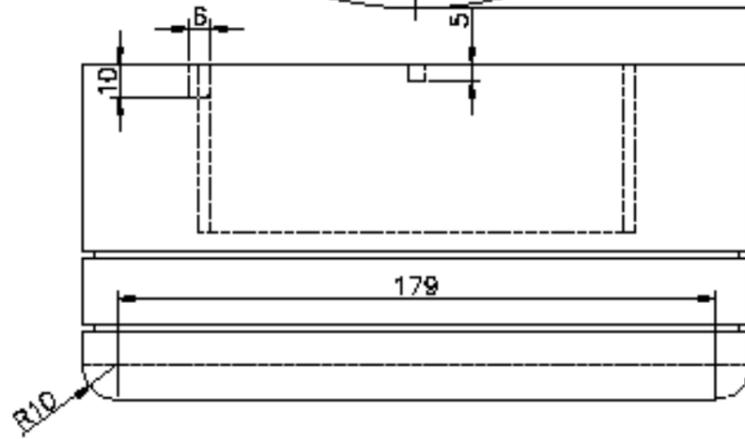
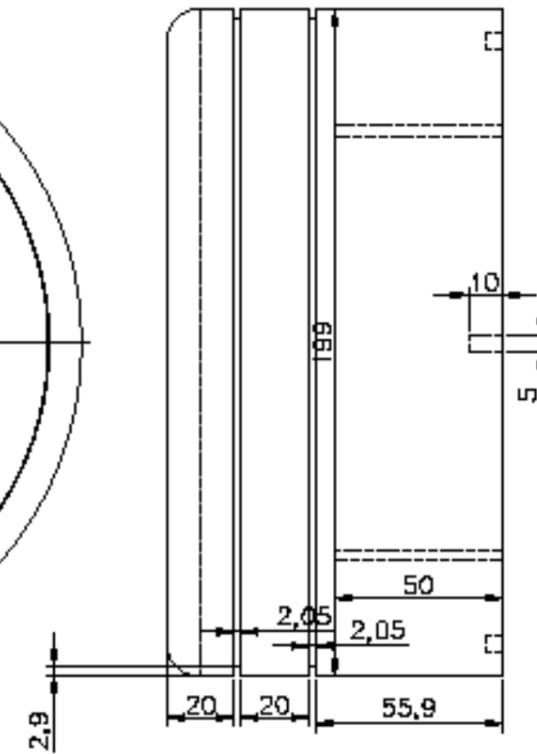
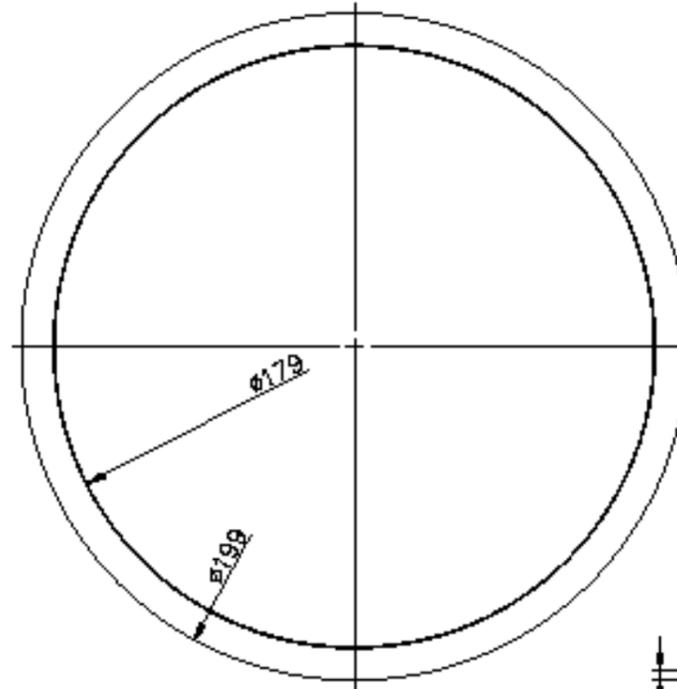
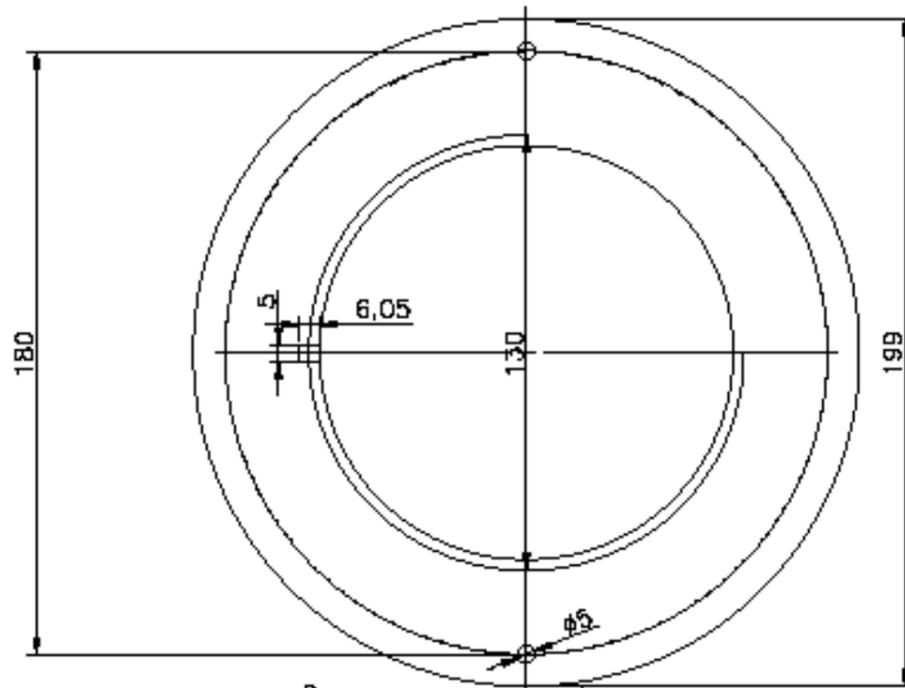
Fecha	Nombre			
Dibujado: 12-9-2023	Nombre: Ariz Lazzano	<i>Ariz</i>	 Universidad del País Vasco Euzkadi Herriko Unibertsitatea	BILBOKO INGENIARIZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Comprobado:				
Escala: 1:10	Cilindro con brida			Nº de plano 4 de 12 Material: AISI 316L Acabado: N7 torneado acabado común en general y N1 superacabado fino en interior del cilindro.

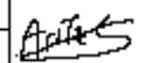


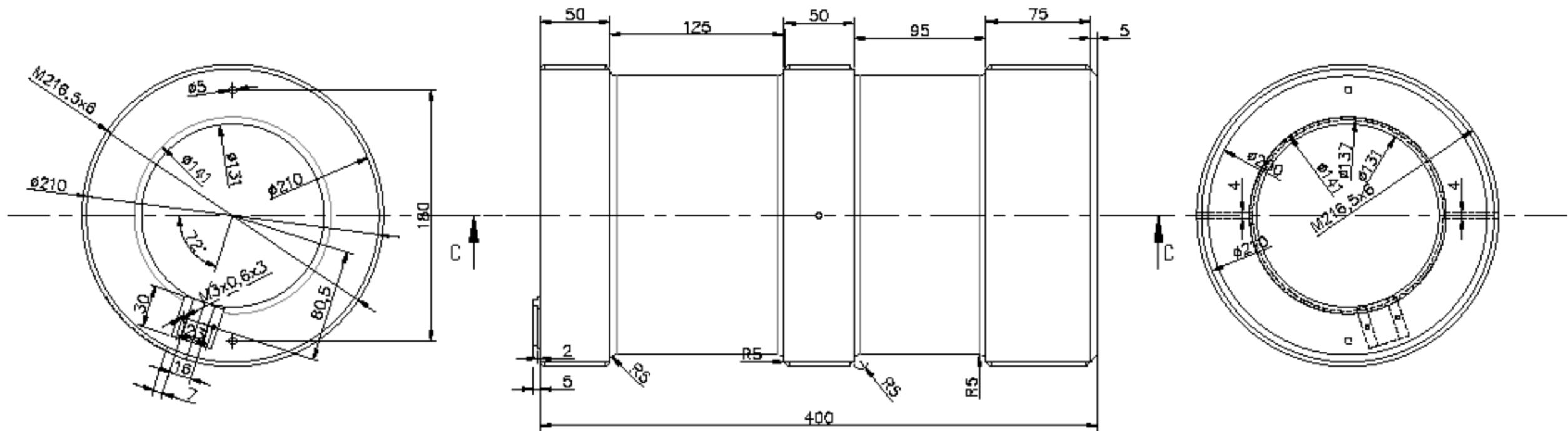
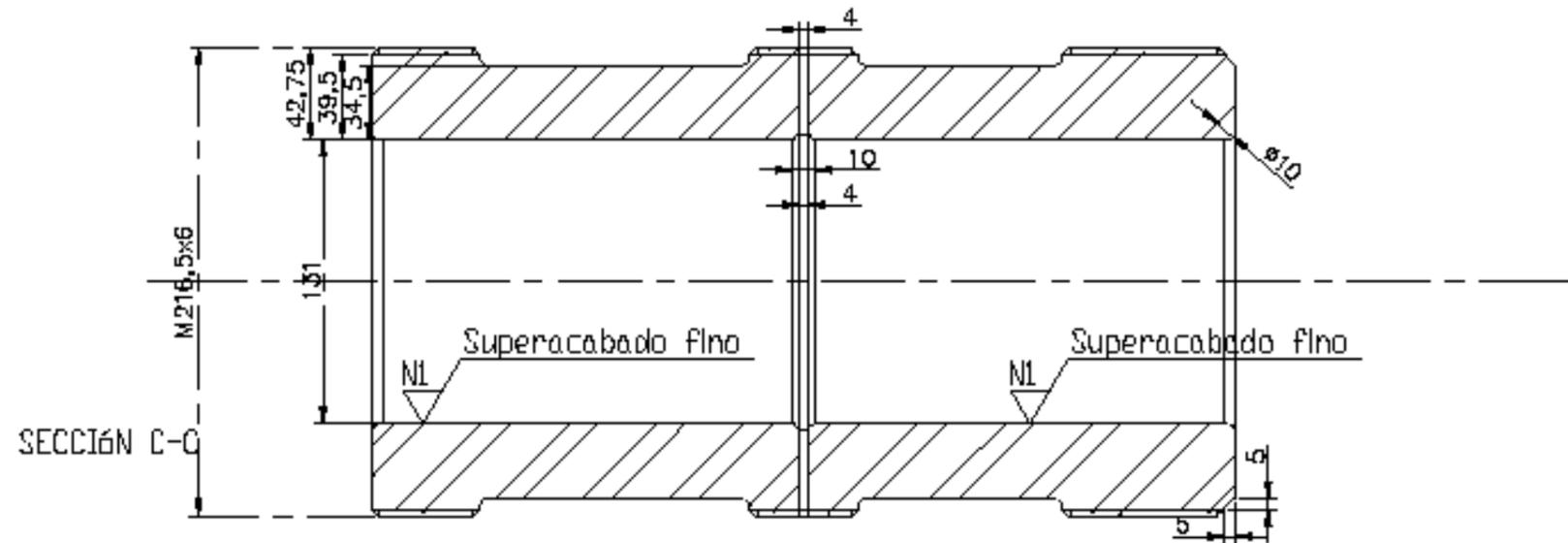
	Fecha	Nombre		
Dibujado	12-9-2023	Antz Lazcano	<i>Antz</i>	 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea
Comprobado				
Escala	1:8			N° de plano 5 de 12 Material: AISI S316L Acabado: N7 torneado acabado común en general y N1 superacabado fino en interior del cilindro.
Cilindro maestro de alta presión				



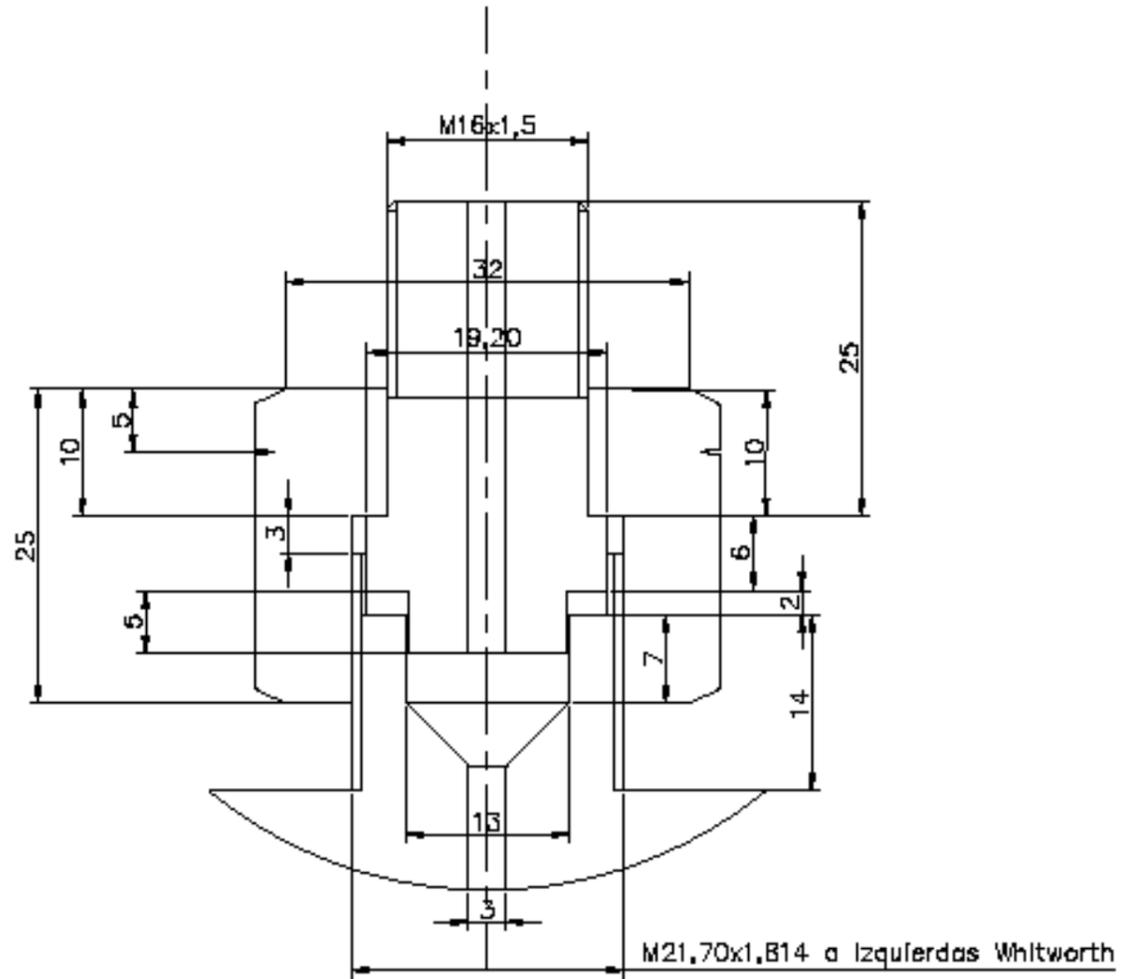
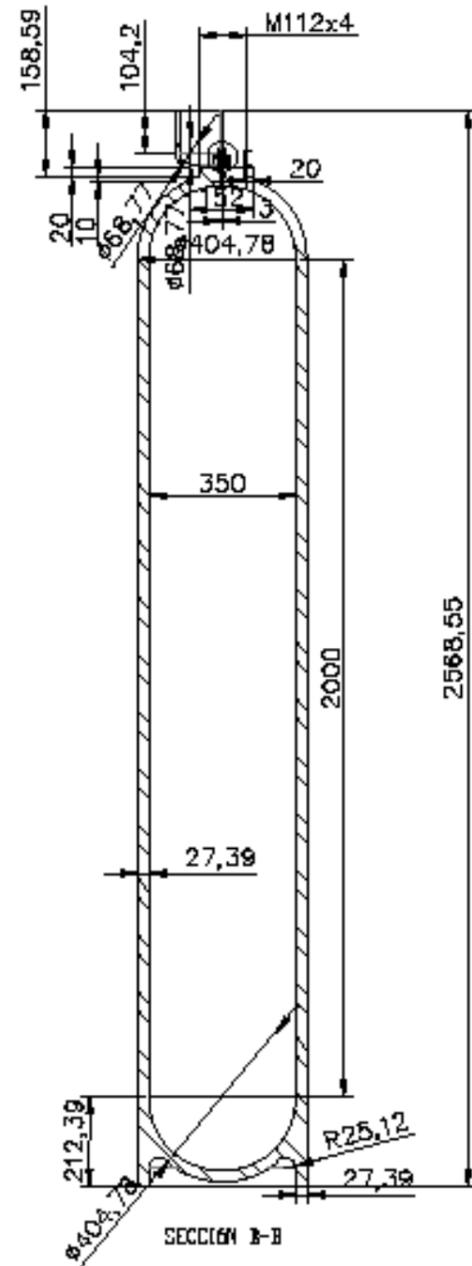
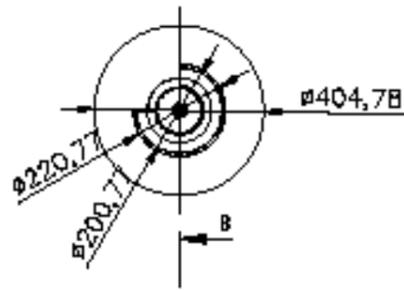
	Fecha	Nombre			BILBOKO INGENIARI ZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Dibujado	12-9-2023	Ariz Lazzano			
Comprobado					
Escala 1:5	Eje de émbolos				Nº de plano 6 de 12
					Material: AISI 316L
					Acabado: N5 Rectificado acabado.



	Fecha	Nombre			BILBOKO INGENIARITZA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Dibujado	12-9-2023	Ariz Lazcano			
Comprobado					
Escala	Émbolo roscado			Nº de plano 7 de 12	
				Material: AISI 316L	
				Acabado: N7 torneado acabado común.	

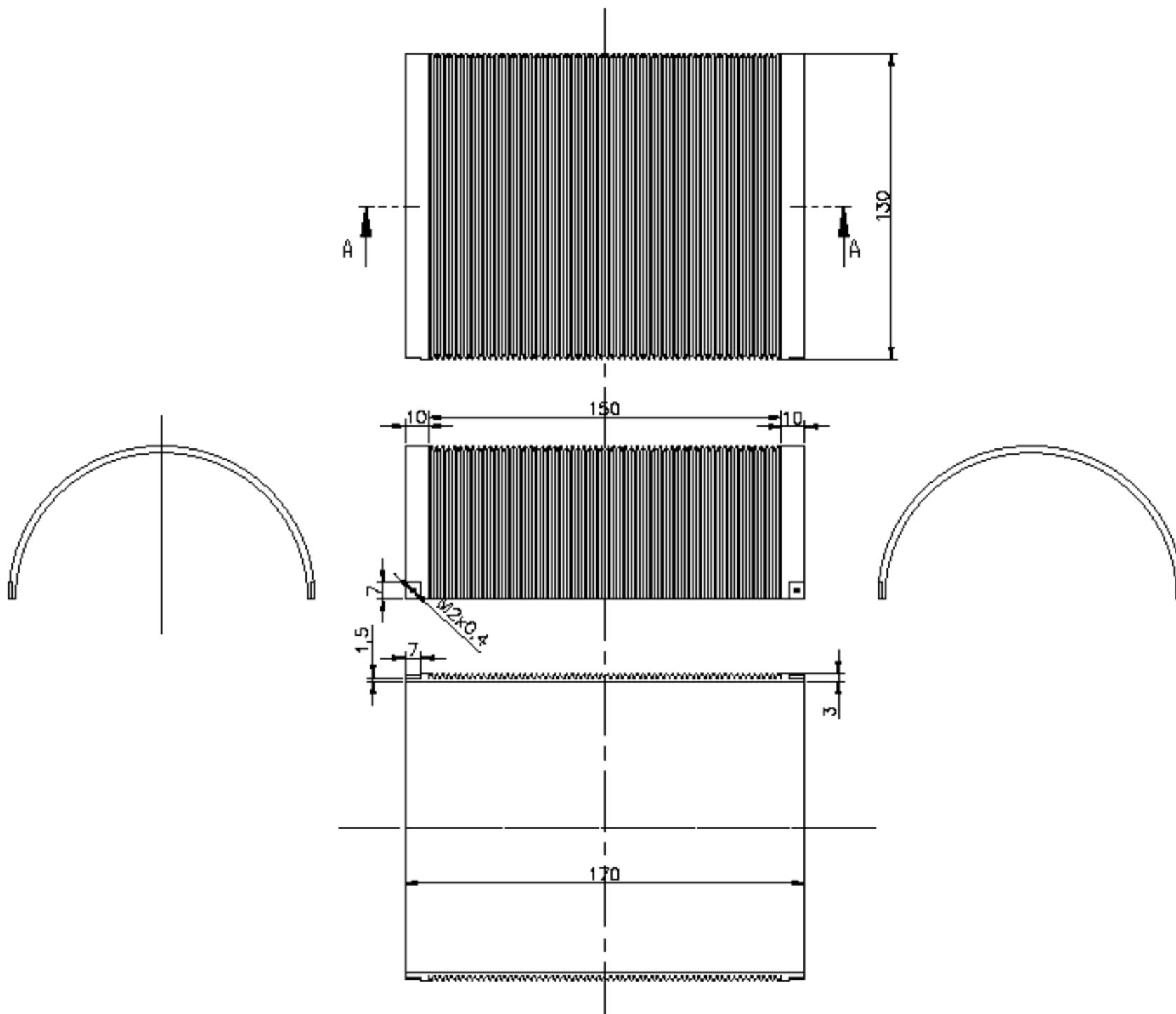


Dibujado	Fecha	Nombre	 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea	BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Comprobado	12-9-2023	Ariz Lazcano		
Escala 1:3	Rosca interna refrigerada del cilindro maestro			Nº de plano 8 de 12
				Material: AISI 316L
				Acabado: N5 torneado acabado finísimo. N1 superacabado fino en el portaje.



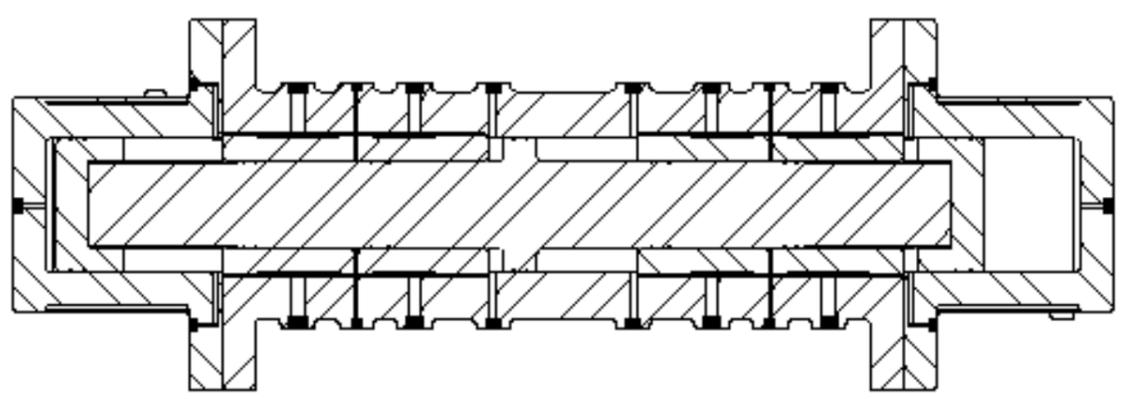
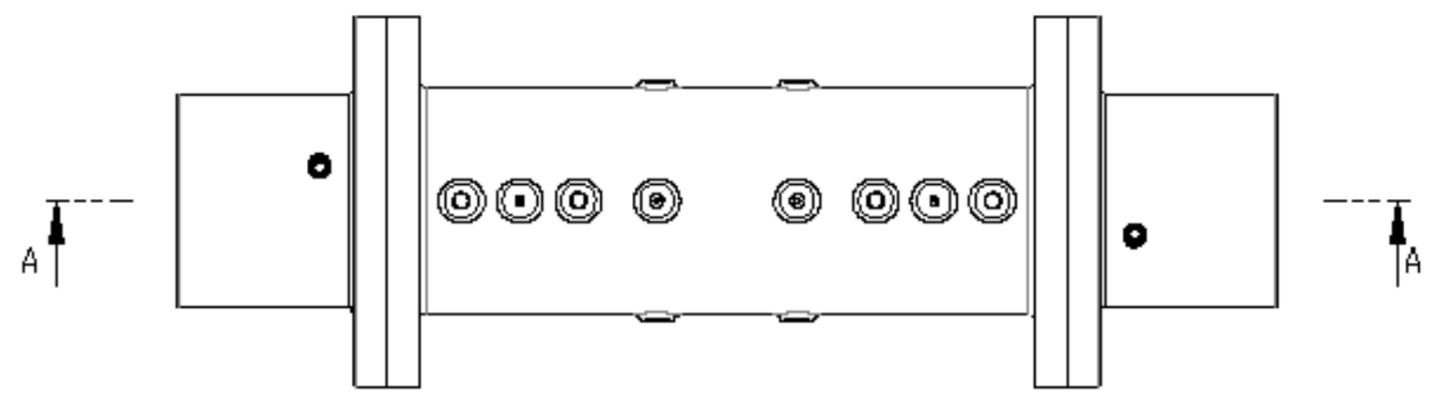
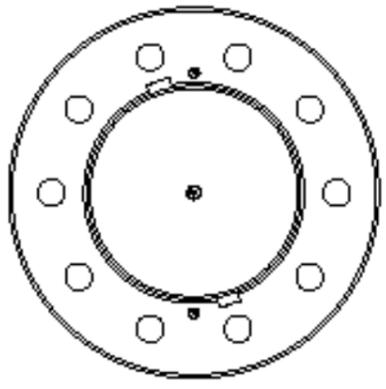
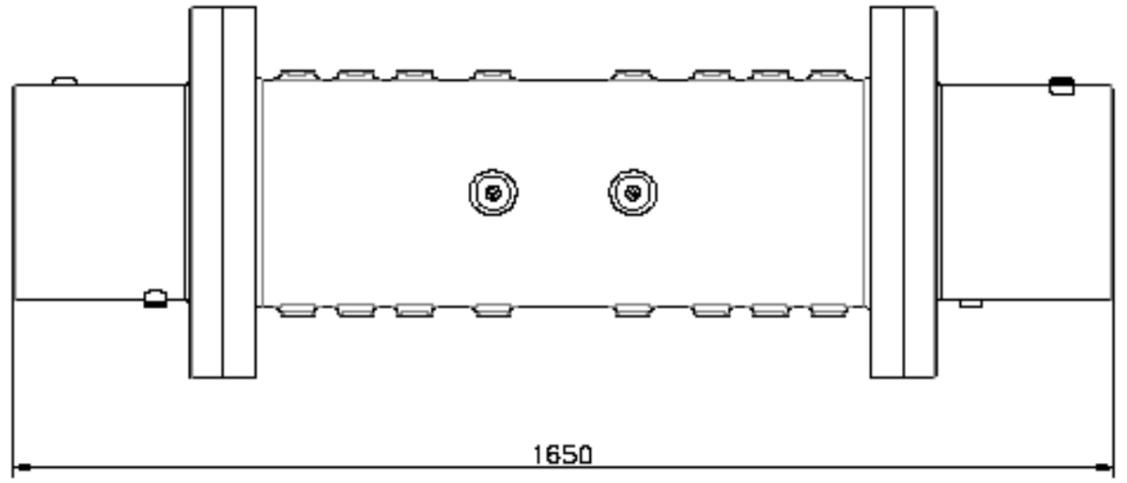
DETALLE ESCALA 2:1
Acoplamiento tipo E para productos inflamables

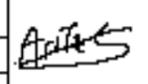
Dibujado	Fecha	Nombre	 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea	BILBOKO INGENIARIZA ESCOLA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Comprobado	12-9-2023	Ariz Lazcano		
Escala	Ensamblaje de botellón			Nº de plano 9 de 12
1:16				Material: AISI 316L
				Acabado: N7 torneado acabado común.

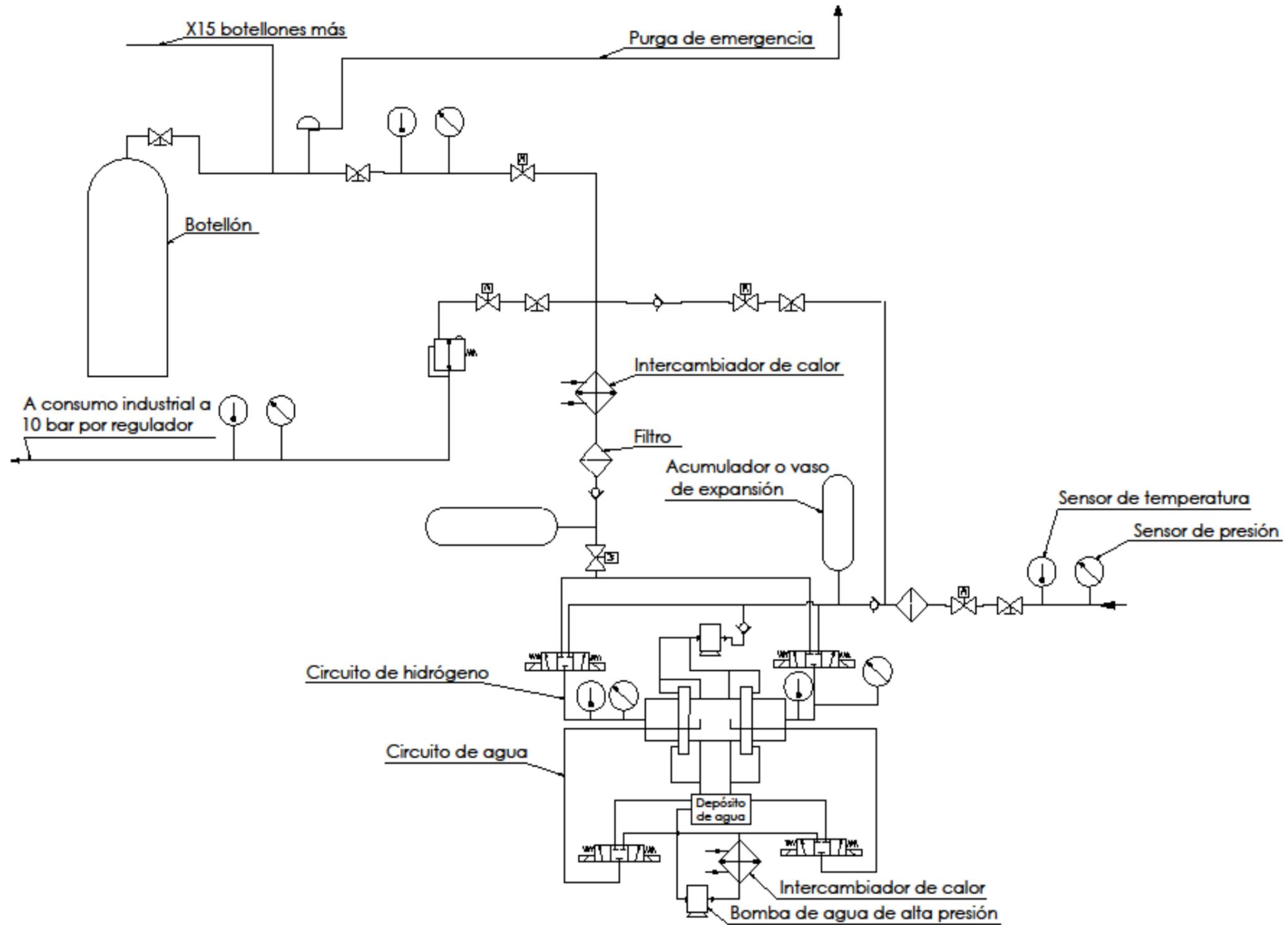


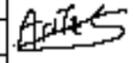
SECCIÓN A-A

	Fecha	Nombre	 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea	BILBOKO INGENIARITZA ESCOLA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Dibujado	12-9-2023	Anitz Lazcano		
Comprobado				
Escala	1:2			Nº de plano 10 de 12
Tubo de conteo y posicionamiento				Material: EN 10027-1 S420N
				Acabado: N7 tornedo acabado común.



	Fecha	Nombre		 Universidad del País Vasco	Euskal Herriko Unibertsitatea ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Dibujado	12-9-2023	Ariz Lazcano			
Comprobado					
Escala	1:10			Nº de plano 11 de 12 Material: varios Acabado: multiples	
Ensamblaje completo					



	Fecha	Nombre		 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea	BILBOKO INGENIARIZA ESCOLA DE INGENIERÍA DE BILBAO
Dibujado	12-9-2023	Aritz Lazcano			
Comprobado					
Escala sin escala	Sistema neumático e hidráulico				Nº de plano 12 de 12
					Material:
					Acabado:

