

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



“COMPOSICIÓN, INSTALACIÓN Y ESTUDIO DE  
UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDRÓGENO  
EN UN GENERADOR DIESEL”

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre – 2022

Autor: Antonio Manuel García Pérez

Director/es: Fernando Verdú Bernabéu





## **DEDICATORIA**

*A mis padres, hermana, amigos y familiares más cercanos, los cuales han sido partícipes en mi desarrollo personal y académico. Haciendo mención especial a mi abuela, la cual no ha podido vivir el cierre de esta etapa.*

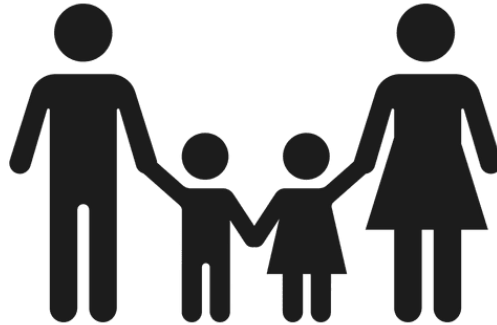






# **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis familiares todo el esfuerzo que han hecho por educarme en busca de un futuro, siempre apoyándome y aconsejándome día a día, basando su educación en la confianza y haciéndome ver que las cosas se logran única y exclusivamente con esfuerzo.



En segundo lugar, estaré siempre agradecido a Fernando Verdú por la confianza depositada en mí, brindándome la oportunidad de desarrollar a nivel práctico un proyecto que se planteaba como meramente descriptivo.



En tercer y último lugar me gustaría agradecer a Eugenio Sánchez, técnico de laboratorio su interés y ayuda a la hora de llevar a cabo cualquier tarea, estando ahí siempre que lo he necesitado.





En el presente proyecto se pretende estudiar la influencia de un sistema auxiliar de inyección de hidrógeno, pudiendo así contrastar la información facilitada por los fabricantes y distribuidores de este tipo de equipos.

Para que la comprensión de este sea plena se decide optar por una unidad de fabricación propia, profundizando en aspectos y etapas tan importantes como la fabricación, instalación, puesta en marcha y funcionamiento del equipo.

Si algo resulta especialmente clave es el aspecto económico ya que la intención principal de estos equipos es generar un balance positivo, logrando que el coste de la energía empleada para alimentar la unidad sea menor al coste del combustible que se está ahorrando.

**Palabras clave:** motores, electrólisis, celda de hidrógeno, eficiencia.





This project aims to study the influence of an auxiliary hydrogen injection system, thus being able to contrast the information provided by the manufacturers and distributors of this type of equipment.

To improve the understanding of this, decided to opt for an own manufacturing unit, delving into aspects and stages as important as manufacture, installation, start-up and operation of the equipment.

If something is especially important, it is the economic aspect, because the main objective of this equipment is generate a positive balance, achieving that the cost of the energy used to power the unit is lower than the cost of the fuel that is being saved.

**Key words:** engines, electrolysis, hydrogen cell, efficiency.





# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>21</b>
2.1	ANTECEDENTES GENERALES.....	22
2.2	ANTECEDENTES PERSONALES.....	24
<b>3</b>	<b>OBJETO DEL PROYECTO .....</b>	<b>25</b>
3.1	OBJETIVOS GENERALES .....	26
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>4</b>	<b>UNIDAD DE ENSAYO .....</b>	<b>28</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES .....	29
4.2	DATOS TÉCNICOS .....	29
4.3	ANÁLISIS DE DATOS TÉCNICOS.....	30
4.3.1	UNIDAD MOTRIZ.....	30
4.3.2	ACEITE.....	33
4.3.3	UNIDAD GENERADORA.....	34
4.3.4	PANEL DE CONTROL.....	37
4.4	IMÁGENES DEL EQUIPO .....	38
<b>5</b>	<b>CONCEPTOS CLAVE .....</b>	<b>40</b>
5.1	ELECTRÓLISIS .....	41
5.1.1	DEFINICIÓN.....	41
5.1.2	CLAVES .....	41
5.1.2.1	CONDUCTIVIDAD .....	41
5.1.3	RIESGOS .....	43
5.1.3.1	ACUMULACIÓN LOCALIZADA DE HIDRÓGENO .....	43
5.1.3.2	RETORNO DE LLAMA .....	45
5.1.3.3	GENERACIÓN DE ARCOS ELÉCTRICOS .....	47
5.2	AUTOENCENDIDO .....	49
5.2.1	PROBLEMÁTICA.....	49
5.2.2	PRECAUCIONES.....	49
5.3	PICADO DE BIELA .....	49
5.3.1	PROBLEMÁTICA.....	49
5.3.2	PRECAUCIONES.....	51
5.4	DOSADO .....	52



5.4.1	DEFINICIÓN .....	52
5.4.2	PRECEDENTES HISTÓRICOS .....	52
5.4.3	CLAVES .....	55
5.4.3.1	VARIABILIDAD .....	55
5.4.3.2	ELEMENTOS DE MEDIDA .....	55
5.4.4	RIESGOS .....	57
<b>6</b>	<b>CELDA ELECTROLÍTICA.....</b>	<b>58</b>
6.1	LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO .....	59
6.2	CONSTRUCCIÓN .....	62
6.2.1	MATERIALES NECESARIOS .....	62
6.2.2	TOMA DE DECISIONES .....	63
6.2.3	PREPARACIÓN DE MATERIALES .....	64
6.2.4	MODELOS TRIDIMENSIONALES .....	76
6.2.4.1	ELEMENTOS BASE .....	77
6.2.4.2	SUBCONJUNTOS .....	89
6.2.4.3	CONJUNTO GLOBAL .....	91
6.2.4.4	IMÁGENES REALISTAS .....	92
6.2.5	PLANOS .....	94
6.2.6	ENSAMBLAJE .....	102
6.3	PUESTA EN MARCHA .....	105
6.3.1	PREPARACIÓN DEL CONTENIDO .....	105
6.3.2	CONEXIONES BÁSICAS .....	109
6.3.3	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO .....	112
6.3.4	ÚLTIMOS AJUSTES .....	114
<b>7</b>	<b>EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN .....</b>	<b>119</b>
7.1	EQUIPOS DE MEDIDA .....	120
7.1.1	TERMOPAR .....	120
7.1.2	MEDIDORES DE POTENCIA .....	121
7.1.3	CRONÓMETRO .....	122
7.1.4	SONDA DE GASES .....	123
7.1.5	PISTOLA ESTROBOSCÓPICA .....	124
7.1.6	ESTACIÓN METEREOLÓGICA PORTATIL .....	125
7.1.7	CONTADOR CONSUMO GLOBAL COMBUSTIBLE .....	126
<b>8</b>	<b>FASE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>127</b>
8.1	INSTALACIÓN DEFINITIVA .....	128
8.2	PLANTEAMIENTO EXPERIMENTACIÓN .....	132
8.3	DATOS CLAVE EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS .....	134
8.3.1	SIN HIDRÓGENO .....	134
8.3.1.1	EN VACÍO .....	134
8.3.1.2	NIVEL DE CARGA 1 .....	135
8.3.1.3	NIVEL DE CARGA 2 .....	135
8.3.1.4	NIVEL DE CARGA 3 .....	136
8.3.2	CON HIDRÓGENO .....	137
8.3.2.1	EN VACÍO .....	137

8.3.2.2	NIVEL DE CARGA 1 .....	137
8.3.2.3	NIVEL DE CARGA 3 .....	138
8.4	GASES DE ESCAPE .....	139
8.4.1	EN VACÍO.....	139
8.4.2	NIVEL DE CARGA 1.....	140
8.4.3	NIVEL DE CARGA 2.....	140
8.4.4	NIVEL DE CARGA 3.....	141
8.5	CONCLUSIONES TÉCNICAS .....	142
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>145</b>
9.1	EQUIPOS COMERCIALES .....	146
9.2	AMORTIZACIÓN .....	151
9.3	FABRICACIÓN PROPIA.....	153
<b>10</b>	<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>154</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>156</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Triángulo del fuego.....	22
Ilustración 2: Precios combustibles última década.....	23
Ilustración 3: Sistema de inyección indirecta.....	26
Ilustración 4: Distribución variable.....	31
Ilustración 5: Detalle distribución OHV.....	32
Ilustración 6: Esquema sistema de lubricación por cárter seco.....	33
Ilustración 7: Sistema de generación mediante dinamo.....	34
Ilustración 8: Esquema estator.....	34
Ilustración 9: Primeros indicios de inducción electromagnética.....	35
Ilustración 10: Rotor y estator.....	35
Ilustración 11: Esquema estator en generación trifásica.....	36
Ilustración 12: Horómetro genérico.....	37
Ilustración 13: Detalle panel de control de la unidad.....	37
Ilustración 14: Vista frontal general de la unidad.....	38
Ilustración 15: Vista lateral general de la unidad.....	39
Ilustración 16: Unidad generadora KDE 12 STA.....	39
Ilustración 17: Reacción en celda electrolítica.....	41
Ilustración 18: Electrodo sumergidos en agua destilada pura.....	41
Ilustración 19: Ejemplo adición de sal común.....	42
Ilustración 20: Electrodo sumergidos tras adición.....	42
Ilustración 21: Celda electrolítica funcionando con agua corriente.....	43
Ilustración 22: Ejemplo presencia oxígeno en un fuego.....	43
Ilustración 23: Tabla comparativa poderes caloríficos.....	44
Ilustración 24: Celda de hidrógeno sumergida.....	44
Ilustración 25: Soplete de HHO con celda de 33 placas.....	45
Ilustración 26: Celda de hidrógeno con sistema antirretorno.....	46
Ilustración 27: Tanque acumulador antirretorno.....	46
Ilustración 28: Cotas de instalación de un tanque antirretorno con racores sumergidos.....	47
Ilustración 29: Ejemplo arco eléctrico.....	48
Ilustración 30: Esquema resumen tiempos de un motor de 4T.....	50
Ilustración 31: Punto muerto superior e inferior.....	50
Ilustración 32: Partes cigüeñal.....	50
Ilustración 33: Montaje pistón, biela y bulón.....	51
Ilustración 34: Biela doblada.....	51
Ilustración 35: Carburador 34mm.....	52
Ilustración 36: Partes de un carburador.....	52
Ilustración 37: Boca de entrada carburador.....	53
Ilustración 38: Aguja y guillotina del carburador.....	54
Ilustración 39: Sonda lambda.....	55
Ilustración 40: Sistema catalizador con doble sonda lambda.....	56
Ilustración 41: Vista lateral sistema de doble sonda lambda.....	56
Ilustración 42: Funcionamiento del catalizador en un MEP.....	56
Ilustración 43: Acumulación de carbonilla en catalizador.....	57

Ilustración 44: Molécula de agua.....	59
Ilustración 45: Puente de hidrógeno .....	59
Ilustración 46: Puentes de hidrógeno en agua .....	60
Ilustración 47: Electrólisis convencional.....	60
Ilustración 48: Celda de hidrógeno.....	61
Ilustración 49: Caídas de voltaje en celda de hidrógeno .....	61
Ilustración 50: Vista lateral placas celda de hidrógeno .....	63
Ilustración 51: Chapa empleada para las placas de la celda .....	64
Ilustración 52: Placa tras primer corte.....	65
Ilustración 53: Placa extra. ....	65
Ilustración 54: Filos cortantes y rebabas. ....	66
Ilustración 55: Mecanizado en esmeril de banco.....	66
Ilustración 56: Esmeriladora de banco. ....	67
Ilustración 57: Taladros en las placas.....	67
Ilustración 58: Lámina de caucho.....	68
Ilustración 59: Comprobación continuidad .....	68
Ilustración 60: Placa PVC. ....	69
Ilustración 61: Montaje provisional núcleo celda. ....	70
Ilustración 62: Chapa empleada para los conectores.....	71
Ilustración 63: Prueba elemento conexión negativos. ....	71
Ilustración 64: Núcleo celda desmontado.....	72
Ilustración 65: Recipiente transparente. ....	72
Ilustración 66: Trabajos en la tapa del recipiente. ....	73
Ilustración 67: Prensaestopas empleado como salida de gas.....	74
Ilustración 68: Broca escalonada. ....	74
Ilustración 69: Montaje provisional recipiente.....	75
Ilustración 70: Montaje definitivo recipiente. ....	75
Ilustración 71: Elementos 3D, placa neutra (tono referencia).....	77
Ilustración 72: Elementos 3D, placa neutra (tono realista) .....	77
Ilustración 73: Elementos 3D, placa cargada (tono referencia).....	78
Ilustración 74: Elementos 3D, placa cargada (tono realista).....	78
Ilustración 75: Elementos 3D, separadores aislantes (tono referencia).....	79
Ilustración 76: Elementos 3D, separadores aislantes (tono realista) .....	79
Ilustración 77: Elementos 3D, soporte placas (tono referencia).....	80
Ilustración 78: Elementos 3D, soporte placas (tono realista) .....	80
Ilustración 79: Elementos 3D, conductor interno positivo (tono referencia) .....	81
Ilustración 80: Elementos 3D, conductor interno positivo (tono realista).....	81
Ilustración 81: Elementos 3D, conductor común negativos (tono referencia) .....	82
Ilustración 82: Elementos 3D, conductor común negativos (tono realista).....	82
Ilustración 83: Elementos 3D, conductor interno negativo (tono referencia) .....	83
Ilustración 84: Elementos 3D, conductor interno negativo (tono realista).....	83
Ilustración 85: Elementos 3D, terminal eléctrico (tono referencia) .....	84
Ilustración 86: Elementos 3D, terminal eléctrico (tono realista).....	84
Ilustración 87: Elementos 3D, tubo extracción gases (tono referencia) .....	85
Ilustración 88: Elementos 3D, tubo extracción gases (tono realista) .....	85
Ilustración 89: Elementos 3D, cable alimentación (tono referencia) .....	86
Ilustración 90: Elementos 3D, cable alimentación (tono realista).....	86

Ilustración 91: Elementos 3D, recipiente (tono referencia).....	87
Ilustración 92: Elementos 3D, recipiente (tono realista) .....	87
Ilustración 93: Elementos 3D, tapa roscada (tono referencia).....	88
Ilustración 94: Elementos 3D, tapa roscada (tono realista) .....	88
Ilustración 95: Subconjuntos 3D, subconjunto interior (tonos referencia).....	89
Ilustración 96: Subconjuntos 3D, subconjunto interior (tonos realistas).....	89
Ilustración 97: Subconjuntos 3D, subconjunto recipiente y conexiones (tonos referencia) .....	90
Ilustración 98: Subconjuntos 3D, subconjunto recipiente y conexiones (tonos realistas) .....	90
Ilustración 99: Conjunto 3D (tonos referencia).....	91
Ilustración 100: Conjunto 3D (tonos realistas).....	91
Ilustración 101: Realismo 3D, plano general .....	92
Ilustración 102: Realismo 3D, plano picado .....	92
Ilustración 103: Realismo 3D, detalle conexiones .....	93
Ilustración 104: Realismo 3D, detalle sujeciones interiores.....	93
Ilustración 105: Realismo 3D, detalle conexiones placas .....	93
Ilustración 106: Icono sistema europeo de vistas .....	94
Ilustración 107: Ensamblaje fase 1, tapa con soportes .....	102
Ilustración 108: Ensamblaje, núcleo preparado.....	102
Ilustración 109: Ensamblaje fase 2.1, núcleo ensamblado .....	103
Ilustración 110: Ensamblaje fase 2.2, núcleo ensamblado .....	103
Ilustración 111: Ensamblaje fase 3.1, conducto y cableado.....	104
Ilustración 112: Ensamblaje fase 3.2, conducto y cableado .....	104
Ilustración 113: Lentejas de sosa cáustica o hidróxido de sodio (NaOH).....	105
Ilustración 114: Agua destilada .....	106
Ilustración 115: Mezcla litro a litro, agua destilada .....	106
Ilustración 116: Pesaje de la sosa cáustica a adicionar.....	107
Ilustración 117: Muestra de sosa cáustica .....	107
Ilustración 118: Tanque lleno con disolución conductora.....	108
Ilustración 119: Fuente de alimentación 12V y 2,5A.....	109
Ilustración 120: Conexión de la fuente de alimentación 12V y 2,5A.....	109
Ilustración 121: Primeros indicios de producción .....	110
Ilustración 122: Burbujas de hidrógeno .....	111
Ilustración 123: Fuente de alimentación ordenador .....	112
Ilustración 124: Ficha técnica fuente de alimentación ordenador .....	112
Ilustración 125: Producción de hidrógeno con 18A y 12V .....	113
Ilustración 126: Salida de hidrógeno con 18A y 12V .....	113
Ilustración 127: Conexión en paralelo de dos fuentes regulables .....	114
Ilustración 128: Conexión tres fuentes en paralelo .....	115
Ilustración 129: Parámetros resultantes de la instalación de 3 fuentes en paralelo.....	116
Ilustración 130: Producción de hidrógeno con 3 fuentes en paralelo.....	116
Ilustración 131: Bomba impulsión hidrógeno .....	117
Ilustración 132: Control de temperatura de funcionamiento celda funcionando en vacío .....	118
Ilustración 133: Equipos de medida, medidor TESTO 922 0560 9221.....	120
Ilustración 134: Equipos de medida, medidor multifunción .....	121

Ilustración 135: Equipos de medida, vatímetro industrial.....	121
Ilustración 136: Equipos de medida, cronómetro de alta precisión.....	122
Ilustración 137: Equipos de medida, analizador de gases de escape.....	123
Ilustración 138: Equipos de medida, mini impresora testo .....	123
Ilustración 139: Equipos de medida, pistola estroboscópica.....	124
Ilustración 140: Equipos de medida, estación meteorológica portátil.....	125
Ilustración 141: Equipos de medida, inicio contador combustible.....	126
Ilustración 142: Equipos de medida, final contador combustible .....	126
Ilustración 143: Taladrado directo sobre manguito de admisión .....	128
Ilustración 144: Desmontaje manguito admisión fase 1.....	128
Ilustración 145: Desmontaje manguito admisión fase 2.....	129
Ilustración 146: Comprobación interior punto de inyección manguito.....	129
Ilustración 147: Sistema de inyección de hidrógeno .....	130
Ilustración 148: Bloqueo inyección hidrógeno.....	131
Ilustración 149: Comprobación final ensayo.....	133
Ilustración 150: Lectura consumo 1.1 .....	134
Ilustración 151: Lectura consumo 1.2 .....	134
Ilustración 152: Elementos de consumo empleados en el ensayo.....	135
Ilustración 153: Cronómetro empleado en el ensayo .....	136
Ilustración 154: Fuentes de alimentación ensayo con hidrógeno .....	137
Ilustración 155: Control Temperaturaeratura de la celda durante el ensayo .....	138
Ilustración 156: Equipo de medición de gases .....	139
Ilustración 157: Temperatura refrigerante .....	140
Ilustración 158: Unidad lectora e impresora de datos gases.....	141
Ilustración 159: Fricción de elementos móviles .....	144
Ilustración 160: Ejemplo cartografía centralita .....	147
Ilustración 161: Centralitas con más de 3 axis .....	148
Ilustración 162: KTM DUKE 1290 – Versión 2022 .....	148
Ilustración 163: Rango inflamabilidad hidrógeno .....	149
Ilustración 164: Ejemplo 1 instalación con múltiples grupos electrógenos .....	152
Ilustración 165: Ejemplo 2 instalación con múltiples grupos electrógenos .....	152
Ilustración 166: Calidades tornillería .....	155



# 1 INTRODUCCIÓN

La industria ha evolucionado notablemente en los últimos tiempos, aumentando exponencialmente la velocidad de desarrollo y puesta en marcha de nuevas tecnologías. Si algo no ha cambiado desde los orígenes de las primeras industrias es el deseo de abastecer unas necesidades objetivo, marcadas y renovadas constantemente por el mercado.

En la actualidad dichas necesidades resultan ser altamente cambiantes, ya sea por factores legales o socioculturales. Si nos paramos a pensar detenidamente qué relación existe entre ambos, nos acabamos dando cuenta de que estos dos elementos actúan conjuntamente, siendo el marco legal el que obliga a la sociedad a avanzar, pero a su vez basando sus modificaciones en peticiones sociales. Estos no son los únicos factores a tener en cuenta, pero sí dos de los más importantes.

Los factores mencionados anteriormente varían en base a muchos aspectos, entre ellos los aspectos con más relevancia en la actualidad son el ambiental y el ecológico, los cuales han ganado peso en los últimos años debido a que ya no son únicamente factores ligados a la moralidad, sino que influyen de manera clara en la economía, afectando en este nuevo escenario a toda la sociedad.

Un claro ejemplo es la crisis de los semiconductores, la cual ha tenido un notable impacto en un gran número de industrias. Estos elementos se emplean en miles de productos, resultandos imprescindibles en muchos de ellos como sucede en vehículos, dispositivos móviles y cualquier tipo de dispositivos con chips o controladores de naturaleza electrónica.

A pesar de ser todo lo mencionado afección de un gran número de industrias, existe una en la que genera especial preocupación, por encontrarse esta en el seno de todos estos conflictos. Es el caso de industria automotriz.

La industria automotriz o automovilística nació como cualquier otra, en pequeños talleres de trabajo, con medios escasos y sin un patrón de actuación previo, fue esta la tesitura con la que Karl Benz tuvo que lidiar en el desarrollo del primer vehículo reconocido y patentado como coche. Hoy por hoy resulta sencillo imaginar un aparato con cuatro ruedas y un volante al escuchar dicha palabra, pero el conocido por los alemanes de la época como 'Fahrzeug mit Gasmotorentrieb' es el claro ejemplo de que no todo fue tan sencillo en su origen. 'Fahrzeug mit Gasmotorentrieb' viene a significar “cosa con ruedas y motor de gasolina”, como se puede observar el propio nombre ya resultaba incierto. Era este un vehículo con tres ruedas y un sistema de dirección dotado de un actuador en forma de palanca, algo bastante distinto de lo que actualmente podemos concebir como coche.

Los vehículos fueron mejorando con celeridad, si bien es cierto que los primeros avances fueron más bien aplicados a aspectos de carrocería y confort, destacan entre ellos avances como el habitáculo cerrado, el arranque eléctrico, el volante como lo conocemos hoy día o el uso de cuatro ruedas por norma general.





## 2 ANTECEDENTES

## 2.1 ANTECEDENTES GENERALES

Desde las primeras civilizaciones conocidas el ser humano ha empleado el fuego a su favor, este fue ganando importancia a medida que se descubrían nuevas aplicaciones de este.

El fuego es el producto de una reacción de oxidación acelerada, este se caracteriza porque en dicho proceso se emite energía en forma de luz y calor. Para que pueda producirse fuego ha de respetarse el conocido como triángulo del fuego, este se muestra a continuación:



*Ilustración 1: Triángulo del fuego.*

Como puede apreciarse en la imagen existen tres factores determinantes, estos son el combustible, el comburente y por último, pero no menos importante, el calor.

- **Combustible:** El combustible resulta ser cualquier material capaz de desprender energía tras una oxidación violenta del mismo.
- **Comburente:** El comburente suele ser el oxígeno presente en el aire, sin este no sería posible llevar a cabo la reacción de oxidación y por tanto nunca se produciría la combustión.
- **Calor:** El calor o energía de activación es el factor que propicia el inicio de la reacción, este cobra una gran importancia en la fase inicial pero normalmente la pierde al generarse una retroalimentación en la reacción, esta es conocida como reacción en cadena.

Visto esto resultaría sencillo pensar en los pros que este fenómeno presenta, pero existen problemáticas a tener en cuenta.

Los combustibles se han ido estudiando y optimizando lo que ha producido una focalización de las necesidades y la demanda en torno a combustibles fósiles de gran poder calorífico. Este tipo de combustibles son derivados de crudos presentes en la naturaleza en cantidades finitas, estos crudos se generaron en eras pasadas a causa de notables variaciones de presión y temperatura.

En la actualidad la presencia de estos crudos es escasa a causa del ritmo de consumo que los humanos hemos marcado en las últimas décadas, esta escasez está provocando la acelerada búsqueda de nuevas mejoras para fuentes de energía renovables. Pero no todos los consumos actuales podrán ser abastecidos por dichas fuentes a medio plazo. El ejemplo más claro es el de los motores de combustión interna, los cuales dependen casi totalmente de combustibles fósiles.

Las directivas europeas marcaban 2030 como fecha objetivo para la total eliminación de vehículos con motores de combustión interna, pero el contexto económico y social vivido en la actualidad hace que esa fecha no sea realista. Siendo esta problemática conocida por los principales fabricantes de vehículos estos están adoptando nuevas líneas de actuación, destacan tres tendencias. En primer lugar, la ampliación de la gama de vehículos electrificados y/o híbridos, en segundo lugar, el desarrollo de vehículos con motores de combustión interna convencionales capaces de aprovechar otro tipo de combustibles y, en tercer lugar, la mejora de la eficiencia de los motores de combustión interna convencionales. Cada uno de los fabricantes ha apostado por una o varias de dichas alternativas.

La segunda de las alternativas muestra un gran potencial ya que no implica una gran modificación de los motores y por tanto se pueden aprovechar en gran medida las plantas de producción actuales. Uno de los combustibles más conocidos es el GLP o gas licuado de petróleo, el cual ha sido adaptado a vehículos con motor de gasolina durante años. Con este combustible los consumos del vehículo eran ligeramente superiores, pero el bajo coste del propio combustible hacía de esta una alternativa muy atractiva. Aun teniendo en cuenta la elevación del consumo el ahorro económico podía alcanzar cifras del 50%. A continuación, se muestra un gráfico comparativo de los precios medios de cada uno de los principales combustibles en la última década:



Ilustración 2: Precios combustibles última década.

Como se puede observar el precio del GLP mantiene una relación proporcional respecto a la gasolina de estimadamente un 48% del precio de esta.

Aún así, el GLP es un derivado del petróleo y presenta una dependencia directa de la disponibilidad de este recurso natural, por este motivo otros combustibles alternativos están ganando peso en la actualidad.

Los combustibles por lo general contienen carbono e hidrógeno siendo este segundo el elemento más abundante en el universo suponiendo el 75% de la materia y el 90% de los átomos a causa de su pequeño tamaño. Por este motivo el hidrógeno está sonando con fuerza en los últimos años tanto para emplearse como combustible único o complementario junto a otros convencionales.

## 2.2 ANTECEDENTES PERSONALES

Durante años he manifestado especial interés en torno a todo lo referente a los motores de combustión, los vehículos y en general las posibles combinaciones de ambos elementos.

Año tras año escucho hablar de nuevos sistemas de propulsión, de nuevas mejoras en los sistemas tradicionales o de combustibles revolucionarios. Resulta bastante común oír hablar de este tipo de temas, pero rara vez estos se convierten en realidad y en caso de convertirse en realidad en contadas ocasiones disponemos de documentación suficiente como para poder generar una evaluación personal sobre la efectividad de estos. Es por esto por lo que existen determinados sistemas que me causan una notable curiosidad, ya que prometen poder ser instalados de forma relativamente sencilla sobre vehículos convencionales prometiendo reducciones de consumo de hasta el 40% e incrementos de potencia de hasta el 20% sin necesidad de ajustes.

Quizás esta sea la oportunidad de poder contrastar la poca información proporcionada por los fabricantes frente a la realidad y es por esto mismo por lo que yo Antonio Manuel García Pérez, estudiante de cuarto curso del Grado en ingeniería mecánica, con DNI 48782940D, me dispongo a crear, instalar y evaluar uno de estos equipos, generando con este proceso el presente trabajo fin de grado en el ámbito de la investigación.



## **3 OBJETO DEL PROYECTO**



### 3.1 OBJETIVOS GENERALES

Mediante este proyecto se pretende crear, instalar y evaluar un sistema de inyección indirecta de hidrógeno, estos sistemas llevan tiempo en el mercado, pero no parecen haber logrado la difusión o popularidad que se esperaba de ellos. Estos sistemas se fundamentan en el fenómeno de la electrólisis del cual se extrae hidrógeno del agua, normalmente destilada, para inyectarlo directamente en la admisión. Esta inyección se considera indirecta ya que el hidrógeno se inyecta en el conducto de admisión de combustible, previo a la válvula de admisión.



Tras analizar detenidamente diversas empresas del sector se han localizado los siguientes datos en cuanto a las ventajas que estos sistemas ofrecen:

1. Ahorro en su gasto de combustible actual entre un 20 y 30%.
2. Aumenta la potencia y el rendimiento de su vehículo.
3. Aumenta la vida útil de su motor.
4. Reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO.
5. Reduce la temperatura en el motor.
6. Elimina el carbono depositado en su motor.
7. Menor nivel de ruido en el motor.

Cada una de estas ventajas trae adjunta una breve justificación que en la mayoría de los casos carece de contenido técnico o científico, presentan un carácter claramente comercial. Llamamos especialmente la atención dos frases que sí mencionan aspectos de esta naturaleza, estas son las siguientes: “Cuanto más combustible se quema, el motor más ruido hace y tiene menos rendimiento” o “Al cambiar del ciclo de combustión convencional al suplementado con hidrógeno, el motor suena mucho más relajado que antes, esto es debido a una mayor eficiencia en la combustión”. Estas citas resultan ser parcialmente lógicas, pero hablar de nivel sonoro o de mayor eficiencia tan a la ligera y en esos niveles de abstracción, sin estudios propios resulta cuanto menos sospechoso. En dichas páginas se ofrecen referencias a estudios externos y bien es cierto que sí se ha demostrado que el hidrógeno presenta ventajas en este tipo de aplicaciones, pero en todos

los casos estudiados se realizan ajustes electrónicos a las centralitas del vehículo ajustando los tiempos de inyección y en caso de ser motores de gasolina también los de encendido.

Por lo tanto, el principal objetivo de la investigación es comprobar si este tipo de equipos son capaces de mejorar los aspectos expuestos anteriormente y en caso de hacerlo en qué medida.

## 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para la consecución de cualquier gran objetivo resulta importante definir objetivos de menor alcance, los cuales servirán para comprender en qué fase nos encontramos y hacia donde nos dirigimos.

En este caso nos interesa hablar de términos como la rentabilidad, fiabilidad, estabilidad, peligrosidad, rendimiento y eficiencia, los cuales se mencionarán de manera constante a lo largo del desarrollo de la experimentación. Para acotar de forma más clara el abanico de interés de la experimentación a continuación se mostrarán los objetivos clave de la experimentación:

1. Evaluar los costes de funcionamiento de la celda (consumo energético) frente al coste del combustible ahorrado con la utilización de la celda electrolítica.
2. Estudiar la estabilidad de la potencia generada por la unidad a ensayar mientras que la inyección de hidrógeno esta activa.
3. Conocer a grandes rasgos la influencia de este sistema en los gases de escape y por tanto en las emisiones.
4. Analizar los gradientes de temperatura experimentados por el motor.
5. Variar el voltaje de alimentación del equipo de electrólisis (celda electrolítica) y estudiar la influencia de dicha variación, manteniendo la intensidad constante y viceversa.
6. Variar el consumo eléctrico final y por tanto los requerimientos a abastecer por la unidad, generando así varios puntos de trabajo y estudiando el comportamiento del sistema ante estos.

A faint watermark logo for 'Biblioteca' is visible in the background. It features a stylized book icon on the left and the word 'Biblioteca' in a serif font on the right. Below the word, there is a small graphic of a hand pointing towards the right.

**4 UNIDAD DE ENSAYO**



## 4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La unidad seleccionada para el ensayo es una unidad destinada a la generación de energía a partir de un motor de encendido por compresión a base de combustible diésel. Este tipo de equipo se adapta perfectamente a las necesidades del ensayo ya que permite conocer de manera precisa la energía generada y también el consumo de combustible asociado a dicha potencia de salida.

Todos los elementos van cubiertos por paneles aislantes y por una estructura de perfiles de acero acabada exteriormente con chapas pintadas, pudiendo así soportar el conjunto desde el gancho de elevación solidario a dicha estructura. A su vez para transportes de menor importancia el generador está dotado de ruedas y manillas para el manejo manual del equipo.

La autonomía del equipo es de unas 7 horas a un de giro próximo a 3000 rpm, la potencia mecánica proporcionada por la unidad motriz en este régimen es de 12,5 kW, aproximadamente 17 CV potencia más que suficiente para los requerimientos objetivo de este equipo.

## 4.2 DATOS TÉCNICOS

Unidad Motriz	Modelo	KM2V80G
	Tipo motor	2 cilindros en V, 4 tiempos, inyección indirecta
	Distribución	OHV
	Refrigeración	Por agua
	Capacidad refrigerante	3 l (sólo unidad motriz)
	Diámetro x Carrera	80 x 79 mm
	Relación de compresión	23:1
	Cilindrada	794 cm <sup>3</sup>
	Aspiración	Natural
	Velocidad de giro	3.000 rpm
	Potencia Nominal	12,5k W / 3.000 rpm
	Encendido	Por compresión
	Partida	Eléctrica 12 V
	Batería	12V - 60Ah
Combustible	Tipo	Petróleo Diesel
	Capacidad tanque combustible	26 l
	Autonomía	> 7 h
	Indicador de nivel de combustible	Sí
Aceite	Tipo	Aceite para motores diésel 4T, 15W40
	Alarma de aceite	Sí
	Capacidad cárter	2,3 l
Unidad Generadora	Voltaje	230 V
	Frecuencia	50 Hz
	Corriente Nominal	37 A
	Potencia Nominal	8,5 kVA / 8,5 kVA
	Potencia Máxima	9,5 kVA / 9,5 kVA

	Excitación	Autoexcitado sin carbones
	Fases	Monofásico
	Grado de aislación	F
	Nº de polos	2
	Factor de potencia (cos phi)	1
	Regulación de voltaje	AVR
	Conexión	2 x enchufe hembra 250 V NEMA L6-30R
	Bornera	Sí
Panel de Control	Voltímetro	Sí
	Amperímetro	Sí
	Frecuenciómetro	Sí
	Horómetro	Sí
	Protector AC	Sí
	Protector DC	Sí
	Luz indicadora Piloto	-
Salida DC	Voltaje	-
	Corriente	-
Gabinete	Estructura	Tipo Silencioso
	Nivel de ruido	72 dB(A) / 7m
	Chasis	Perfiles Acero
Accesorios	Enchufe macho	2 x 250 V NEMA L6-30P
	Cable para cargar baterías	-
	Manual de usuario	Sí
	Juego herramientas básicas	Sí
	Ruedas	4
Dimensiones	Equipo (Largo x Ancho x Alto)	135 x 65 x 76cm
Peso	Vacío	310 kg
	Con aceite y tanque lleno	345 kg
Diseño	Color	Amarillo / Negro
	Transporte	Gancho de levante, manillas de transporte y ruedas
	Procedencia	China

## 4.3 ANALISIS DE DATOS TÉCNICOS

A continuación, se analizarán los datos técnicos más relevantes desde el punto de vista de la investigación, con la intención de facilitar el entendimiento de los mismos:

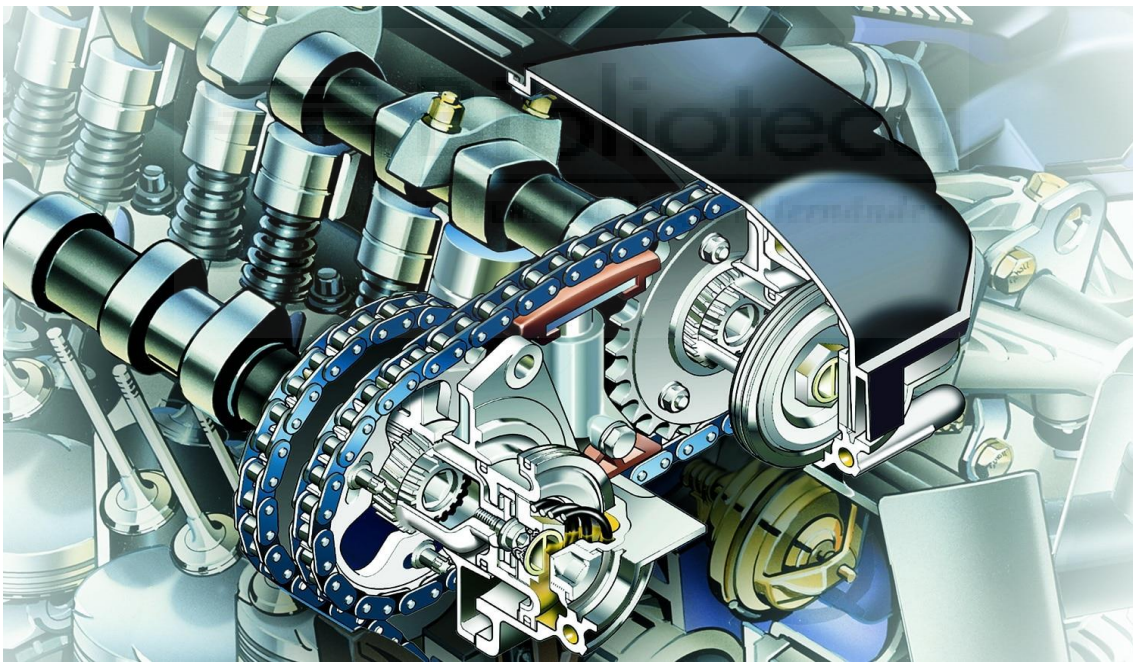
### 4.3.1 UNIDAD MOTRIZ

La unidad motriz o motora es la encargada de transformar el combustible en energía mecánica. Si algo resulta clave en esta unidad es que debe generar una potencia constante y debe mantener una estabilidad de funcionamiento aceptable, pudiendo así adaptarse con precisión a la demanda.

En este tipo de motores no se requieren potencias excesivas, ya que se busca el equilibrio entre potencia y consumo que optimice la generación consiguiendo así un generador lo

más eficiente posible. La búsqueda de esta eficiencia resulta primordial, es por ello por lo que los motores empleados son motores de encendido por compresión atmosféricos de cuatro tiempos con dosados claramente pobres, lo que viene a decir que la proporción combustible-comburente es claramente dominada por el comburente. El concepto dosado se detalla posteriormente en el punto 5.4.

Los motores de combustión son extendidamente empleados en automóviles, en estos los requerimientos son altamente cambiantes, por lo cual no pueden ser diseñados para un único régimen de giro, en el que la apertura de válvulas provoque que el instante de encendido completo del combustible coincida con la posición deseada de la carrera del pistón. Para que este ajuste de tiempos se siga dando a otros regímenes de giro se han diseñado unos sistemas que permiten modificar la posición relativa de giro entre el árbol o árboles de levas y el cigüeñal, abriendo así las válvulas de forma anticipada o atrasada. Cada firma tiene un enfoque, pero el propósito final es común. Normalmente se actúa sobre el árbol encargado de la apertura de las válvulas de admisión, ya que es el de mayor relevancia. No obstante marcas como BMW han pasado de sistemas de actuación única como VANOS a sistemas de doble influencia como el Bi-VANOS, el cual logra aprovechar todo el potencial del sistema de distribución variable, actuando también sobre la apertura de las válvulas de escape.



*Ilustración 4: Distribución variable*

Los motores empleados en unidades de generación no presentan problemas a la hora de diseñar una secuencia de apertura de válvulas, ya que no han de tener en cuenta avances o atrasos que permitan adaptarse a diversos rangos de revoluciones, estos motores suelen trabajar en regímenes de giro muy definidos, los cuales son determinados en base a la aplicación final y los requerimientos objetivo a abastecer. En este caso concreto, por sencillez de diseño de la culata y por la ausencia de las necesidades anteriormente detalladas se emplea una distribución OHV, la cual se caracteriza por emplear varillas y balancines en lugar de árboles de levas en cabeza.

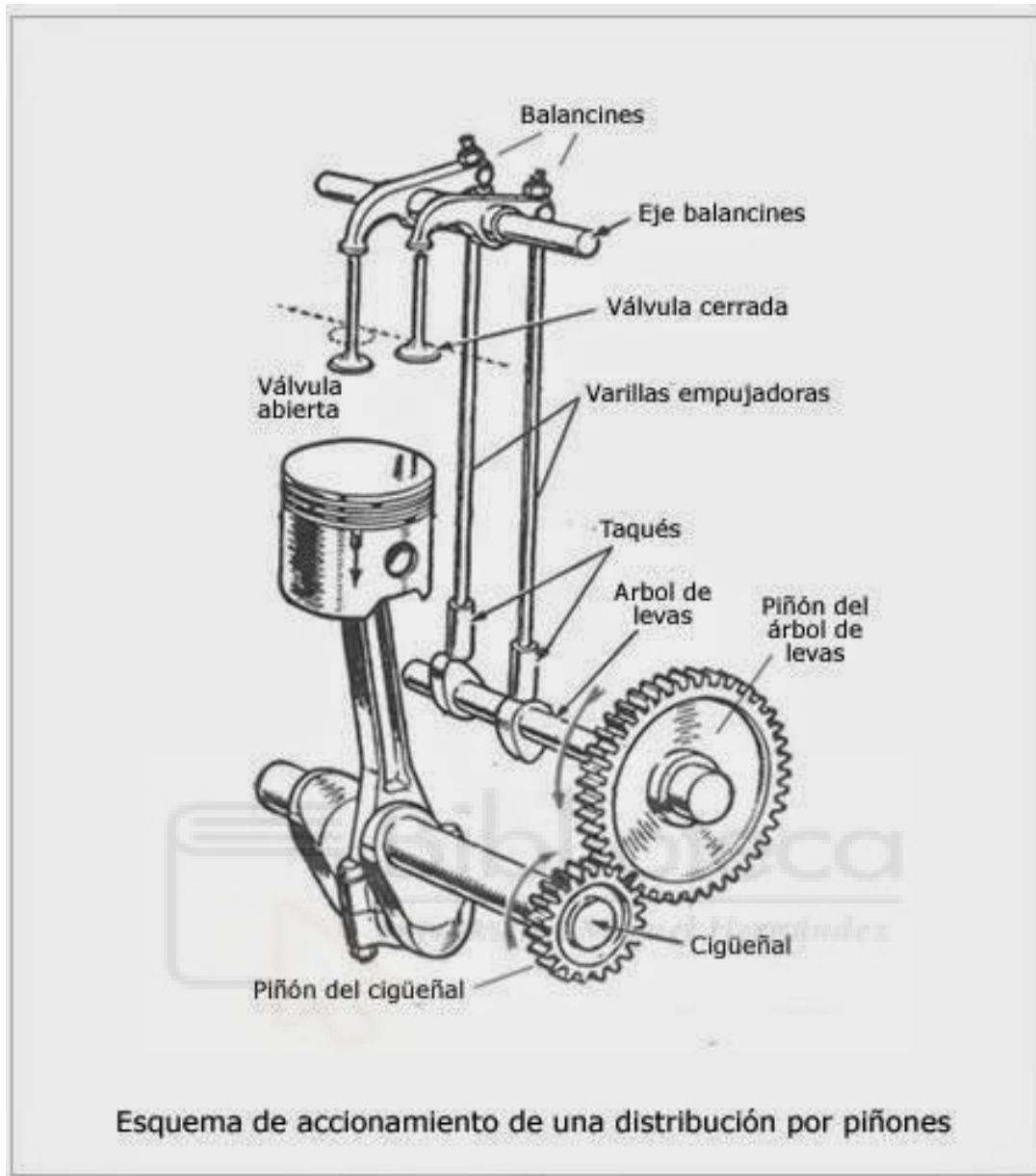


Ilustración 5: Detalle distribución OHV

Este sistema elimina una de las principales problemáticas de los motores de combustión, ya que permite emplear diseños de culata sencillos ahorrando así mucho capital en la etapa de diseño.

El sistema de refrigeración empleado al tratarse de una unidad estática y cubierta por chapas es un sistema de refrigeración por agua, este sistema resulta fácil de instalar gracias a la ausencia de árboles de levas en la culata, estando ésta mucho más despejada para ubicar los pasos de fluido refrigerante. El volumen de refrigerante requerido es de 3 litros.

La cilindrada global es de  $794 \text{ cm}^3$ , esta se distribuye en dos cilindros dispuestos en V. La alimentación de los cilindros se realiza mediante inyección indirecta lo que aún permite abaratar aún más los costes por requerir de inyectores que trabajan a una menor presión y no se exponen directamente a la cámara de combustión.

### 4.3.2 ACEITE

Para la lubricación de los elementos móviles se emplea aceite 15W40 el cual es muy empleado en motores de potencia moderada.

Si algo llama la atención es la capacidad del cárter siendo esta de únicamente de 2,3 litros, esto es posible gracias a que esta unidad motora no va a presentar movimiento alguno y por tanto el cárter puede ser diáfano. A diferencia de este, en algunos automóviles o motocicletas en los que a causa de las posibles fuerzas, inercias y movimientos el diseño del cárter resulta clave para que la bomba de aceite nunca funcione en vacío, manteniendo así purgado el sistema de engrase. En algunas aplicaciones de alta exigencia se emplean sistemas de cárter seco, los cuales toleran cualquier tipo de movimiento asegurando un caudal continuo de aceite. Este sistema ubica la toma de aceite de la bomba en un punto del cárter profundo en el cual siempre debería haber aceite. El inconveniente de estos sistemas es que la altura global del elemento aumenta, obligando a elevar la posición del motor para que la altura libre al suelo de la parte inferior de este elemento sea suficiente para circular con normalidad.

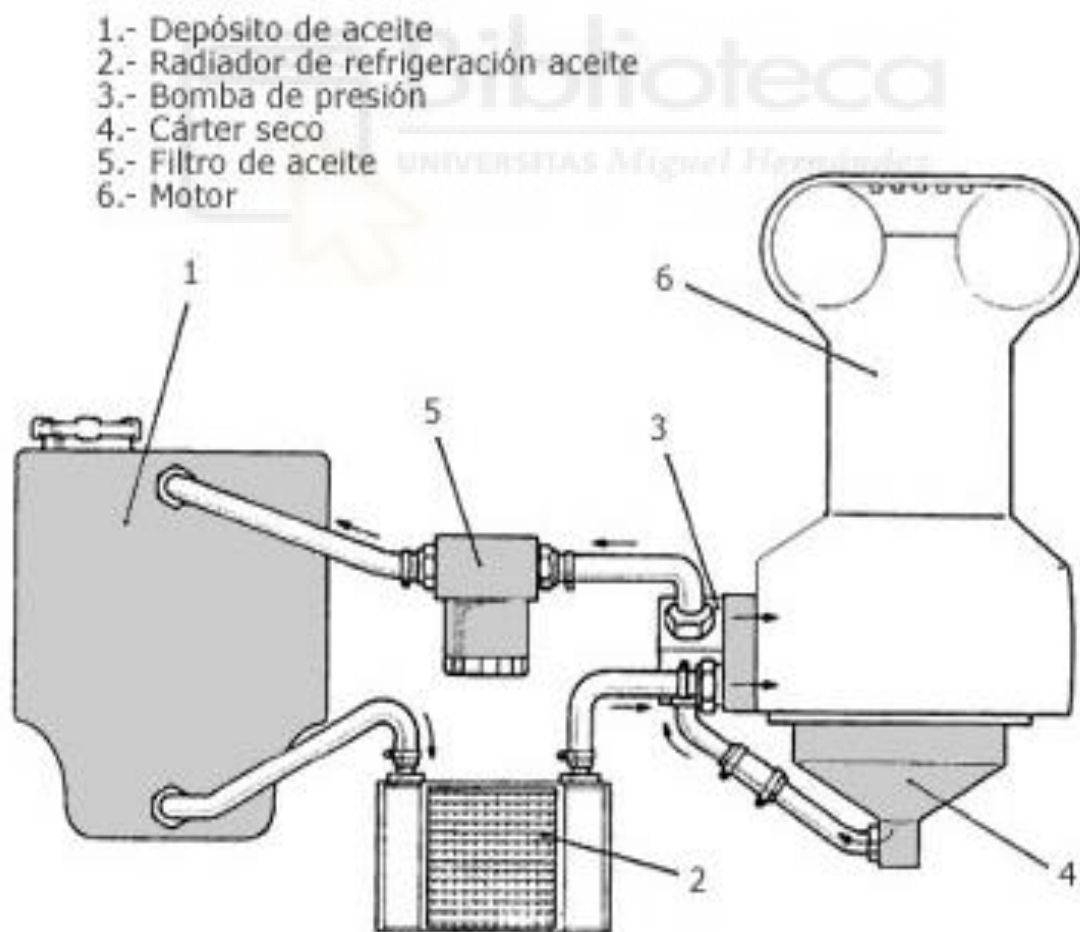


Ilustración 6: Esquema sistema de lubricación por cárter seco



### 4.3.3 UNIDAD GENERADORA

La unidad encargada de convertir la energía mecánica obtenida de la combustión en energía eléctrica es conocida como unidad generadora.

Desde hace décadas los sistemas de generación forman parte de nuestras vidas, estos se empleaban y emplean en un gran número de ámbitos y aplicaciones. Desde las primeras bicicletas que empleaban este sistema para alimentar un pequeño foco a partir del movimiento de la rueda delantera a los complejos sistemas de recuperación de energía a partir del frenado de los automóviles de última generación.

En el caso de las bicicletas clásicas este sistema de generación era conocido como “dinamo” y es el que puede observarse en la siguiente ilustración.



Ilustración 7: Sistema de generación mediante dinamo

Si observamos la imagen con detenimiento podemos observar una especie de moleteado o ranurado en la cara lateral del neumático, este permitía que la adherencia entre el cabezal rotatorio de la dinamo y el neumático fuera total ante cualquier circunstancia. Es un claro ejemplo de la importancia que tenían estos sistemas en la época ya que hasta los neumáticos estaban adaptados y preparados para optimizar su funcionamiento.

Si algo no ha cambiado con el paso de los años es la lógica constructiva de estos sistemas, ya que, aunque su optimización ha sido notable, la composición de estas unidades ha sido prácticamente la misma en todo momento.

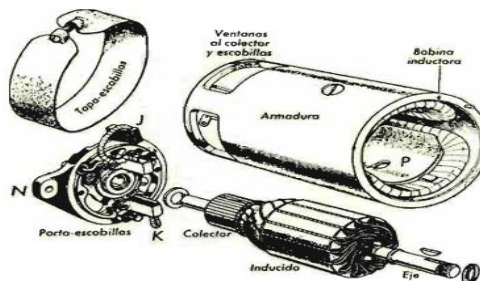


Ilustración 8: Esquema estator

El 27 de agosto de 1831 Faraday se encontraba experimentando con bobinas, tras desplazar un imán observó que una de las bobinas generó una corriente eléctrica, cosa que llamo inmediatamente su atención.

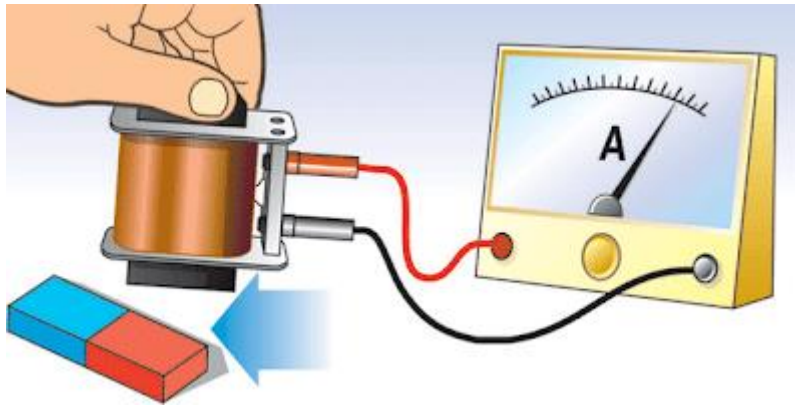


Ilustración 9: Primeros indicios de inducción electromagnética

Con el paso del tiempo se fue investigando este fenómeno dándole el nombre de inducción electromagnética y es el fenómeno responsable de cualquier generación eléctrica en la actualidad.

Todo generador de esta tipología está dotado de una parte móvil y otra fija, conocidas como rotor y estator respectivamente. Estos dos elementos pueden desempeñar dos funciones indistintamente, la de inductor y la de inducido, las cuales serán asignadas en base al diseño de la unidad generadora coexistiendo siempre ambas.

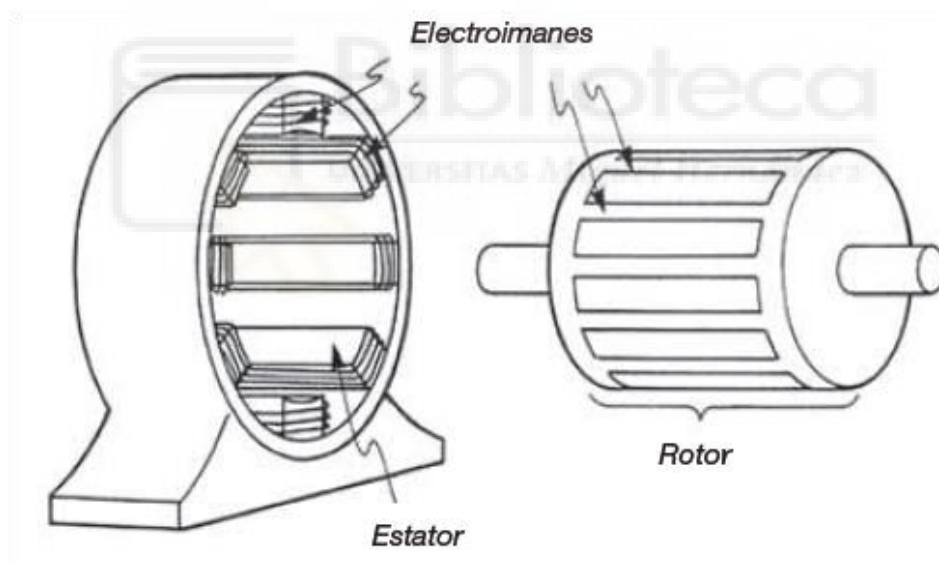


Ilustración 10: Rotor y estator

En este caso los electroimanes están ubicados en el estator, por tanto, este es el elemento inductor, encargado de generar la inducción en el rotor o inducido. En función del tipo de corriente que se quiera generar se empleará un número de pares de polos acorde. Por ejemplo, para producir corriente trifásica se necesitan como mínimo tres fases, suponiendo cada una de ellas un par de polos. A continuación, se muestra un ejemplo de generación trifásica, en el que el estator actúa como inducido y por ello presenta tantos cables de salida como fases presenta.

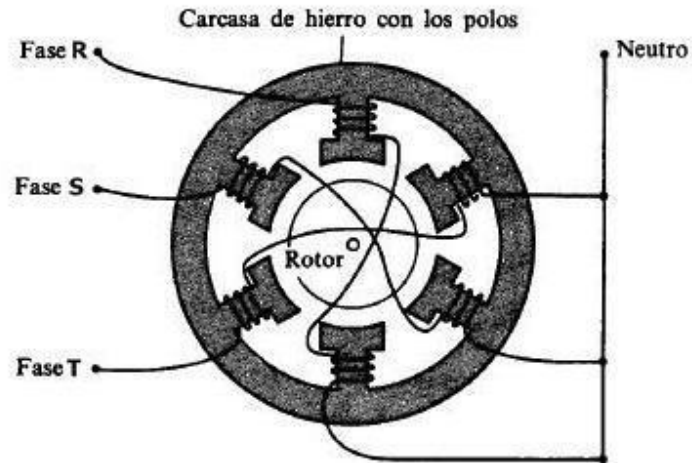


Ilustración 11: Esquema estator en generación trifásica

En la ficha técnica puede observarse que la generación en nuestro caso resulta ser monofásica y por ello resulta posible emplear únicamente dos polos.

Una de las claves es la velocidad de giro del rotor, que en nuestro caso coincide con la velocidad de giro de la unidad motriz. Pero ¿qué elemento realmente determina esta velocidad de giro? ¿Resulta más importante que la unidad motriz actúe en su punto de trabajo o que el rotor de la unidad generadora gire a la velocidad especificada por cálculo? Pues la respuesta es bastante sencilla ya que ambos elementos pueden trabajar en base a una optimización común en un régimen de giro determinado.

Observando nuevamente la ficha podemos ver que la unidad motriz está preparada para trabajar de forma óptima en 3000 rpm, por lo contrario, en lo referente a la unidad generadora no se especifica ninguna velocidad de giro. No por ello deja de ser posible conocer el régimen de giro óptimo, el cual coincide en este caso con la velocidad de sincronismo por ser una unidad síncrona en la que el deslizamiento es nulo (velocidad de giro relativa entre el rotor y el campo magnético).

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

Siendo  $f$  la frecuencia de la corriente,  $n_s$  la velocidad de sincronismo y  $p$  el número de polos. En nuestro caso los datos necesarios pueden extraerse de la ficha técnica, siendo la frecuencia de 50 Hz y el número de polos 2.

$$n_s = \frac{120 \cdot 50}{2} = 3000 \text{ rpm}$$

Como vemos la velocidad de sincronismo coincide exactamente con la del cigüeñal y por tanto con la del rotor por ir éste conectado directamente, con una relación de transmisión unitaria ( $i=1$ ). Trabajando así ambas unidades en su régimen de giro óptimo. La regulación y estabilización del voltaje de salida se realiza mediante el uso de un sistema AVR o Automatic Voltage Regulator, el cual actúa de manera independiente en base a unos parámetros previamente establecidos.



### 4.3.4 PANEL DE CONTROL

El panel de control cuenta con todos los indicadores necesarios para una correcta gestión de la unidad, desde controles activos a indicadores pasivos, capaces de aportar información de manera ininterrumpida durante el funcionamiento.

El panel cuenta con los elementos más esenciales como voltímetro, amperímetro, frecuenciómetro y protecciones ante corrientes parásitas o sobretensiones. Por otro lado, estos equipos al trabajar en regímenes de giro muy determinados miden sus mantenimientos por horas de uso, lo cual es habitual en cilindros por debajo de los 500 cm<sup>3</sup>. Para medir esas horas existe un horómetro.

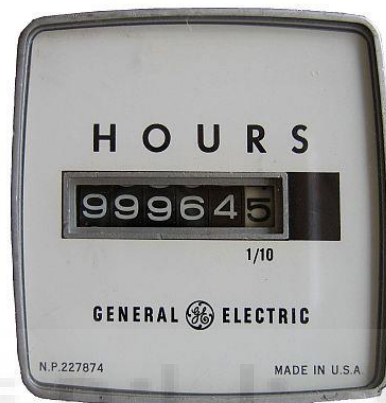


Ilustración 12: Horómetro genérico

El horómetro es el equivalente a un cuentakilómetros en un automóvil, con la principal diferencia que en los motores empleados en automoción debido a las distintas relaciones de transmisión y las condiciones que pueden darse al circular, los requerimientos y por tanto la velocidad de giro son muy variables, siendo por tanto los kilómetros una información relativamente pobre. En nuestro caso en particular las horas son un indicador más que fiable para llevar una buena gestión de los mantenimientos.



Ilustración 13: Detalle panel de control de la unidad

## 4.4 IMÁGENES DEL EQUIPO



*Ilustración 14: Vista frontal general de la unidad*



*Ilustración 15: Vista lateral general de la unidad*



*Ilustración 16: Unidad generadora KDE 12 STA*

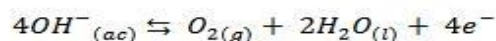


## **5 CONCEPTOS CLAVE**

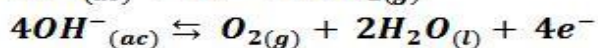
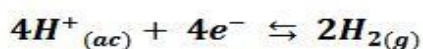
## 5.1 ELECTRÓLISIS

### 5.1.1 DEFINICIÓN

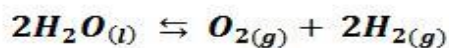
La electrólisis es un proceso químico, mediante el cual se dividen las moléculas de agua en los átomos que las componen. A nivel conceptual se trata de una reacción inversa a la combustión u oxidación de hidrógeno, siendo esta una reacción reversible bajo aporte energético, por norma general el aporte proviene de fuentes eléctricas.



**Ecuación de la celda electrolítica**



+



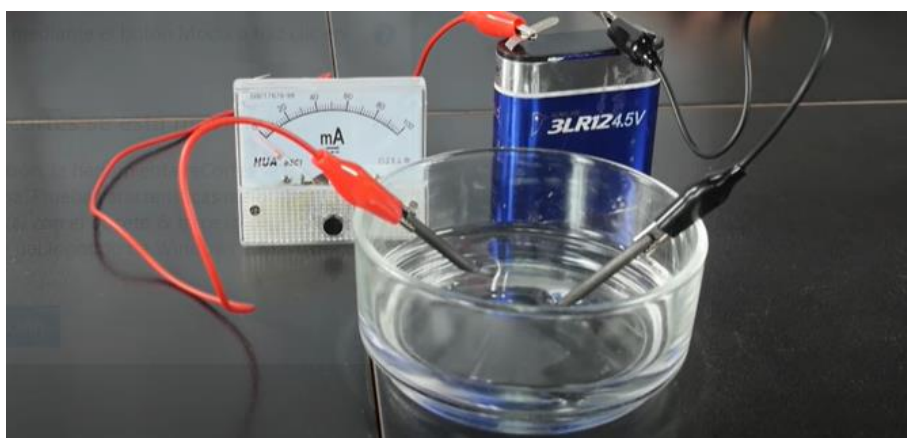
*Ilustración 17: Reacción en celda electrolítica*

### 5.1.2 CLAVES

#### 5.1.2.1 CONDUCTIVIDAD

Para la realización del proceso de electrólisis resulta clave generar una corriente eléctrica a través del agua para romper sus enlaces, dividiendo así las moléculas en sus átomos base.

El agua por sí sola no resulta ser una buena conductora de la electricidad, es por ello por lo cual resulta imprescindible añadirle algún elemento que mejore la conductividad de esta, permitiendo así que los electrodos sumergidos, ya sean estos independientes o con placas de interconexión, puedan generar una corriente eléctrica.



*Ilustración 18: Electrodo sumergido en agua destilada pura*



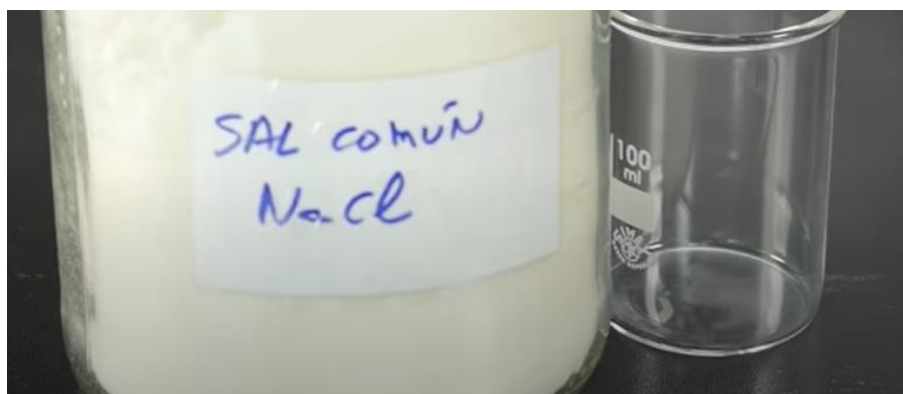


Ilustración 19: Ejemplo adición de sal común

Para demostrar lo anteriormente expuesto se añade NaCl al agua, por ser este un producto fácil de disolver y de conseguir, siendo este el precursor de la conducción eléctrica en este ejemplo.

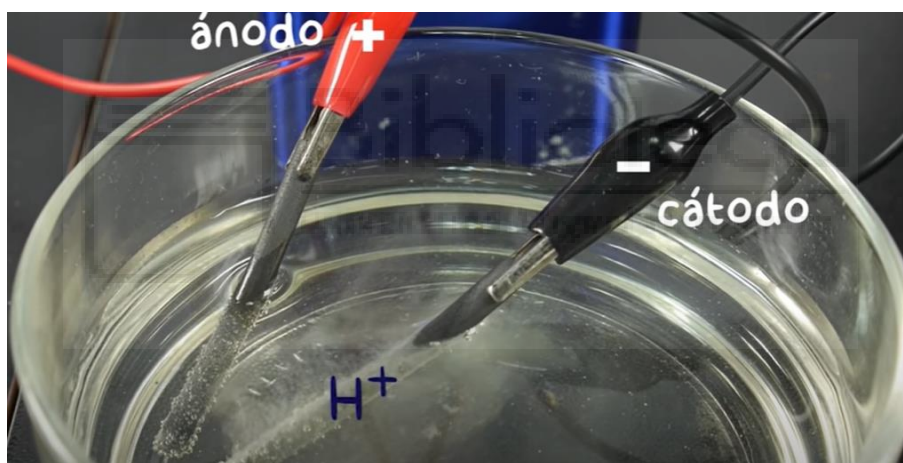


Ilustración 20: Electrodo sumergidos tras adición

Tras disolverse en el agua podemos ver que esta ahora sí logra conducir la electricidad generando un burbujeo y una especie de vapor, este vapor no resulta ser vapor de agua, sino que se expulsa hidrógeno y oxígeno en fase gas. A las intensidades y corrientes de trabajo no suele generarse un aumento de temperatura suficiente como para generar vapor de agua, podría darse el caso si se trabaja con intensidades excesivas.

A la hora de realizar la electrólisis no se empleará agua corriente ni sal común, ya que estos elementos presentan impurezas que impedirían un correcto funcionamiento a medio o largo plazo del equipo, empeorando su productividad y generando residuos u oxidación en el tanque o los elementos constructivos de la celda electrolítica como los que se muestran en la siguiente ilustración.



Ilustración 21: Celda electrolítica funcionando con agua corriente

## 5.1.3 RIESGOS

### 5.1.3.1 ACUMULACIÓN LOCALIZADA DE HIDRÓGENO

#### 5.1.3.1.1 PROBLEMÁTICA

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, esta tabla ordena sus elementos en base al número atómico. El número atómico hace referencia al número de protones que presenta un átomo de un elemento, el hidrógeno es el elemento con átomos más simples presentando únicamente un protón y un electrón. A causa de esta simplicidad sus átomos son los más ligeros y diminutos existentes, con un diámetro de  $2 \cdot 10^{-7}$  mm.

Como se comentó en los antecedentes generales del proyecto para que un fuego se dé se requieren tres elementos: combustible, comburente y un precursor o energía de activación. El comburente juega un papel clave ya que el combustible suele aportarse en cantidades conocidas, pero el oxígeno o comburente no siempre se aporta en cantidades tan definidas, siendo su presencia tan o más importante como la de combustible.



Ilustración 22: Ejemplo presencia oxígeno en un fuego

Como puede apreciarse en la anterior ilustración un combustible con elevado poder calorífico se mantiene parcialmente encendido, el fuego solo logra propagarse en las zonas en las que el oxígeno logra entrar en contacto con el combustible. En la zona superior existe una presencia combinada de vapores de combustible y oxígeno, en esta región las partículas gaseosas se encuentran dispersas permitiendo que el oxígeno las rodee logrando así unas condiciones óptimas para la propagación y el mantenimiento de la llama. Esta nunca logrará penetrar hacia el interior del combustible ya que la densidad

de este es superior a la del oxígeno, manteniendo por tanto al oxígeno en el exterior del recipiente.

Explicado esto podemos extraer ciertas conclusiones. El fuego necesita una presencia mínima de oxígeno por unidad de combustible para poder generarse y/o propagarse, el área de contacto combustible-comburente resulta clave para poder generar la oxidación acelerada o combustión. Por tanto, si analizamos estos factores podemos intuir que el hidrógeno al ser un elemento que a temperatura ambiente se encuentra en fase gaseosa y presenta un tamaño atómico muy reducido resulta ser un elemento muy vulnerable ante el fuego, generando una expansión violenta, en ocasiones conocida como explosión al darse las condiciones de ignición y propagación adecuadas.

Una buena referencia para resumir todo lo anterior es el poder calorífico, siendo este el poder energético que es capaz de desprender una unidad de masa o volumen de una sustancia, elemento o compuesto al oxidarse violentamente. A continuación, se muestra una tabla comparativa de los poderes caloríficos de algunos de los combustibles más comunes:

Tabla 1. Poder Calorífico de Combustibles.

Combustible	KJ/g	Kcal/g
Hidrógeno	141,9	33,9
Gasolina	47	11,3
Diésel	45	10,7
Etanol	29,7	7,1
Propano	49,9	11,9
Butano	49,2	11,8
Madera	15	3,6
Carbón Lignito	15	4,4
Carbón	27	7,8
Gas Natural	54	13

Fuente. [9]

Ilustración 23: Tabla comparativa poderes caloríficos

Como puede apreciarse el hidrógeno presenta unos índices energéticos muy superiores a los del resto de combustibles, pudiendo hacer de su almacenaje algo muy peligroso.

#### 5.1.3.1.2 PRECAUCIONES

El hidrógeno se genera en la celda electrolítica, normalmente son celdas húmedas en las que los equipos quedan sumergidos y a su vez encerrados en un recipiente.

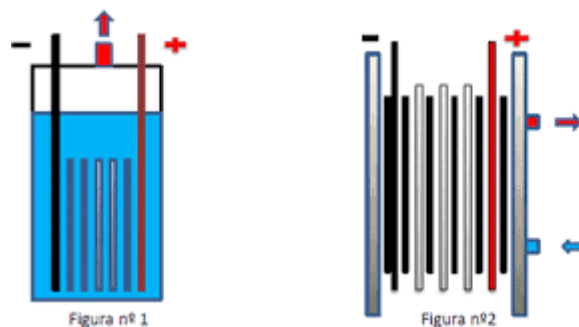


Ilustración 24: Celda de hidrógeno sumergida



Como puede apreciarse en la ilustración el equipo se sumerge quedando una cámara de gas por encima del agua destilada, esta cámara no puede ser excesivamente voluminosa ya que si un arco eléctrico se produjese o alguna energía se aportase de uno u otro modo resultaría altamente peligroso. La solución más común es reducir esta cámara a la mínima expresión extrayendo el hidrógeno generado mediante un macarrón, el cual irá conectado a una cámara antirretorno húmeda, esta última se explicará con más detalle en el punto 5.1.3.2, dedicado al retorno de llama.

### 5.1.3.2 RETORNO DE LLAMA

#### 5.1.3.2.1 PROBLEMÁTICA

Como se ha comentado con anterioridad el hidrógeno es un combustible con elevado poder calorífico, esto ha llevado a descubrir infinidad de aplicaciones para el mismo. Una de las aplicaciones más habituales de los equipos básicos es emplear el hidrógeno como combustible en un soplete, con la finalidad de usarlo para cortar o soldar elementos.



Ilustración 25: Soplete de HHO con celda de 33 placas

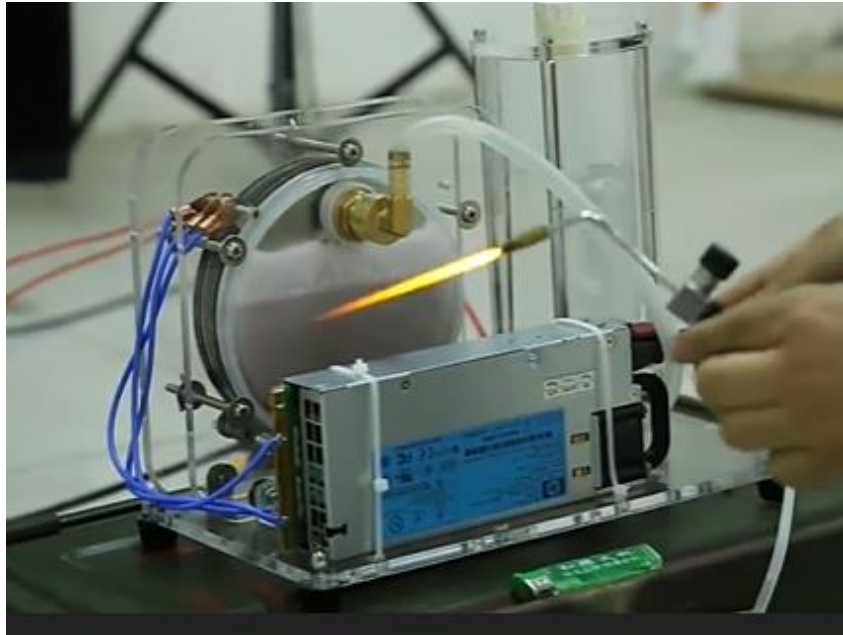
La problemática de estos equipos reside en que el gas que sale por el soplete es una mezcla de hidrógeno y oxígeno, por ello no resulta descabellado pensar en que la llama podría avanzar en contra del flujo siempre y cuando las condiciones interiores propicien una velocidad de avance del frente de llama superior a la velocidad del flujo de salida.

Resulta clave entender la relación entre los riesgos de “retorno de llama” y “acumulación localizada de hidrógeno”. Como se ha comentado en el apartado 5.1.3.2 dedicado a la acumulación localizada de hidrógeno resulta peligroso cualquier aporte energético que logre alcanzar la cámara de acumulación de hidrógeno, un claro ejemplo sería el retorno de llama, mediante el cual la llama lograría avanzar en contra corriente hasta dicha cámara provocando la explosión de la mezcla de gases presentes.

#### 5.1.3.2.2 PRECAUCIONES

Para evitar que el retorno de llama se produzca se suelen emplear cámaras intermedias, en estas se acumula una pequeña parte del hidrógeno fluctuante, para que en caso de que

la llama logre retornar solo logre explotar dicha cantidad perdiendo su inercia de avance y cortando el retroceso.



*Ilustración 26: Celda de hidrógeno con sistema antirretorno*

En la parte derecha de la *Ilustración 25* se muestra una especie de depósito, este se emplea como sistema antirretorno en dicha instalación.



*Ilustración 27: Tanque acumulador antirretorno*

En la *Ilustración 26* se muestra únicamente un tanque acumulador, pudiendo así explicar en base a dicha imagen su funcionamiento. Como se observa el tanque cuenta con dos racores macho (tomos metálicas de la parte derecha) y con un tapón de llenado en la parte superior.

Lo que se pretende con este tanque es que el hidrógeno y oxígeno generados en forma de gas al dividir la molécula de agua deba atravesar un volumen de agua antes de depositarse, para esto el tanque cuenta con dos racores a diversas alturas.

El racor inferior es el que se emplea como entrada, este se encuentra sumergido en agua por ello resulta clave que el manguito allí conectado tome el gas desde un punto más alto que la lámina libre de agua (nivel del agua en el tanque), evitando así que el agua tienda a fugar por dicho manguito. Por otro lado, el racor superior o de salida es el que se conectará directamente al consumo final de gas, ya sea este para alimentar un motor, un soplete de combustión directa u otros elementos. Este segundo puede estar sumergido o no estarlo, dejando el consumo final conectado directamente con la zona seca del tanque. Si nos encontramos con un tanque bastante lleno con ambos racores sumergidos, resultará nuevamente imprescindible que el consumo final se realice a una cota superior a la del racor de salida, evitando nuevamente una posible fuga de agua.

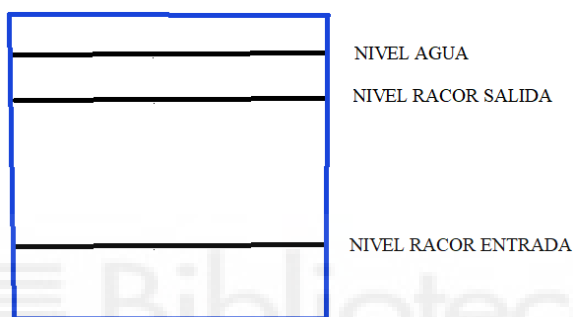


Ilustración 28: Cotas de instalación de un tanque antirretorno con racores sumergidos

Podemos concluir que sea cual sea la disposición del racor superior la función final es la misma, en ambos casos se pretende minimizar o evitar las posibles consecuencias de un retorno de llama. Si el racor está sumergido el retorno se frenará rápidamente, si por el contrario el racor no está sumergido el retorno de llama alcanzará la pequeña cámara de gas generada sobre la lámina de agua, generando una explosión controlada sin riesgo alguno. En nuestra instalación no procede ya que no se emplea llama directa.

### 5.1.3.3 GENERACIÓN DE ARCOS ELÉCTRICOS

#### 5.1.3.3.1 PROBLEMÁTICA

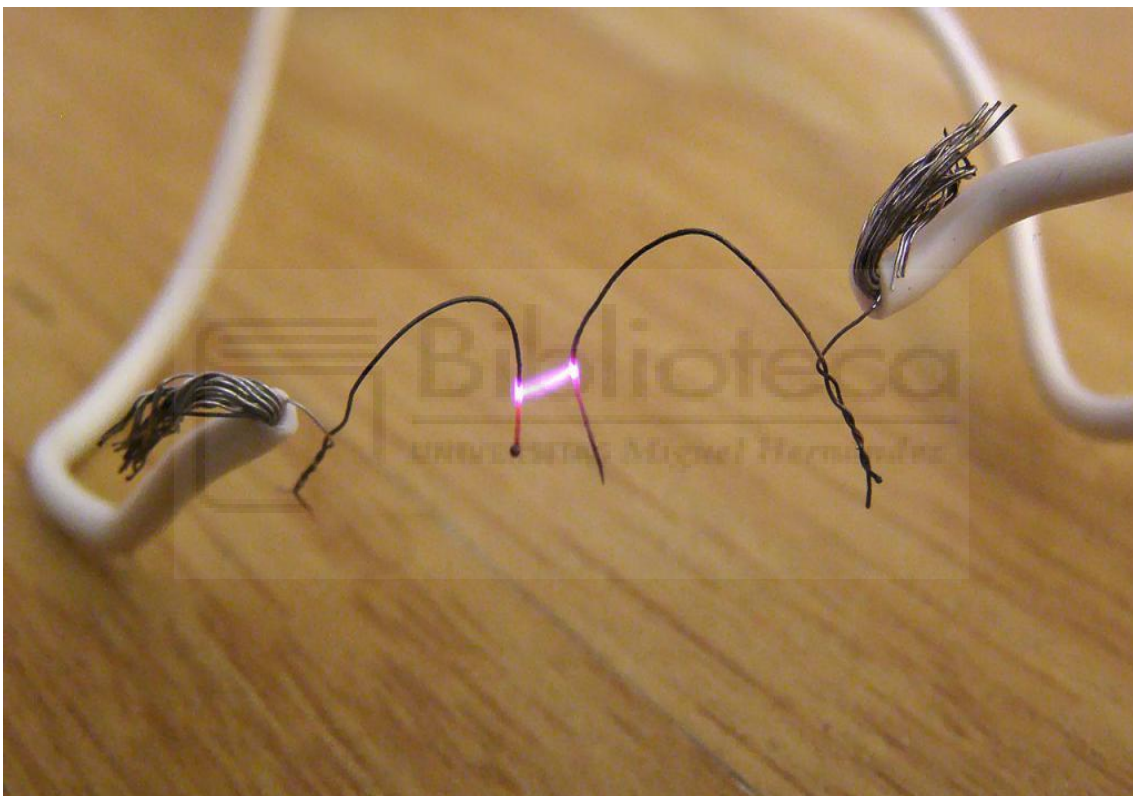
Como ya conocemos el agua presenta dificultades para conducir la electricidad, es por esto por lo que se le añaden sustancias o elementos que fomentan su conducción eléctrica. Las cantidades de estos aditivos resulta clave ya que si no se alcanzan unos niveles adecuados la resistencia eléctrica será elevada y la corriente tenderá a buscar caminos alternativos para cerrar el circuito, pudiendo comunicar los dos polos mediante un arco eléctrico.

La generación de arcos eléctricos es uno de los principales riesgos en las celdas de hidrógeno, ya que un arco temporal será suficiente para oxidar súbitamente todo el hidrógeno presente en la cámara generando una potente reacción capaz de colapsar el recipiente contenedor si este no está preparado. Uno de los errores más comunes a la hora de fabricar celdas de hidrógeno a pequeña escala es usar recipientes de vidrio, estos son

muy peligrosos ya que si no resistieran la explosión lanzarían fragmentos afilados en todas direcciones.

#### 5.1.3.3.2 PRECAUCIONES

Para evitar la formación de arcos eléctricos se recomienda emplear fundas aislantes retráctiles en los tramos de cable más propensos a formar arcos eléctricos. Los tramos más importantes son los de empalmes o uniones de cables desnudos, sobre todo si estos no se encuentran sumergidos ya que en estos puntos podría ionizarse el gas acumulado facilitando aún más la formación de arcos eléctricos. A ser posible, lo mejor sería asegurarse que todo el cable está correctamente aislado, reduciendo a la mínima expresión los riesgos de formación de arcos eléctricos.



*Ilustración 29: Ejemplo arco eléctrico*

En la anterior ilustración se muestra un arco eléctrico, como podemos observar la corriente viaja por el aire ante la imposibilidad de encontrar otro camino de paso de menor resistencia.

En ocasiones cuando se quieren realizar conexiones experimentales en cables unipolares rígidos, se extrae un único alambre y es el que se conecta actuando este como una especie de fusible, el cual se fundirá e interrumpirá el paso de corriente ante una subida de corriente. De lo contrario podrían fundirse elementos del circuito de mayor relevancia.

## 5.2 AUTOENCENDIDO

### 5.2.1 PROBLEMÁTICA

El autoencendido se produce cuando la temperatura en algún punto de la cámara de combustión supera la temperatura de ignición de la mezcla de gases a combustionar, provocando un encendido repentino del combustible en un punto que quizás no sea el deseado.

### 5.2.2 PRECAUCIONES

Resulta imprescindible controlar la temperatura de la cámara de combustión, para ello existe la posibilidad de controlar la temperatura del bloque y establecer una relación de esta con la de la cámara, por ser la de la cámara interna difícil de cuantificar.

Este proceso resulta clave en cualquier motor, por ser un indicador directo de buen funcionamiento. En la actualidad, casi todos los vehículos cuentan con reloj de temperatura ya sea este analógico o digital. Al experimentar con nuevos combustibles y/o aditivos resulta fundamental contar con un indicador de esta tipología.

## 5.3 PICADO DE BIELA

### 5.3.1 PROBLEMÁTICA

Los motores de combustión se estudian y diseñan para trabajar en base a unos ciclos y tiempos definidos, estos pueden variar con la tipología del motor y a su vez con el régimen de giro del mismo.

En este caso nos centraremos en motores de cuatro tiempos de encendido por compresión, para estos motores las etapas o tiempos del ciclo son los siguientes:

1. Admisión: Se aspira el máximo aire posible.
2. Compresión: Se comprime el aire hasta que alcanza las condiciones esperadas y se inyecta el combustible en una secuencia de pulsos definida.
3. Expansión: El pistón baja aprovechando el poder calorífico que emite el combustible al oxidarse.
4. Escape: El pistón vuelve a subir expulsando los gases de desecho de la combustión. El conocido como proceso de renovación de la carga mejora cuantos más gases de escape seamos capaces de expulsar, permitiendo así la entrada de más aire fresco en la fase de expansión. Este proceso presenta una relación directa con el rendimiento del motor.

Todos estos tiempos se pueden resumir en lo mostrado a continuación:



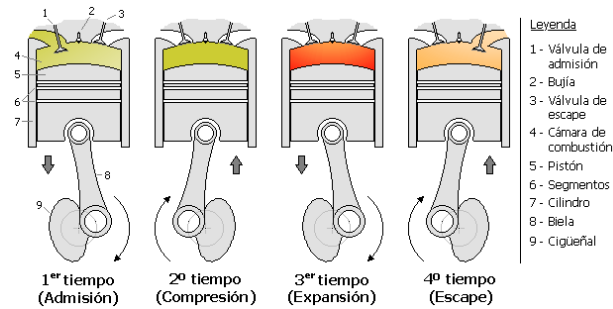


Ilustración 30: Esquema resumen tiempos de un motor de 4T

El motor de encendido por compresión carece de sistema de encendido provocado por lo que el tiempo de detonación viene determinado únicamente por la inyección del combustible. Si algo resulta clave tanto en los motores MEC (motores de encendido por compresión) como en los MEP (motores de encendido provocado) es que el encendido empiece a darse algo antes del punto muerto superior, siendo este punto el punto en el que el pistón cambia de sentido en la parte alta llegando a estar parado en un espacio muy breve de tiempo.



Ilustración 31: Punto muerto superior e inferior

Con esto conseguiremos que la máxima energía se desprenda en el punto deseado, el cual se da un poco después del punto superior, generando un aprovechamiento máximo y logrando así un impulso descendente y lo más libre posible de inercias laterales, generando así un empuje óptimo sobre los elementos mecánicos. La secuencia mecánica de empuje dentro de un motor resulta ser: pistón, biela y por último cigüeñal, este último logra transformar el movimiento lineal en rotativo mediante uniones excéntricas con las bielas denominadas como codos o muñequillas.

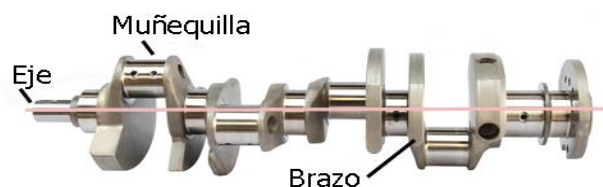


Ilustración 32: Partes cigüeñal

Si el combustible en un MEC o la chispa en un MEP se aporta de manera demasiado anticipada puede que la máxima energía se de en contraposición al movimiento de avance del motor. Esta contraposición la sufrirá en primera instancia el pistón, el cual al ser un elemento compacto y preparado no sufrirá tanto, pero los puntos de unión entre elementos móviles resultarán críticos.

El punto más crítico es el alojamiento del bulón, este elemento denominado bulón es el encargado de articular y resistir la transmisión de energía entre el pistón y la biela.



*Ilustración 33: Montaje pistón, biela y bulón*

Este elemento al requerir una rotación relativa presenta una determinada holgura, esta pequeña holgura no resulta problemática en el avance normal del pistón, pero si se produce una detonación temprana la presión generada sobre el pistón no se convertirá en movimiento, sino que generará un impacto entre la biela y el pistón por tratar de moverse en sentidos opuestos. El alojamiento del bulón suele estar reforzado tanto en el pistón como en la biela pudiendo así soportar estos esfuerzos inesperados en la mayoría de casos, pero la biela puede sufrir daños en otras zonas.



*Ilustración 34: Biela doblada*

### 5.3.2 PRECAUCIONES

Hoy en día todos los coches presentan sensores de picado de biela para tratar de detectar y frenar lo antes posible este fenómeno en caso de producirse, como se comentó en el punto 4.3.1 dedicado a la unidad motriz los motores de combustión adelantan su encendido o su inyección a medida que el régimen de giro aumenta, pero un adelanto descontrolado o desproporcionado provocaría el indeseado fenómeno del picado de biela. Es probable que si se da este escenario estemos ante un motor fuera de punto ya sea por un problema de regulación electrónica o por la necesidad de realizar ajustes mecánicos como el reglaje de válvulas entre otros.

Por otro lado, ha de contemplarse el caso de que el picado de biela se dé por lo expuesto en el anterior punto, dedicado al autoencendido, por tanto, nuevamente las precauciones explicadas en dicho punto resultarán aplicables a este.

Por último, han de cuidarse los mantenimientos especialmente de los elementos vitales como la correa o cadena de distribución, revisando su estado periódicamente.

## 5.4 DOSADO

### 5.4.1 DEFINICIÓN

El concepto dosado hace referencia a la proporción aire-combustible, este mide la relación de masas de aire y combustible que se inyecta de forma global en la cámara de combustión.

### 5.4.2 PRECEDENTES HISTÓRICOS

La mezcla de combustible y aire en los motores se ha realizado durante años mediante el uso de un elemento conocido como carburador.



Ilustración 35: Carburador 34mm

Este elemento presenta un funcionamiento relativamente sencillo. El carburador consta de una boca de entrada la cual se conecta al filtro de aire y otra boca salida conectada con la tobera, esta tobera llega al motor pasando por la caja de láminas. Por la boca de entrada se aspira únicamente aire y por la de salida sale el aire o comburente con el combustible pulverizado. Para explicar más profundamente su funcionamiento resulta imprescindible conocer la estructura de este elemento y algunas de sus características principales.

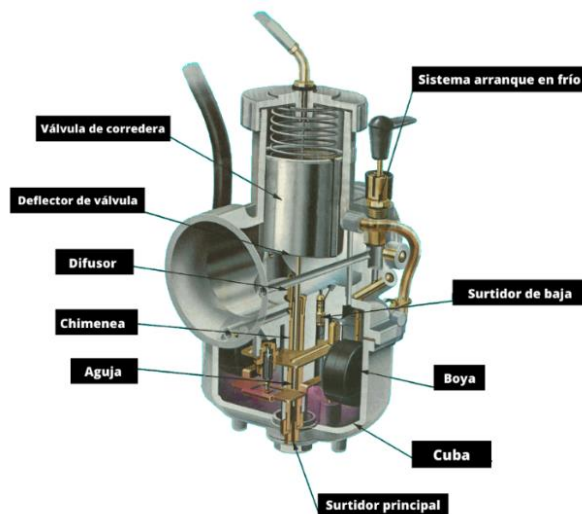


Ilustración 36: Partes de un carburador



En la ilustración 35 se muestran esquemáticamente todos y cada uno de los elementos presentes en un carburador. El combustible se aporta desde el depósito mediante el manguito de color negro que se aprecia en la parte superior, hasta que este alcanza la cuba, esta se va llenando progresivamente hasta que la boya por flotación alcanza el nivel límite y cierra la entrada de combustible al carburador. En este transcurso entre el depósito y el carburador pueden encontrarse dos tipos de elemento, un elemento manual conocido como grifo o pase de gasolina o un elemento de actuación indirecta o de membrana, estos aseguran que si en parado la boya no logra cerrar correctamente la entrada de combustible no se libere este por el conducto de excedente o sobrante.

Ya almacenado el combustible en la cuba y con el motor encendido se genera una aspiración o depresión, parte de esta acciona la membrana del conducto de gasolina en caso de existir esta y toda la depresión restante fuerza la toma de aire exterior por la boca de entrada del carburador. El aire al acceder localiza dos posibles vías de paso una permanentemente abierta que une la boca de entrada y salida pasando por el chiclé de bajas o la apertura circular cerrada parcialmente por la guillotina.

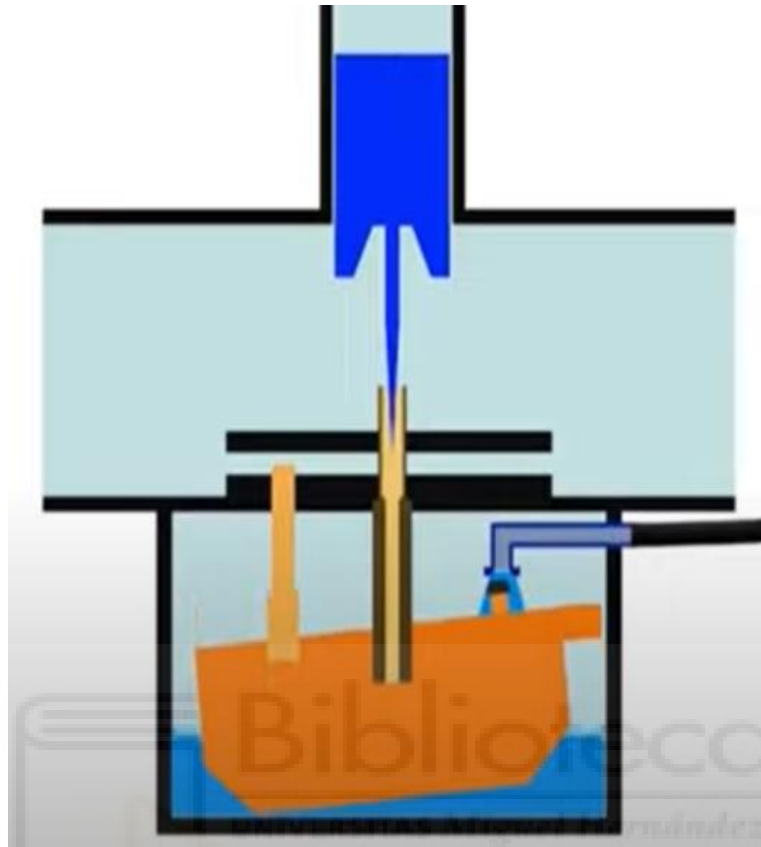


*Ilustración 37: Boca de entrada carburador*

Como se puede observar en la imagen existen tres orificios permanentes, por tratarse de un carburador de altas prestaciones, pero con uno a nivel conceptual el funcionamiento sería el mismo. Si fijamos nuestra atención en la parte central se observa una especie de guillotina, la cual asciende al acelerar mediante el cable del acelerador, como se observa en la imagen nuestro carburador esta desmontado pero presenta aun así parcialmente abierta la guillotina, esta apertura resulta vital ya que sin esta el motor no podría tomar el aire necesario para que se produzca la combustión en todo momento, esta apertura se regula mediante el tornillo del ralentí el cual suele presionar un muelle para evitar que se desafloje a causa de la vibración.

Los carburadores como se ha comentado anteriormente presentan un chiclé de bajas, pero este no es capaz de suministrar el combustible necesario en todo momento, por ello existe un chiclé de altas. El cable del acelerador no únicamente eleva la guillotina, sino que a su

vez levanta una aguja metálica de diámetro variable de modo que a más porcentaje de acelerador mayor área de paso se libera en el chicle de altas como se muestra en la siguiente ilustración:



*Ilustración 38: Aguja y guillotina del carburador*

Al acelerar en gran medida nos encontraríamos el escenario de la ilustración 37 en el cual el paso de aire es casi total, y este al pasar aspirado por la depresión generada arrastra consigo al combustible aspirado de la cuba por medio del chicle de altas. La aguja mencionada antes consta normalmente de tres posiciones de ajuste mecánico, para modificar este elemento en altura resulta imprescindible desmontar parcialmente el carburador, extrayendo la guillotina y el sistema de sujeción del cable del acelerador con su tensor roscado. Soltando el cable lograremos acceder a la aguja pudiendo recolocar su anillo de regulación.

Por último, resulta importante conocer que aparte del tornillo del ralentí existe un tornillo de regulación del dosado, este permite ajustarlo levemente, pudiendo así adaptar el vehículo a distintas temperaturas u otras condiciones ambientales. Si se requieren ajustes de mayor importancia habrán de sustituirse los chicles ya sea por unos de menor tamaño de perforación si el vehículo presenta una mezcla muy rica o por unos de mayor tamaño si se diagnostica una falta de combustible y tenemos un dosado más pobre de lo debido. Este proceso es conocido como carburación y resultaba ser clave para todo vehículo dotado de carburador.

En la actualidad las unidades empleadas son electrónicas y permiten realizar ajustes sobre muchos parámetros sin necesidad de sustituir, modificar o actuar sobre elementos mecánicos.

## 5.4.3 CLAVES

### 5.4.3.1 VARIABILIDAD

El dosado no es fijo en todo momento, sino que este puede autorregularse en base a unos caminos de actuación definidos en la centralita del vehículo. Lo que se suele pretender es buscar la mayor eficiencia, concretamente en los motores de encendido provocado esta se logra al ajustar el dosado al estequiométrico, este se da al aportar 1 gramo de combustible por cada 14,7 gramos de aire. Por otro lado, en los motores de encendido por compresión el dosado es extremadamente pobre, en estos motores se aportan grandes cantidades de aire con bajos niveles de combustible.

En unidades de generación básicas suelen optimizarse los dosados para ciertos rangos de giro, sin necesidad de emplear equipos de medición externos ya que estos aumentarían los costes de fabricación. Estos dosados no tienen por qué ser variables y en caso de serlos se tendrían en cuenta únicamente parámetros básicos como por ejemplo la temperatura ambiente, la potencia extraída en función del consumo u otros parámetros, pero a diferencia de lo que sucede en los vehículos todo está mucho más definido ya que no se pretende variar el de giro constantemente.

### 5.4.3.2 ELEMENTOS DE MEDIDA

En automóviles, el principal elemento en este proceso es la sonda lambda, esta se ubica en la línea de escape antes del catalizador de los vehículos y mide la concentración de oxígeno que los gases de escape presentan. Resulta imprescindible que la sonda lambda alcance 340 grados centígrados para trabajar de manera correcta.

En ocasiones se emplean dos sondas lambda por catalizador, pudiendo así medir los niveles de oxígeno antes y después de este elemento, logrando extraer mucha más información sobre los gases de escape y a su vez asegurándonos de que el catalizador actúa correctamente.

La sonda lambda actúa como un pequeño generador eléctrico optimizado para funcionar a 340 grados centígrados, esta especie de generador tiene un voltaje de salida de referencia ligado a los niveles de oxígeno óptimos, si este elemento comienza a variar el voltaje de salida la centralita sabrá interpretar dichos incrementos o decrementos de tensión actuando en consecuencia mediante órdenes directas al sistema de inyección. En la actualidad el combustible se aporta mediante sistemas de inyección electrónica lo cual permite modificar con facilidad y precisión todos los parámetros ligados a la inyección del combustible, ya sea presión, pulsos y/o cantidades aportadas.



*Ilustración 39: Sonda lambda*



Ilustración 40: Sistema catalizador con doble sonda lambda

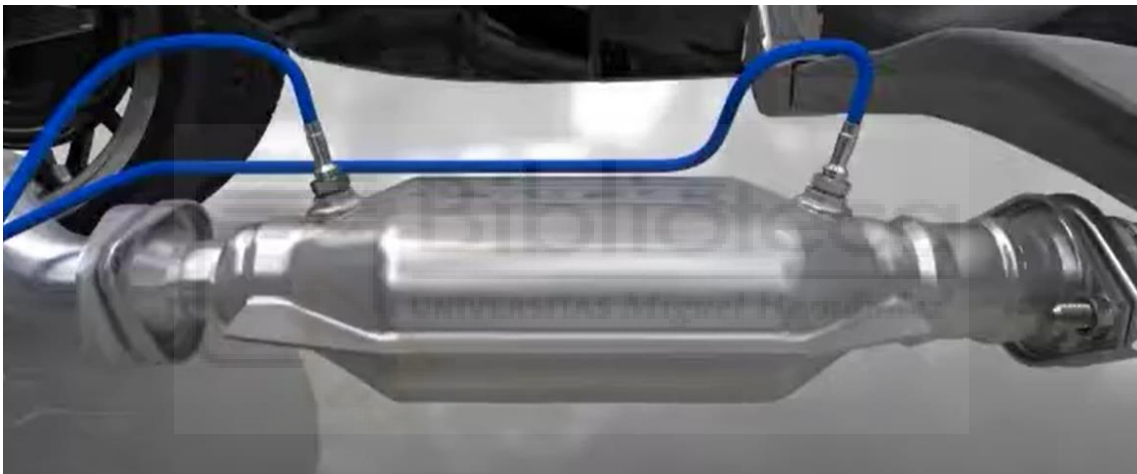


Ilustración 41: Vista lateral sistema de doble sonda lambda

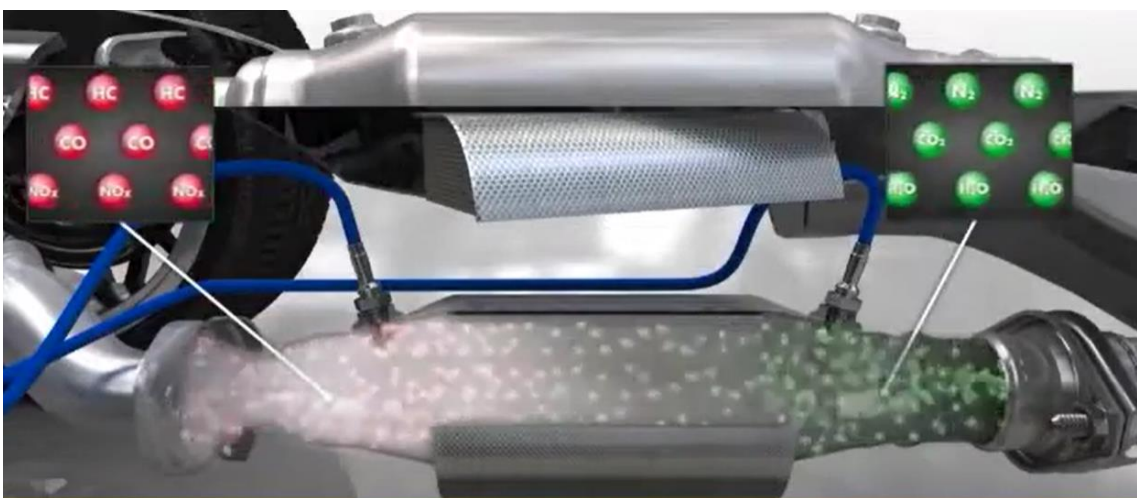


Ilustración 42: Funcionamiento del catalizador en un MEP



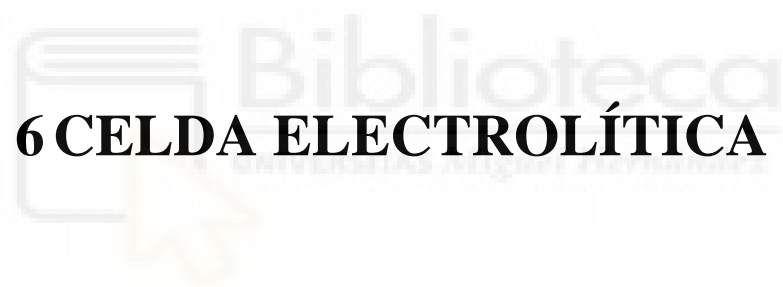
### 5.4.4 RIESGOS

Cuando la sonda lambda falla generando un mal dosado el vehículo puede presentar alguno de los siguientes síntomas: Pérdidas de potencia en ciertos rangos del régimen de giro, aumento del consumo por no generar una lectura correcta de los niveles de oxígeno y por tanto no poder regular correctamente el dosado y por último ralentí inestable, por generar lecturas erróneas con valores muy variables incluso funcionando en vacío o al ralentí.

Un funcionamiento incorrecto de este sistema a largo plazo podría generar daños mayores, como la generación de carbonilla u otros residuos en torno a sistemas mecánicos móviles y/o fallos en los sistemas electrónicos del vehículo. Los coches actuales presentan protecciones ante estos fenómenos sobre todo si estos cuentan con dos sondas lambda instaladas en serie, logrando detectar rápidamente cualquier defecto y mostrando fallo motor en el cuadro.



*Ilustración 43: Acumulación de carbonilla en catalizador*



## **6 CELDA ELECTROLÍTICA**

## 6.1 LÓGICA DE FUNCIONAMIENTO

En el punto 5.1 se habló de forma muy breve sobre la electrólisis, a continuación, se procede a detallar y concretar lo introducido en dicho punto de una forma más clara y aplicada al tema central del traba final de grado.

Para la extracción de hidrogeno a partir de agua resulta clave lograr dividir la molécula en sus átomos base, como bien sabemos la molécula de agua presenta la siguiente estructura:

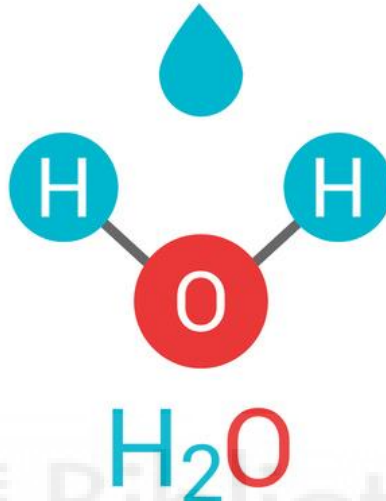


Ilustración 44: Molécula de agua

Los enlaces entre los hidrógenos y el oxígeno central son enlaces de elevada resistencia, de naturaleza covalente polar, es decir comparten electrones de forma desigual. Estos enlaces no son los únicos que aparecen en un volumen determinado de agua, sino que existen a su vez una especie de relaciones entre moléculas, estas relaciones son conocidas como fuerzas intermoleculares. Las fuerzas intermoleculares en este caso se dan a causa de la formación de puentes de hidrógeno, que vienen a ser un caso extremo de las conocidas interacciones dipolo-dipolo, en el que el electrón de cada hidrógeno se desplaza hacia el oxígeno paralizándose negativamente, mientras que el lado del hidrógeno quedará cargado positivamente.

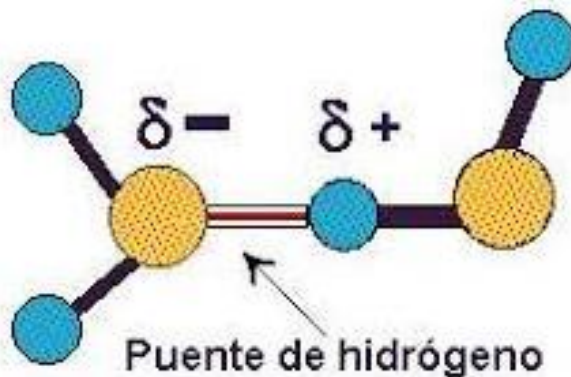


Ilustración 45: Puente de hidrógeno

Como se observa en la ilustración el oxígeno queda doblemente cargado por la aportación electronegativa de cada hidrógeno, por ello tiende a relacionarse con los hidrógenos de otras moléculas que al ubicar sus electrones del lado del oxígeno constan de una zona de carga electropositiva.

Esta interacción se produce indefinidamente por todo el volumen de agua pudiendo generarse una especie de red como se muestra en la siguiente ilustración.

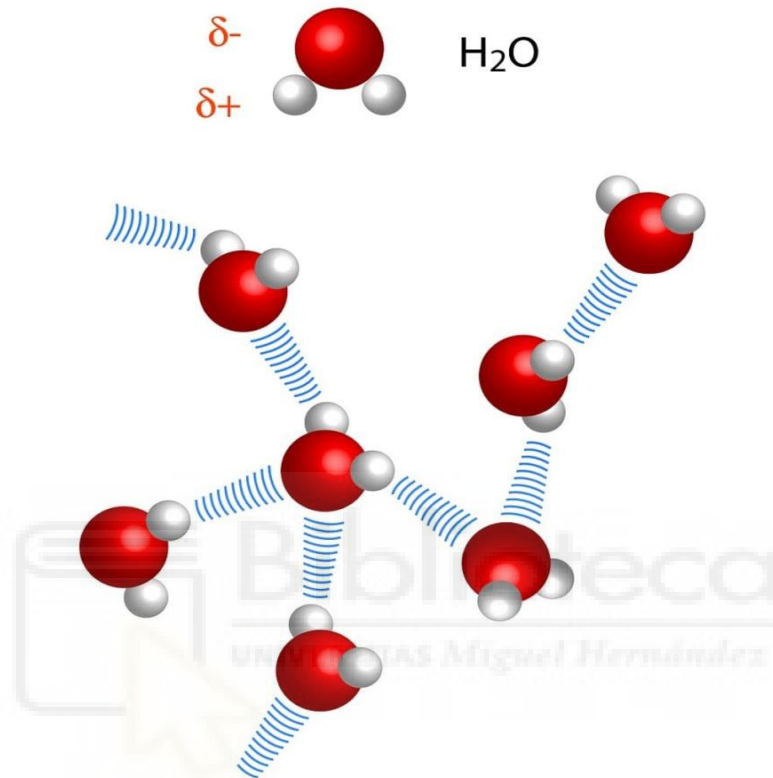


Ilustración 46: Puentes de hidrógeno en agua

Conocidos estos fenómenos ya podemos comenzar a hablar de lo que realmente sucede en una celda de hidrógeno. En una celda lo que se pretende es generar una electrolisis a gran escala, la electrolisis lo que pretende es atraer a los átomos negativamente al cátodo (polaridad positiva) y los cargados positivamente al ánodo (polaridad negativa), logrando generar una doble atracción capaz de destruir los enlaces existentes.

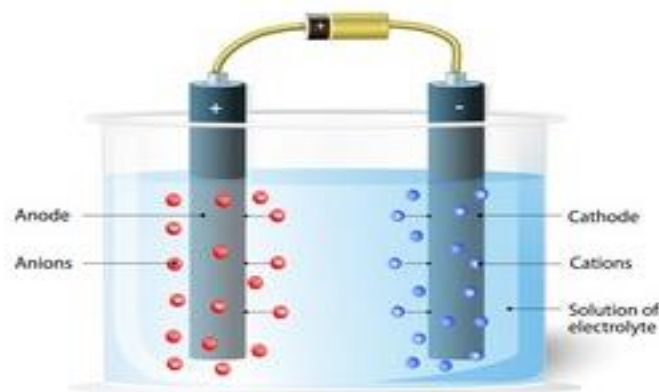


Ilustración 47: Electrólisis convencional



El problema de la electrolisis convencional es que suele emplear únicamente un ánodo y un cátodo. La molécula de agua presenta tres átomos cargados con los cuales nos interesa interactuar, por ello en la celda de hidrógeno se emplean dos ánodos (polaridad negativa) encargados de atraer a los hidrógenos cargados positivamente y un cátodo (polaridad positiva) central que se encarga de atraer al oxígeno que presenta carga negativa, rompiendo de este modo los enlaces covalentes y las posibles interacciones intermoleculares.

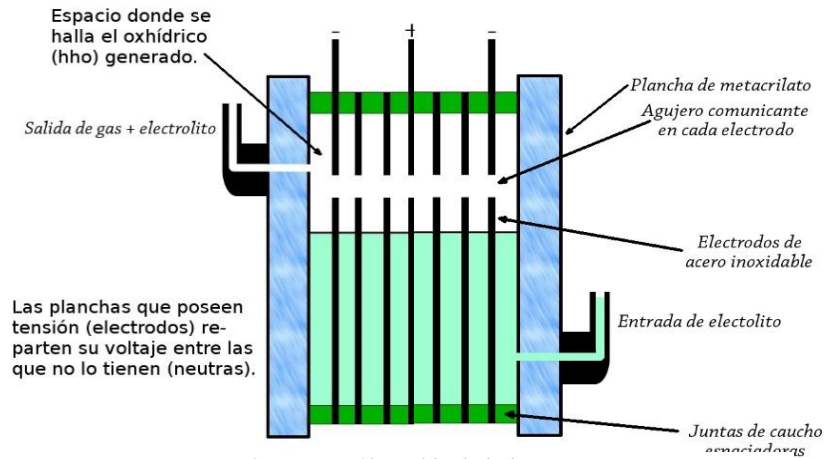


Ilustración 48: Celda de hidrógeno

El número y la disposición de los ánodos y cátodos puede variar en función de la celda, pero resulta imprescindible que siempre se respete la proporción de la molécula siendo los ánodos el doble en número que los cátodos. Como vemos existen una especie de placas intermedias, estas no presentan una conexión directa con la alimentación, pero sí pasa corriente por ellas al encontrarse la fuente de alimentación encendida.

Para lograr entender que sucede en dichas placas hemos de prestar especial atención a la siguiente imagen:

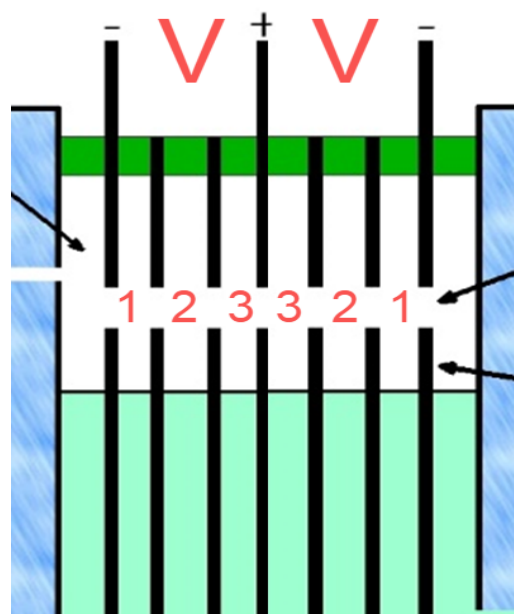


Ilustración 49: Caídas de voltaje en celda de hidrógeno

Como se aprecia en la imagen la fuente de alimentación se debería conectar a tres puntos, por norma general lo que se hace es comunicar las placas negativas para así requerir de una única conexión de salida que pueda comprometer la estanqueidad del depósito.

Lo que se pretende con el uso de placas intermedias neutras es que la corriente deba atravesar sí o sí una masa de agua para continuar su camino de placa en placa. El acero inoxidable es un material conductor con una resistividad de  $6,90 \cdot 10^{-7} \rho/\Omega \cdot m$  por lo que la tensión en una placa es prácticamente uniforme en todos sus puntos, la caída de tensión entre placas viene determinada por la fuente de alimentación, si se aporta una tensión de 12 voltios esta se irá perdiendo de manera equitativa en cada uno de los pasos de agua existentes entre placas. Los pasos de agua mencionados aparecen numerados en la ilustración y la secuencia numérica resulta ser doble ya que la corriente presenta dos caminos simultáneos diferentes, en ambos partimos del cátodo o placa positiva central en busca de los ánodos o placas negativas de los extremos (3>2>1).

Para determinar el voltaje en continua a emplear se deben numerar del modo anteriormente explicado los alojamientos intermedios, teniendo en cuenta que la caída de tensión en cada uno de ellos y para cada uno de los flujos de corriente es  $\Delta V = \frac{V}{N^{\circ}alojamientos}$ , y que se recomienda un  $\Delta V = 2V$  por alojamiento, este valor podría variar según el tamaño de la placa. Entonces podemos determinar el voltaje de alimentación despejándolo de la siguiente expresión  $2 \cdot N^{\circ}alojamientos = V$ .

En este caso la resolución sería la siguiente  $2 \cdot N^{\circ}alojamientos = 2 \cdot 3 = V = 6V$ , de esta se acabaría deduciendo que el voltaje de alimentación debería ser de aproximadamente 6 V.

El tamaño de las placas resulta ser determinante ya que en función del tamaño de la placa se pueden tolerar unas intensidades de trabajo u otras sin generar temperaturas excesivas. El ajuste final se debe realizar mediante pruebas experimentales controlando factores como la temperatura, los consumos energéticos y la productividad. La intensidad tenderá a determinados valores, por norma general para una tensión de 12 o 13 V se generan consumos de unos 9 A. Estos datos han sido extraídos mediante ensayos con una celda de 13 placas con 3 de alimentación y 10 neutras, dichas placas presentan unas dimensiones de 78 x 55 x 1 mm, pero estas no serán las placas empleadas en la experimentación final.

## 6.2 CONSTRUCCIÓN

### 6.2.1 MATERIALES NECESARIOS

Para la construcción de una celda electrolítica o de hidrógeno se requieren diversos tipos de materiales. En base a propiedades como la conductividad, resistencia mecánica y/o resistencia a la corrosión los materiales seleccionados en cada una de las zonas serán unos u otros.

Los materiales finalmente seleccionados son los enumerados a continuación:

- Chapa de acero inoxidable de espesor 1mm (1 unidad).
- Tornillos con tuercas ambos de acero inoxidable M5x20 (3 unidades).
- Tornillos con tuercas ambos de acero inoxidable M5x30 (2 unidades).
- Tornillos con tuercas ambos de acero inoxidable M5X65 (4 unidades).
- Deposito principal de 200 mm de altura y diámetro interior de 125mm.
- Material aislante
- Placas aislantes de sujeción PVC (2 unidades).

## 6.2.2 TOMA DE DECISIONES

Para que una celda de hidrógeno funcione correctamente ha de estudiarse esta con detenimiento, cada detalle puede ser diferencial. La decisión más notable es el dimensionamiento de las placas, dicha decisión viene influenciada por ciertas decisiones previas como la caída de voltaje deseada entre placas, el voltaje de alimentación o la intensidad media esperada. Como se ha explicado el apartado 6.1 estos factores presentan una cierta relación y son deducibles mediante cálculo.

En este caso se espera una caída de tensión entre placas de unos 2 V a 2,5 V y se ha diseñado la celda para funcionar nuevamente con un bloque de 13 placas independientes, con unas dimensiones base estimadas de 112 x 69 x 1mm. Nuevamente recurriremos al apartado 6.1, para recordar la primera experimentación realizada en la que se empleaban el mismo número de placas y dispuestas del mismo modo, pero con dimensiones algo menores, estas eran de 78 x 55 x 1mm.

En este nuevo diseño las placas escogidas presentan un área útil mayor propiciando un mejor aprovechamiento de la energía por parte del agua. Concretamente se ha incrementado el área útil (área de las caras de la placa que se encuentran enfrentadas con otras placas) en un 80,139 %, lo que viene a suponer casi el doble de área de transferencia y por tanto un mayor volumen de agua se verá influenciada por dicha corriente. Si bien es cierto que la caída de tensión no depende del tamaño de las placas, estas han de soportar con soltura las corrientes de paso sin generar calentamientos indeseados.

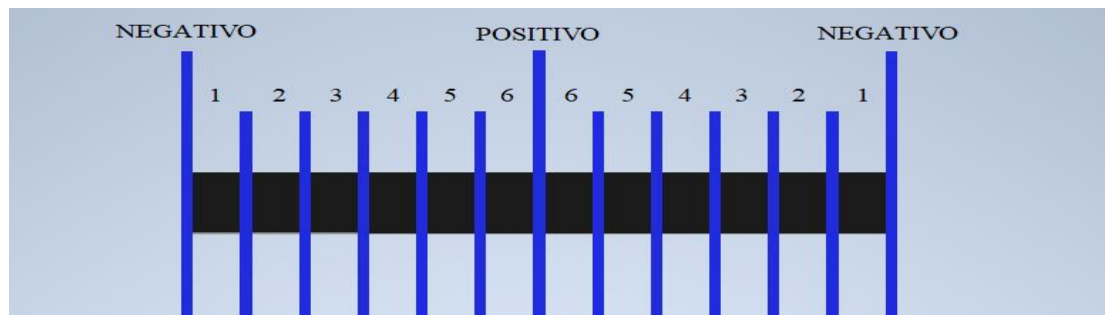


Ilustración 50: Vista lateral placas celda de hidrógeno

Al igual que se hizo con los cálculos de ejemplo, se ha optado por representar sobre un modelo bidimensional la información y las referencias básicas para la realización y explicación de los cálculos.

Como se observa en la imagen, en este caso las placas neutras son un total de diez, las placas que actúan como ánodos (negativo) son dos ubicadas en los extremos y la placa central actúa como cátodo (positivo). Todas y cada una de las placas presentan separadores entre sí, estos separadores han de ser aislantes y en la representación han sido sobredimensionados para que pudieran apreciarse claramente los intersticios que estos dejan. Los intersticios se han numerado nuevamente de forma contraria al flujo de corriente, siendo la secuencia seguida por la electricidad en cualquiera de sus dos flujos 6>5>4>3>2>1.

Conocido esto pueden realizarse los cálculos de la tensión de alimentación requerida:

$$\Delta V = \frac{V}{N^{\circ}alojamientos} \rightarrow V = \Delta V \cdot N^{\circ}alojamientos$$

- Si realizamos el cálculo con una caída  $\Delta V = 2V$  por intersticio:

$$V_{\min} = \Delta V \cdot N^{\circ}alojamientos = 2 \cdot 6 = 12 V$$

- Si realizamos el cálculo con una caída  $\Delta V = 2,5V$  por intersticio:

$$V_{\max} = \Delta V \cdot N^{\circ}alojamientos = 2,5 \cdot 6 = 15 V$$

Estos serán los valores teóricos mínimos y máximos de la tensión de alimentación. A falta de antecedentes podrán verse superados durante la experimentación siempre y cuando se certifique que la unidad lo tolera.

### 6.2.3 PREPARACIÓN DE MATERIALES

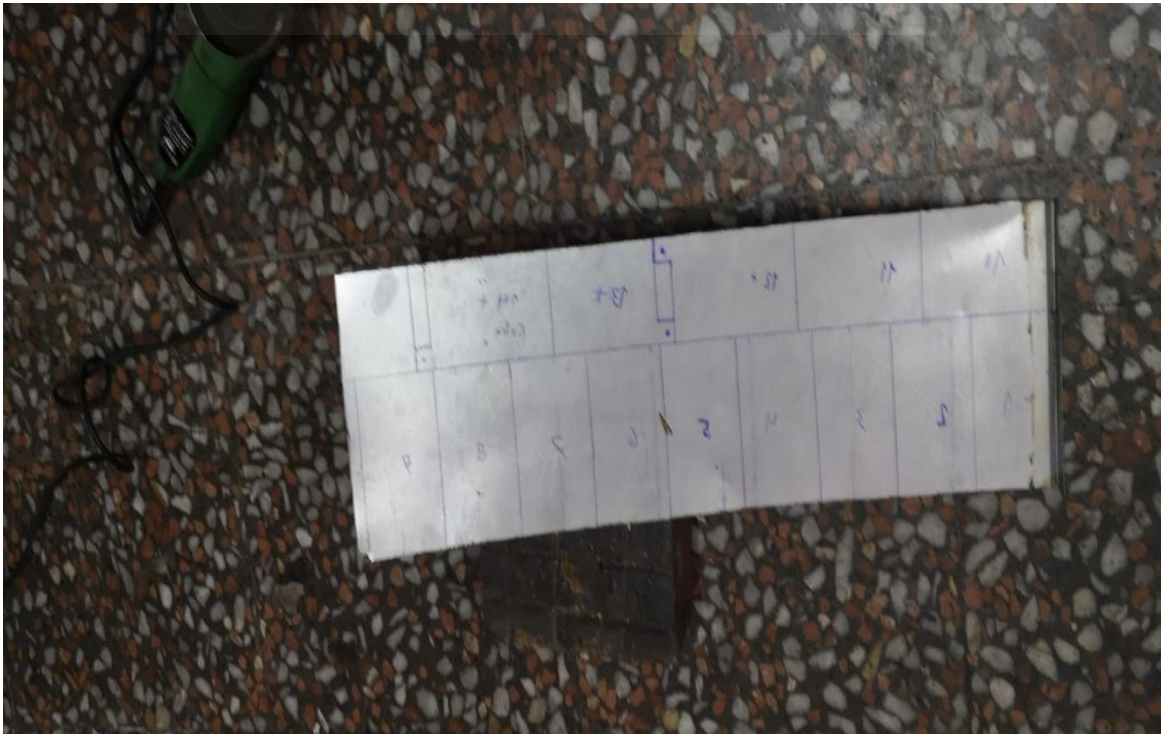
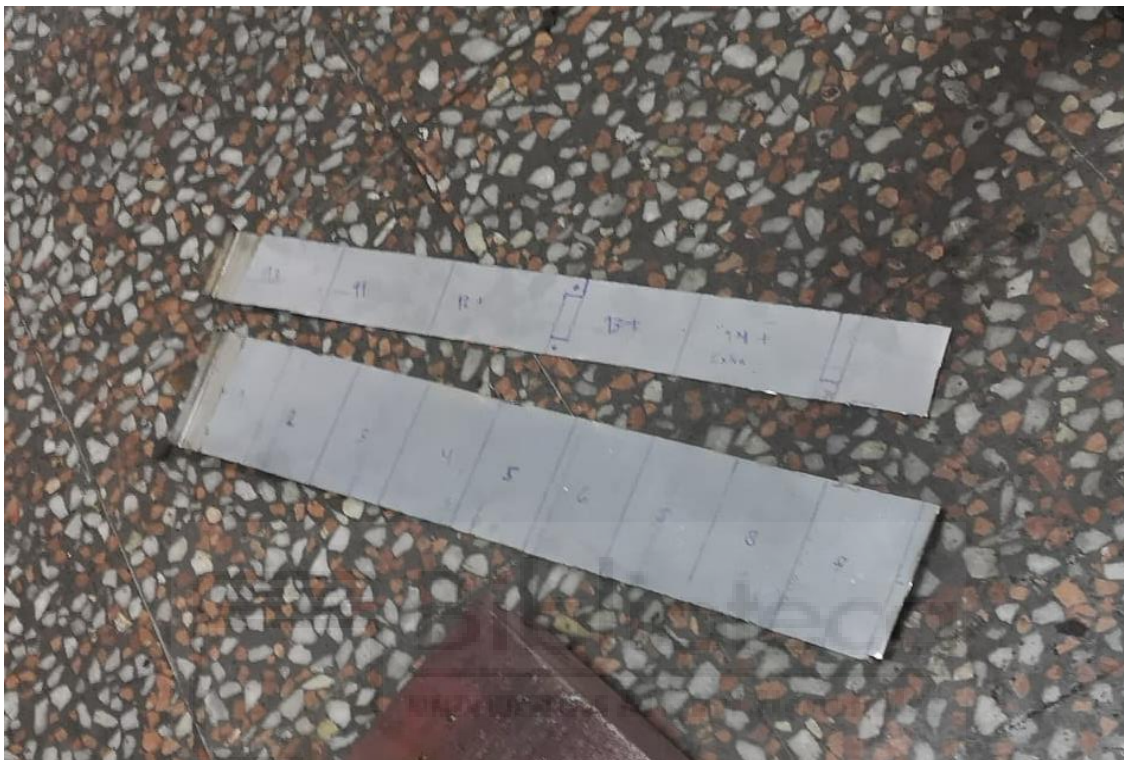


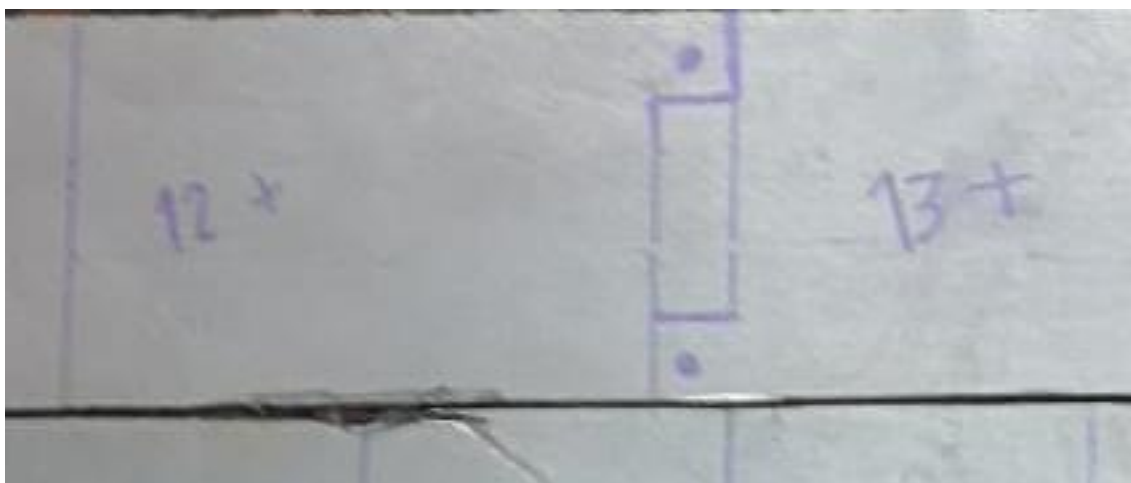
Ilustración 51: Chapa empleada para las placas de la celda



Si analizamos la imagen podemos apreciar que se han marcado 14 placas pudiendo así disponer de una extra por si surgen problemas durante el montaje o la preparación de los elementos.



*Ilustración 52: Placa tras primer corte.*



*Ilustración 53: Placa extra.*

Las placas tras ser cortadas serán cepilladas y lijadas eliminando sus rebabas, tratando a su vez de eliminar filos cortantes que supongan un peligro para su posterior manipulación.



*Ilustración 54: Filos cortantes y rebabas.*



*Ilustración 55: Mecanizado en esmeril de banco.*

Tras eliminar de forma manual las rebabas más notorias se pasa a emplear un esmeril de banco con doble funcionalidad, en uno de los extremos de su eje podemos observar una piedra esmeril circular específica para acero y en el extremo opuesto un cepillo circular con espesor de cable de 0,3 mm, siendo este segundo también específico para aceros, especialmente para aceros inoxidables.



*Ilustración 56: Esmeriladora de banco.*

Posteriormente se realizarán los taladros, ya que haberlos realizado de forma previa al mecanizado abrasivo hubiera sido un grave error, de ese modo la pieza hubiera perdido “cuerpo” o material resistente, pudiendo dañarse esta con facilidad durante el proceso.

UNIVERSITAS Miguel Hernández



*Ilustración 57: Taladros en las placas.*

Teniendo ya las placas listas se prepararon los separadores aislantes que se ubicarán entre cada una de ellas, para realizar estos se optó por emplear recortes de una lámina de caucho.



Ilustración 58: Lámina de caucho

Las dimensiones empleadas fueron de 10 mm x 50 mm x 2 mm, al ser un caucho de densidad media y espesor reducido resulta sencillo cortarlo con tijeras. No se recomiendan cauchos de alta densidad y elevada rigidez ya que estos no asentarían tan bien tras los ajustes finales, los cauchos elásticos asientan con facilidad al ser comprimidos. Aunque tras el apriete estos separadores pierdan algo de espesor al ser de 2 mm no existirá problemática alguna, por no llegar a contactar las placas en ningún caso. De todos modos, se comprobará la continuidad entre estas posteriormente.

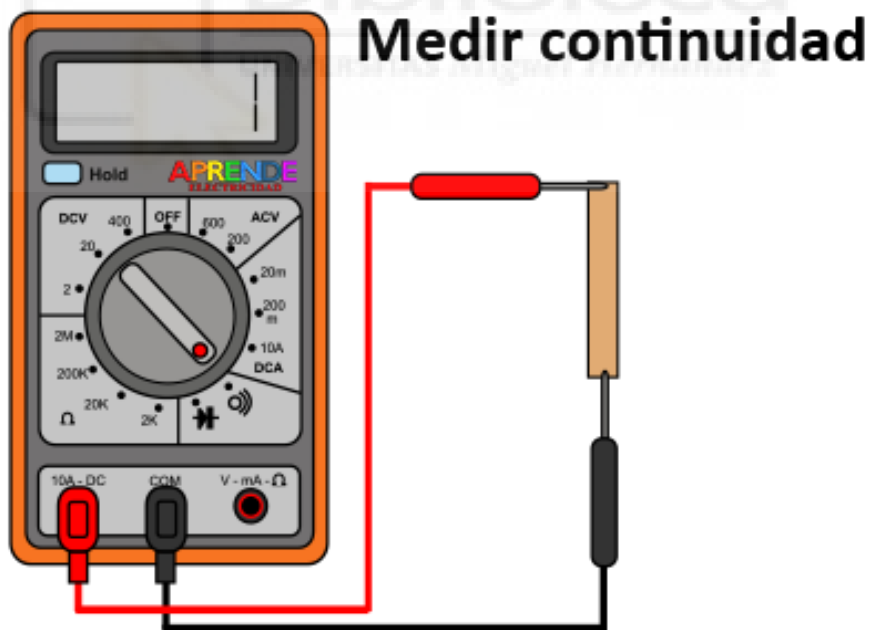


Ilustración 59: Comprobación continuidad

Teniendo ya listos los elementos del núcleo de la celda de hidrógeno se optó por preparar los elementos de compresión, para la realización de estos se optó por reutilizar una placa de PVC de dimensiones 100mm x 90mm x 10mm, como el ancho de la misma era justo el necesario y el espesor también, únicamente se necesitaron cortes rectos realizados con una sierra de mano. Al emplear una sierra de mano se evitan sobrecalentamientos del material, pudiendo controlar así mucho mejor el ritmo de corte.





*Ilustración 60: Placa PVC.*

Ya teniendo las placas listas se puso a prueba su resistencia determinando que estas trabajarían en su plano débil (menor inercia) por ocupar así menos espacio y ser su resistencia en dicha dirección más que suficiente.



*Ilustración 61: Montaje provisional núcleo celda.*

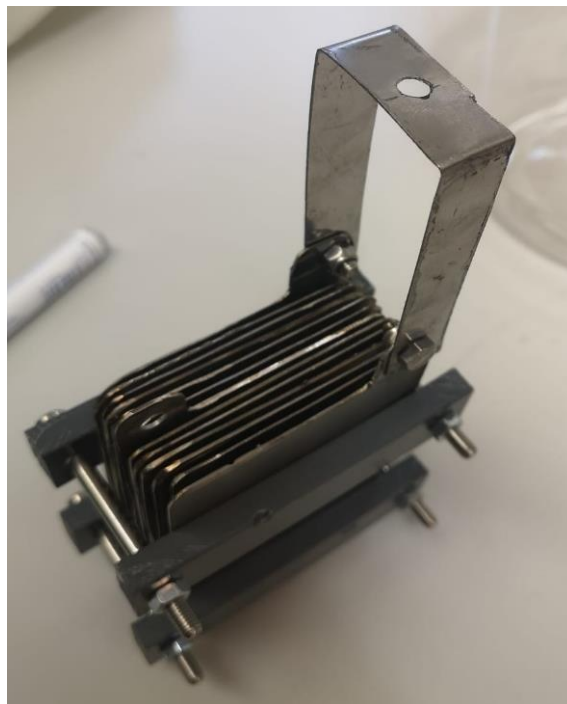
Tras agotar totalmente la primera de las chapas metálicas en la realización de las placas se tuvo que comenzar a trabajar con una segunda placa, esta constaba con un recubrimiento adhesivo blanco que se dejó a modo de protección durante el mecanizado y los trabajos manuales, pero posteriormente será retirada. De esta se obtendrán los conectores que proveerán a la celda de corriente, además de ejercer como soportes de la misma, para realizar estos soportes de forma precisa resultará de gran utilidad el montaje provisional del núcleo de la celda realizado con anterioridad.



*Ilustración 62: Chapa empleada para los conectores.*

Para realizar los elementos de conexión se ha optado por realizar cortes longitudinales con estos se pretende generar una chapa rectangular larga con la que poder obtener la pieza deseada mediante doblado, antes de doblar la misma se realizó un taladro en su centro. Como la chapa presentaba una doblez que formaba un ángulo recto se optó por aprovechar la misma.

Para mejorar el ajuste y comprobar las piezas se optó por montar estas sobre el montaje provisional.



*Ilustración 63: Prueba elemento conexión negativos.*

Como únicamente una de las piezas resultaba problemática fue esta la que se comprobó montándola, la comprobación concluyó con éxito. Por otro lado, el elemento conector positivo no resultaba problemático por anclarse este únicamente a una de las placas (cátodo).

Ya comprobado esto se tomaron las medidas pertinentes y se desmontó el modelo provisional con intención de seguir mejorando los acabados de las placas.



*Ilustración 64: Núcleo celda desmontado.*

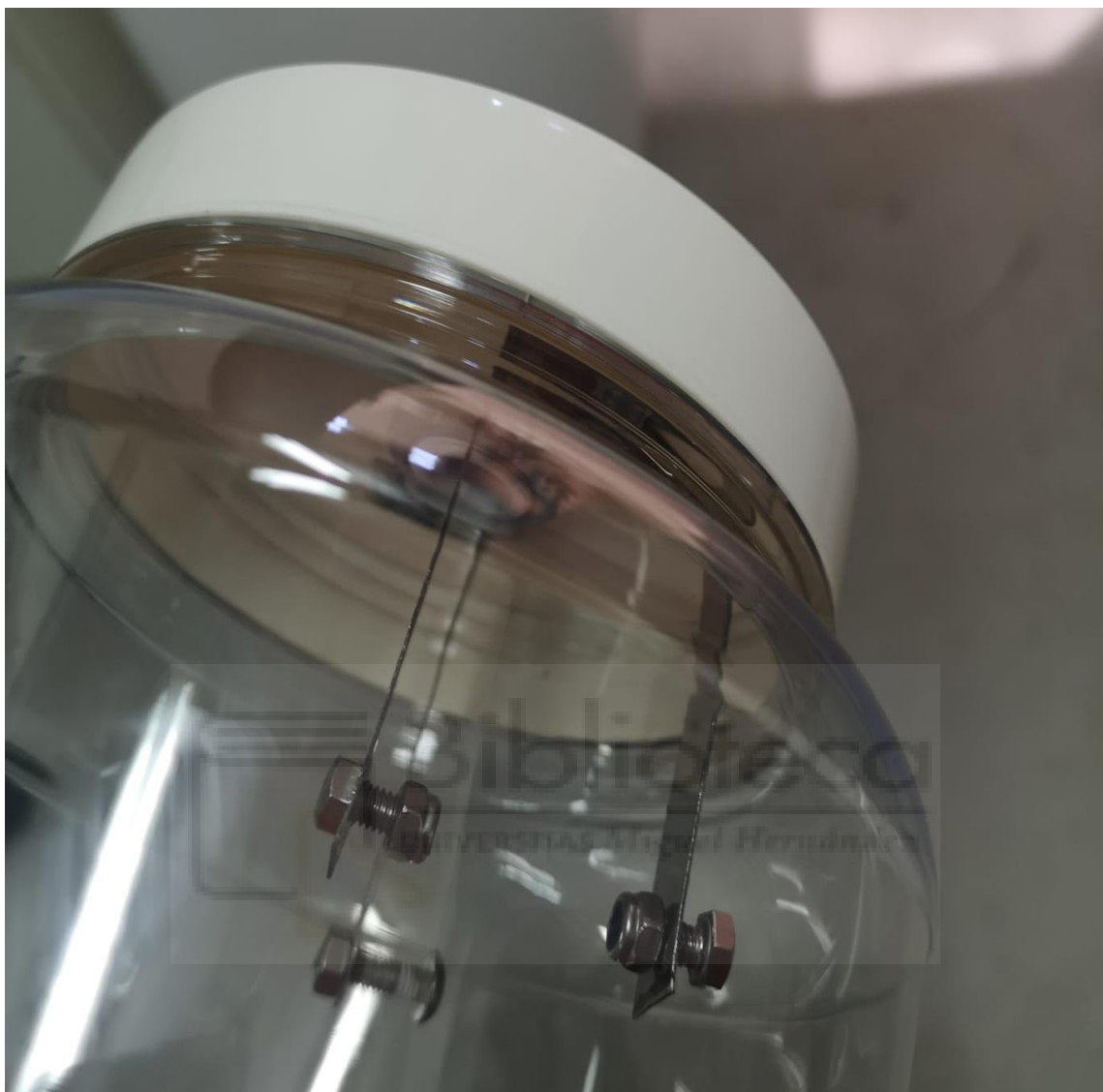
Tras el desmontaje se abordó la problemática del recipiente contenedor, ya que resultaba complicado encontrar uno transparente con las dimensiones requeridas. Finalmente se pudo conseguir uno con los parámetros deseados, este es el mostrado a continuación:



*Ilustración 65: Recipiente transparente.*



Analizadas las dimensiones del tanque y los bocetos generados al principio del proceso de diseño, se procedió a trabajar sobre el tanque para prepararlo.



*Ilustración 66: Trabajos en la tapa del recipiente.*

Primeramente, se estudiaron y marcaron los puntos sobre la tapa, con la intención de taladrar los orificios pertinentes por los que el tornillo encargado de sujetar el núcleo de la celda y a su vez comunicar la corriente del exterior al interior discurrirá. Se emplea un tornillo como conductor por ser este un elemento de fácil sellado, el cual permitirá asegurar la estanqueidad de forma sencilla. Ya generados los agujeros pertinentes se colocaron ambas piezas conductoras con sus tornillos, arandelas y tuercas de fijación (2 unidades), estos serán únicamente dos porque a menor número de agujeros menor será la probabilidad de fugas que puedan comprometer la estanqueidad.

Viendo que tras el montaje la distancia entre ambos elementos era suficiente como para poder colocar la salida de gas entre ambos, se optó por ubicar ésta en el centro de ambos tornillos, quedando por tanto ligeramente desviada respecto al centro geométrico de la tapa, pero centrada respecto al núcleo de la celda que posteriormente se alojará bajo dicha tapa. Para la salida de gas se empleó unos prensaestopas, a priori este elemento se usa en

instalaciones de carácter eléctrico, pero ha sido seleccionado en esta ocasión por su capacidad de asegurar la estanqueidad. Siempre que se ajuste correctamente el elemento opresor al tubo, este quedará ceñido al tubo asegurando su estanquidad, por esto normalmente si la tubería es de goma muy flexible no sería posible emplear este elemento, ya que se deformaría generando pérdidas de contacto por las que fugaría el gas o el líquido. Gracias a que el tubo empleado en esta ocasión es lo suficientemente rígido se ha mantenido la decisión.



Ilustración 67: Prensaestopas empleado como salida de gas.

Tras realizar el agujero requerido en la tapa con una broca escalonada, se comprobó que el elemento contara con espacio suficiente y que el conjunto quedaba colocado sin interferencia alguna.

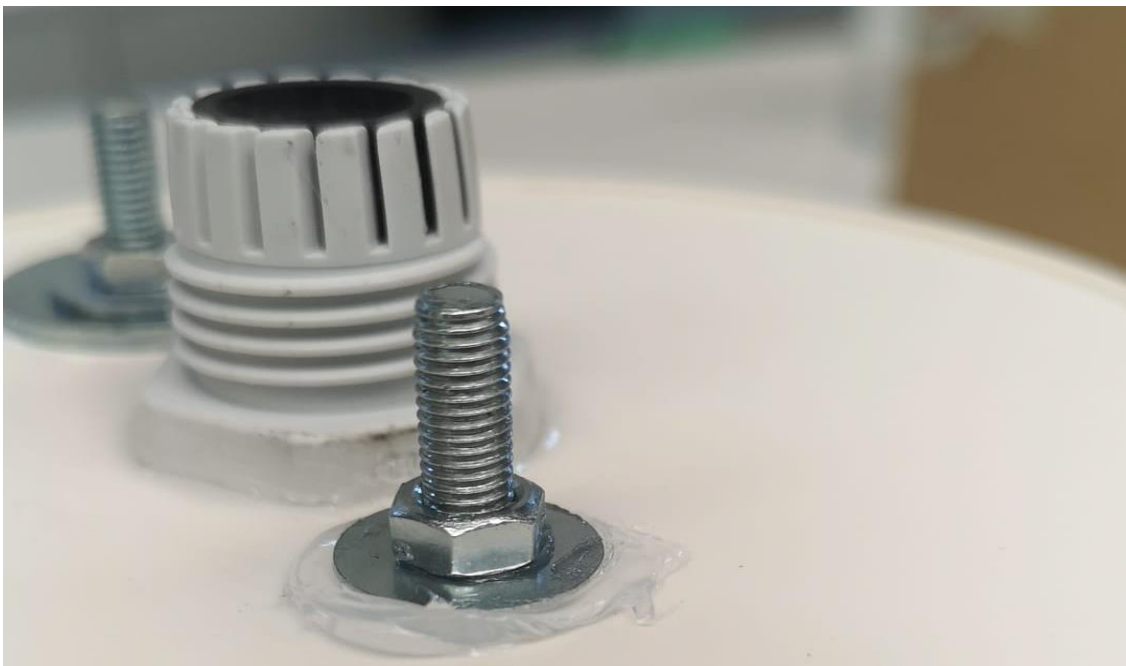


Ilustración 68: Broca escalonada.



*Ilustración 69: Montaje provisional recipiente.*

Como se observa en la imagen los elementos asentaron a la perfección, en este momento se decidió por tanto desmontarlos con la intención de montarlos con silicona para asegurar así que no se producen fugas en el conjunto.



*Ilustración 70: Montaje definitivo recipiente.*

## 6.2.4 MODELOS TRIDIMENSIONALES

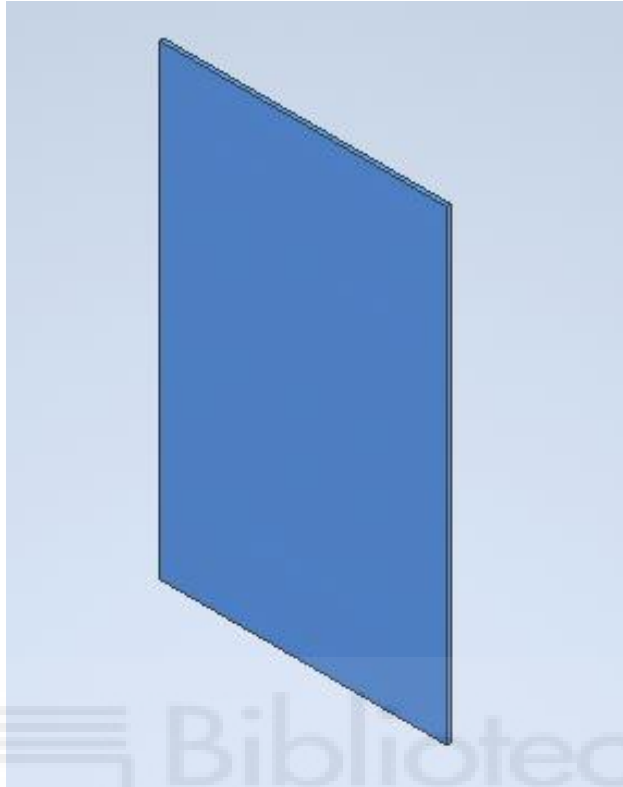
Consideraciones previas:

- Las medidas y proporciones empleadas en los modelos tridimensionales están basadas en el diseño real, pueden existir pequeñas variaciones dimensionales en base a los torques de apriete empleados en la realidad y los ajustes previos al funcionamiento de la celda.
- Los elementos mostrados en los siguientes modelos no han de ser exactamente iguales a los empleados finalmente ya que se trata de una representación orientativa del ensamblaje. Estos elementos no pretenden ser representaciones fieles en cuanto a estética, sino que lo serán en cuanto a funcionalidad.
- Las tonalidades empleadas en las imágenes no tienen por qué tener relación con la realidad, se emplearán los tonos que más favorezcan la diferenciación e identificación de los elementos. Al final de cada elemento, subconjunto y conjunto se adjuntan imágenes realistas.
- Los tonos de las imágenes realistas no tienen por qué ser totalmente fieles a la realidad, durante la experimentación pueden variarse los materiales constructivos de los elementos y por tanto sus tonalidades, pero estos servirán como tonos orientativos.
- Los elementos de fijación y sujeción mostrados en las imágenes de subconjunto y conjunto son elementos genéricos, estos no tendrán por qué coincidir con los empleados en el modelo real de forma exacta. Los puntos de anclaje del elemento compresor de las placas se han simplificado a un único punto con la intención de mejorar la visibilidad en el modelo, en cambio en el modelo real este sistema se presentará duplicado.
- Los elementos de fijación empleados no se mostrarán como elementos independientes, pero sí aparecerán en los distintos subconjuntos y en el conjunto final.
- Las restricciones espaciales empleadas entre elementos en el modelo han sido seleccionadas en base al comportamiento funcional de cada uno de los elementos en el ensamblaje real.
- El cableado tomará tonalidad roja en caso de ser positivo y tonalidad negra en caso de ser negativo, aunque en los elementos únicamente se mostrará uno (negro) a modo de ejemplo por ser ambos geoméricamente idénticos.
- La tonalidad de referencia puede coincidir con la realista en casos en los que el elemento sea fácilmente identificable.

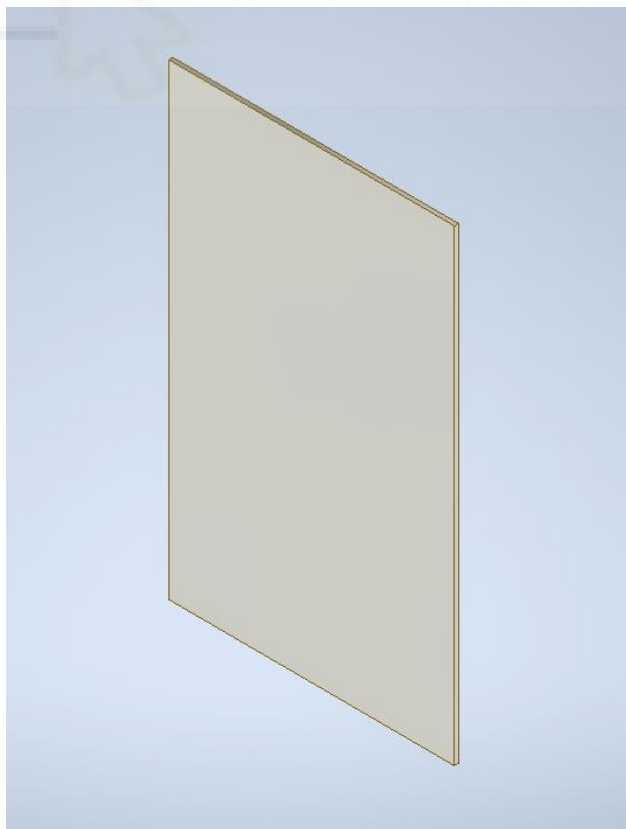


## 6.2.4.1 ELEMENTOS BASE

### 6.2.4.1.1 PLACAS NEUTRAS (10 uds)



*Ilustración 71: Elementos 3D, placa neutra (tono referencia)*



*Ilustración 72: Elementos 3D, placa neutra (tono realista)*

6.2.4.1.2 PLACAS CARGADAS (3 uds)

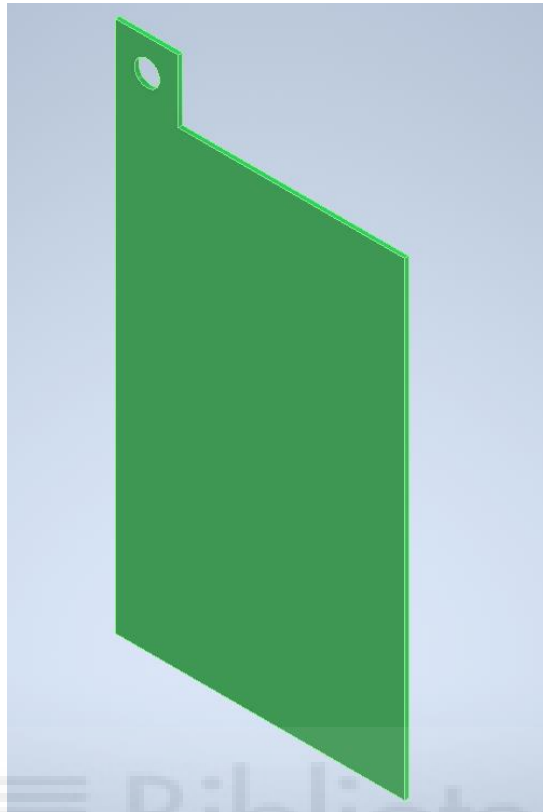


Ilustración 73: Elementos 3D, placa cargada (tono referencia)

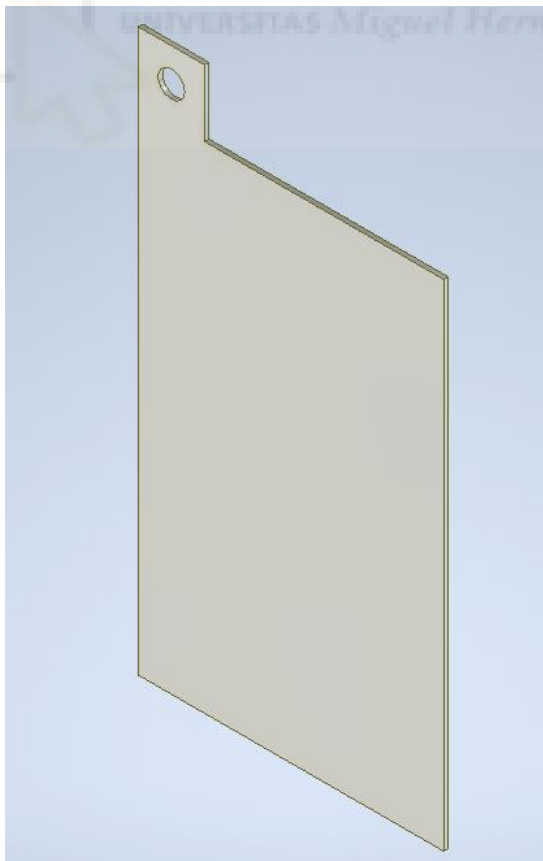


Ilustración 74: Elementos 3D, placa cargada (tono realista)

6.2.4.1.3 SEPARADORES AISLANTES (24 uds)

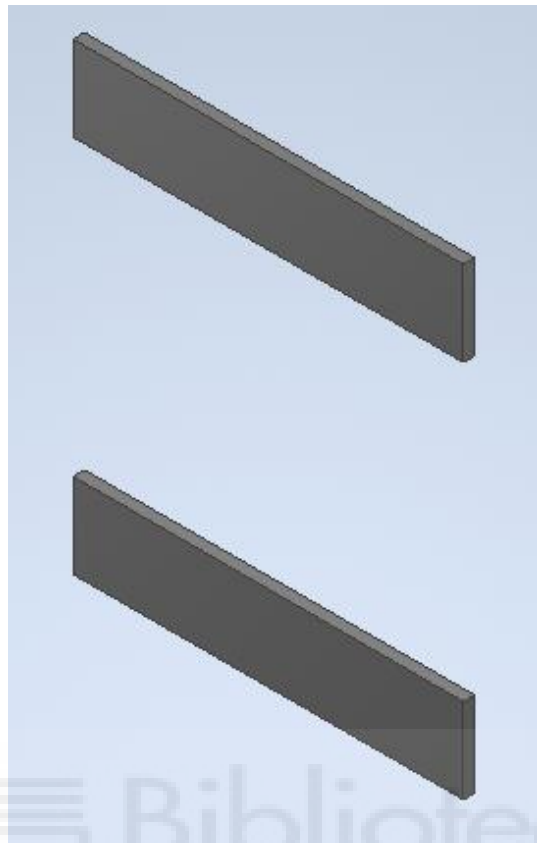


Ilustración 75: Elementos 3D, separadores aislantes (tono referencia)

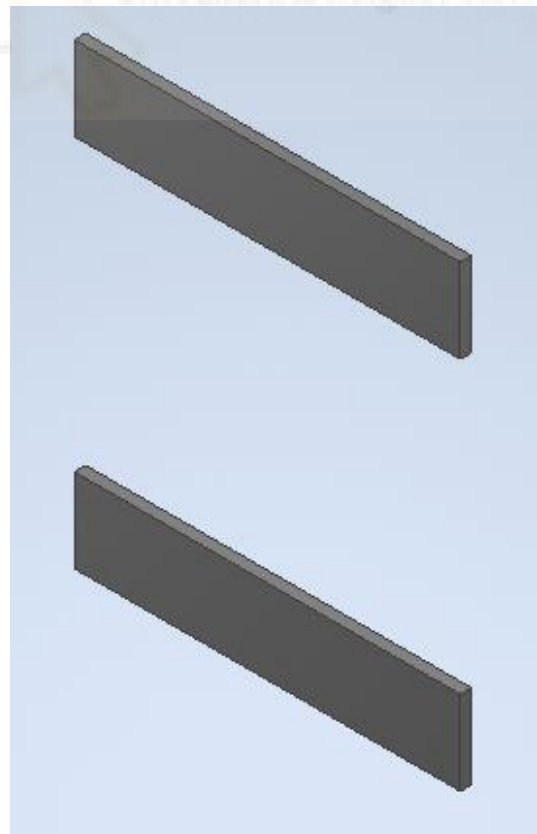
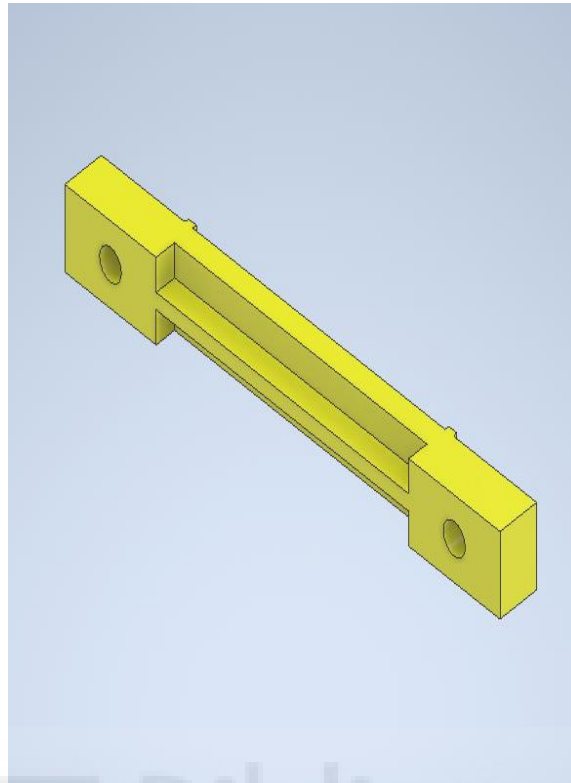
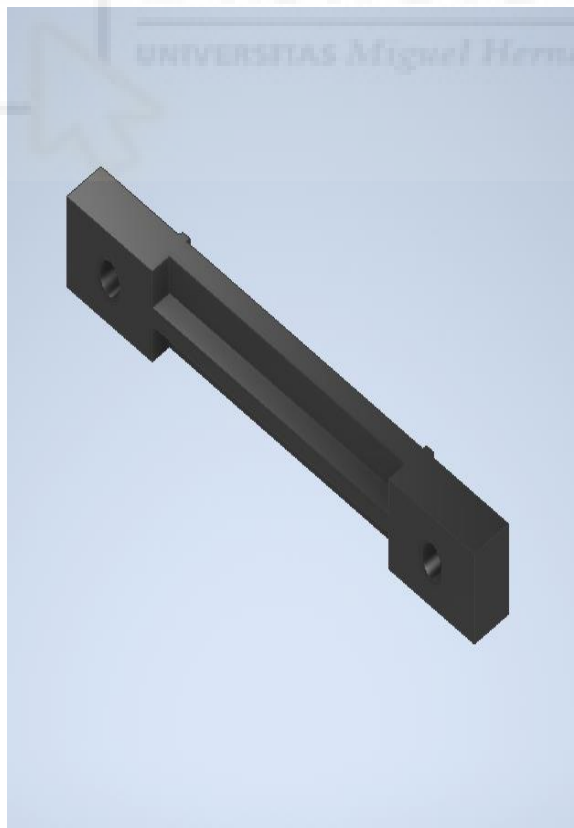


Ilustración 76: Elementos 3D, separadores aislantes (tono realista)

6.2.4.1.4 SOPORTE PLACAS (1 uds)



*Ilustración 77: Elementos 3D, soporte placas (tono referencia)*



*Ilustración 78: Elementos 3D, soporte placas (tono realista)*

6.2.4.1.5 CONDUCTOR INTERNO POSITIVO (1 ud)

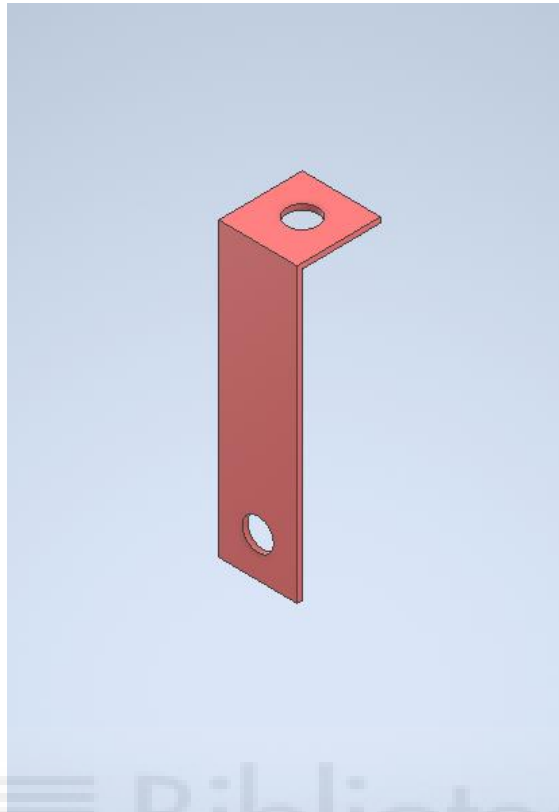


Ilustración 79: Elementos 3D, conductor interno positivo (tono referencia)

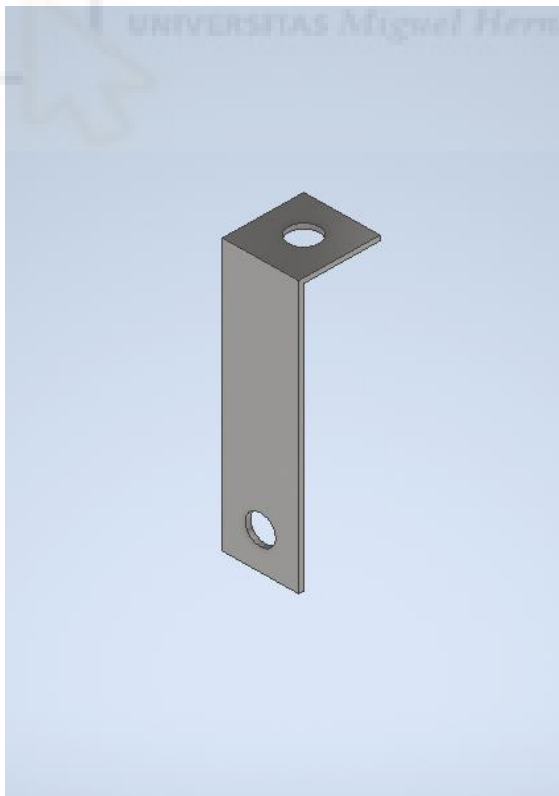
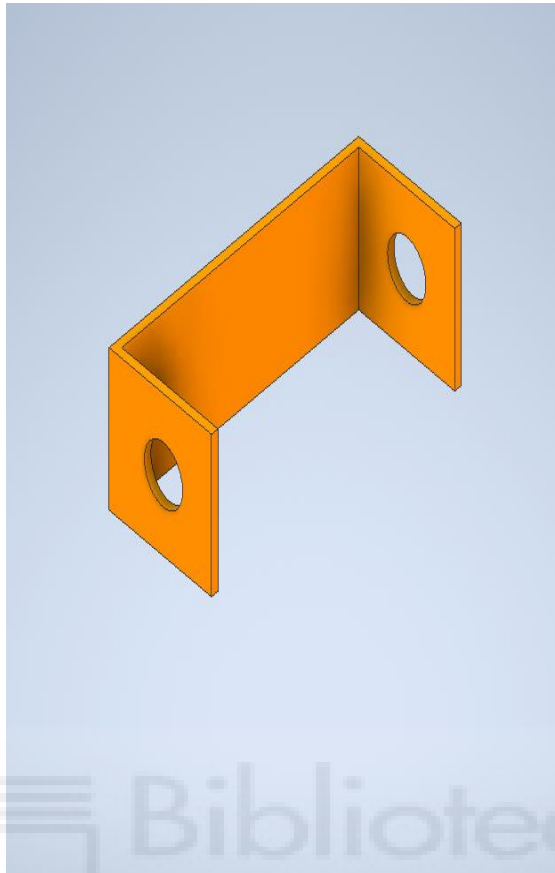
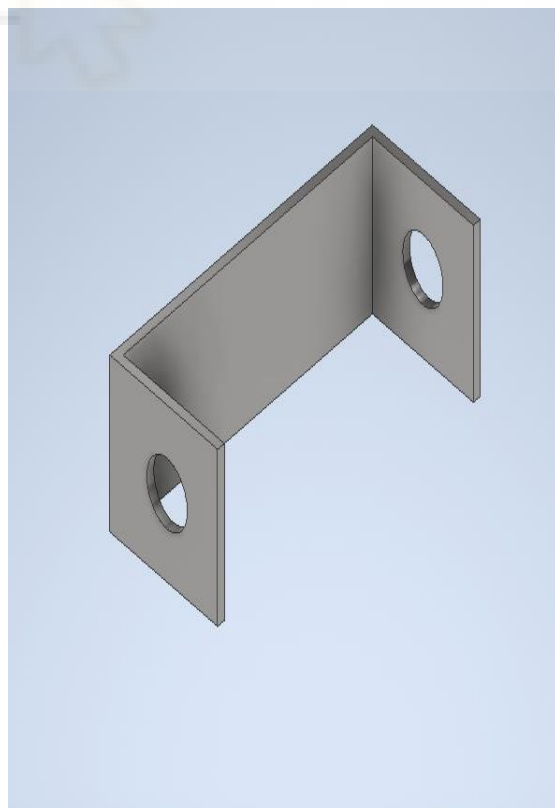


Ilustración 80: Elementos 3D, conductor interno positivo (tono realista)

6.2.4.1.6 CONDUCTOR COMÚN NEGATIVOS (1 ud)

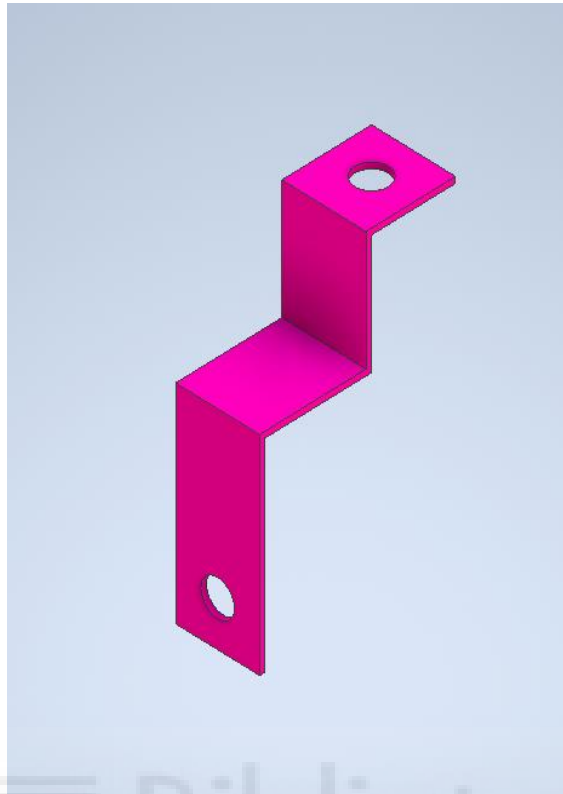


*Ilustración 81: Elementos 3D, conductor común negativos (tono referencia)*

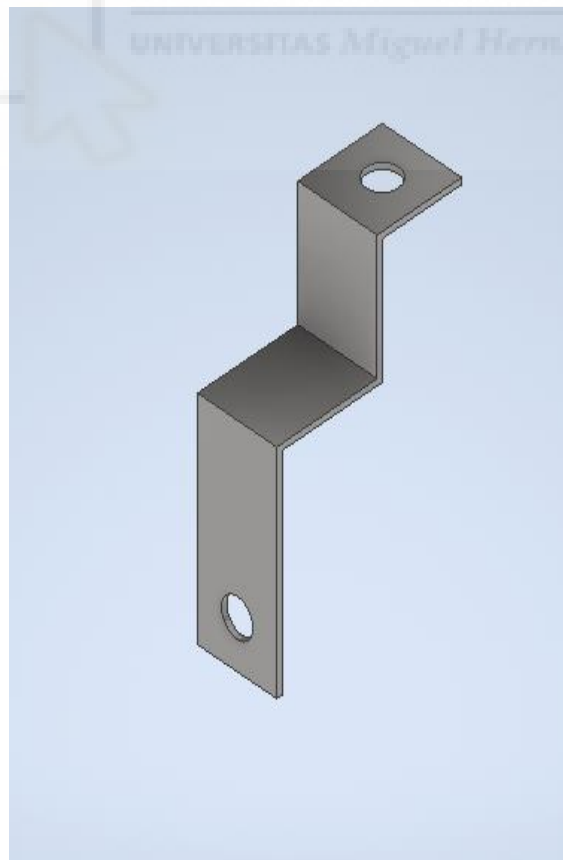


*Ilustración 82: Elementos 3D, conductor común negativos (tono realista)*

6.2.4.1.7 CONDUCTOR INTERNO NEGATIVO (1 ud)

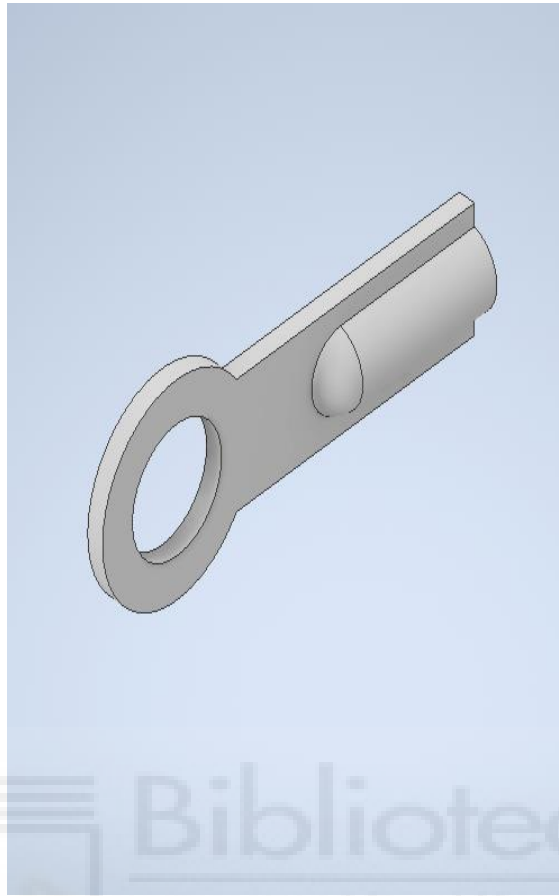


*Ilustración 83: Elementos 3D, conductor interno negativo (tono referencia)*

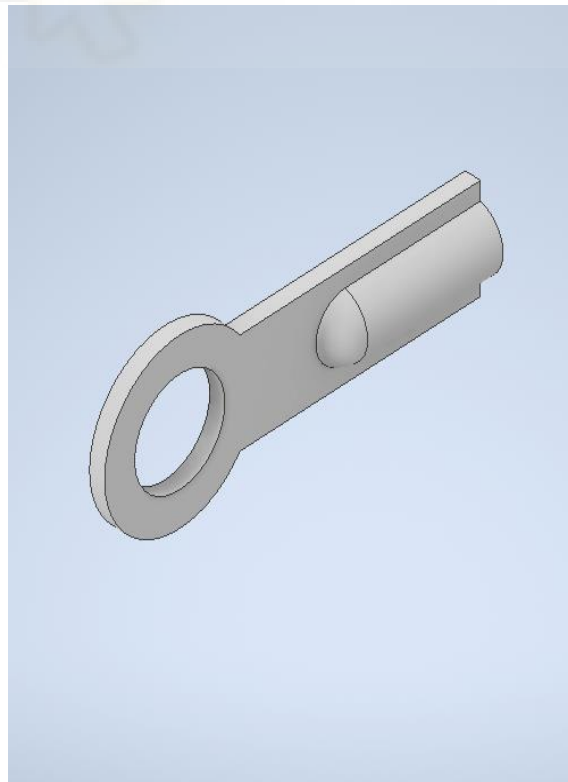


*Ilustración 84: Elementos 3D, conductor interno negativo (tono realista)*

6.2.4.1.8 TERMINAL ELÉCTRICO (2 uds)



*Ilustración 85: Elementos 3D, terminal eléctrico (tono referencia)*



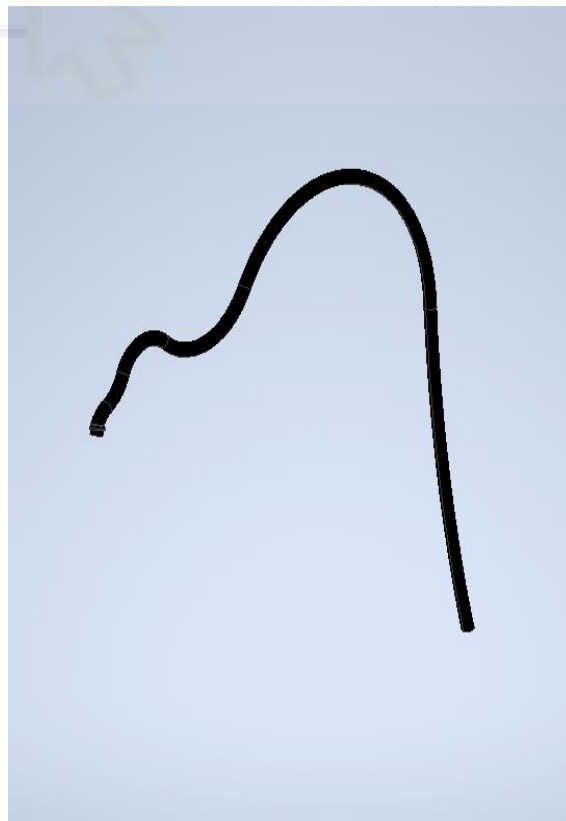
*Ilustración 86: Elementos 3D, terminal eléctrico (tono realista)*



6.2.4.1.9 TUBO EXTRACCIÓN GASES (1 ud)



*Ilustración 87: Elementos 3D, tubo extracción gases (tono referencia)*



*Ilustración 88: Elementos 3D, tubo extracción gases (tono realista)*

6.2.4.1.10 CABLE DE ALIMENTACIÓN (2 uds)



Ilustración 89: Elementos 3D, cable alimentación (tono referencia)



Ilustración 90: Elementos 3D, cable alimentación (tono realista)

6.2.4.1.11 RECIPIENTE (1 ud)

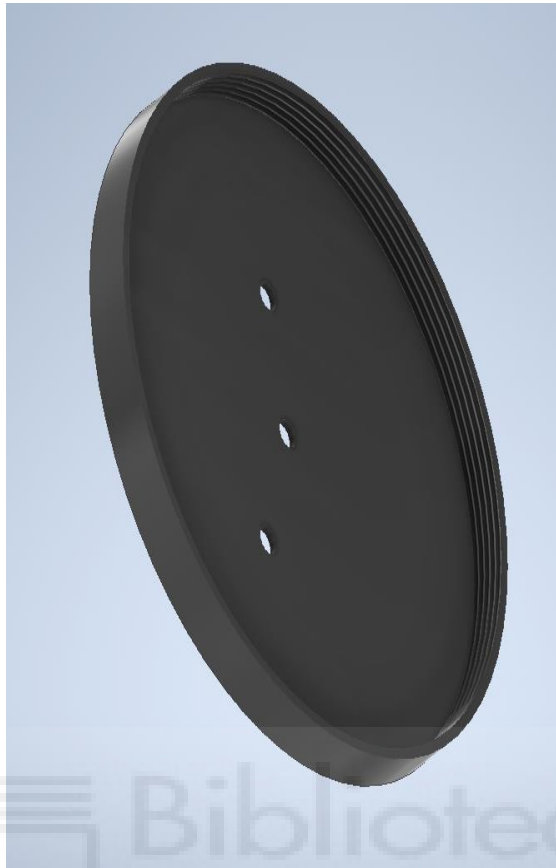


*Ilustración 91: Elementos 3D, recipiente (tono referencia)*

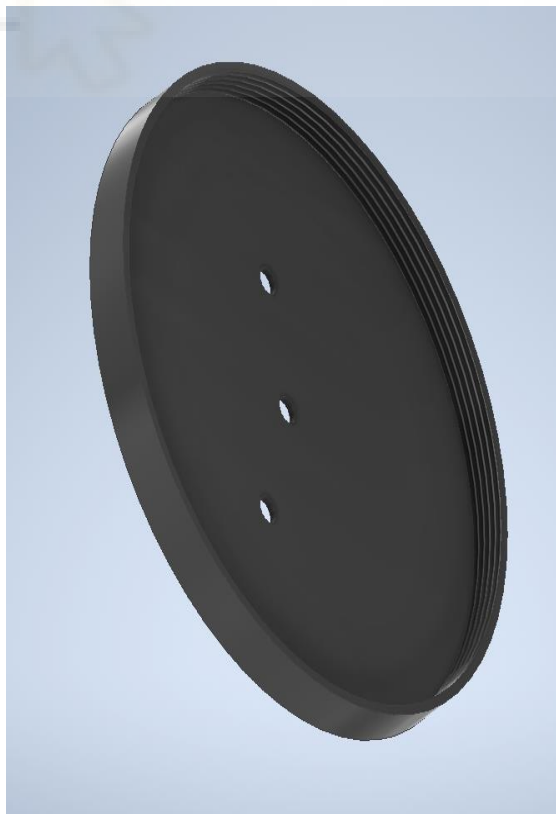


*Ilustración 92: Elementos 3D, recipiente (tono realista)*

6.2.4.1.12 TAPA ROSCADA (1 ud)



*Ilustración 93: Elementos 3D, tapa roscada (tono referencia)*



*Ilustración 94: Elementos 3D, tapa roscada (tono realista)*

## 6.2.4.2 SUBCONJUNTOS

### 6.2.4.2.1 SUBCONJUNTO INTERIOR

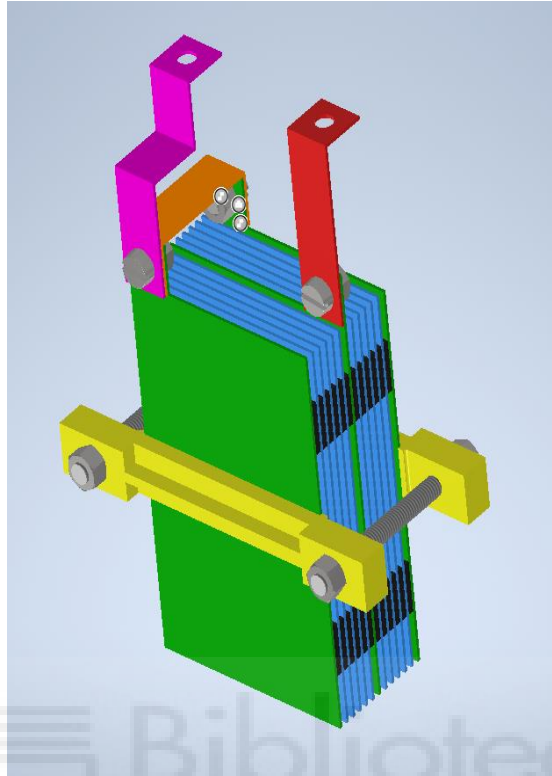


Ilustración 95: Subconjuntos 3D, subconjunto interior (tonos referencia)

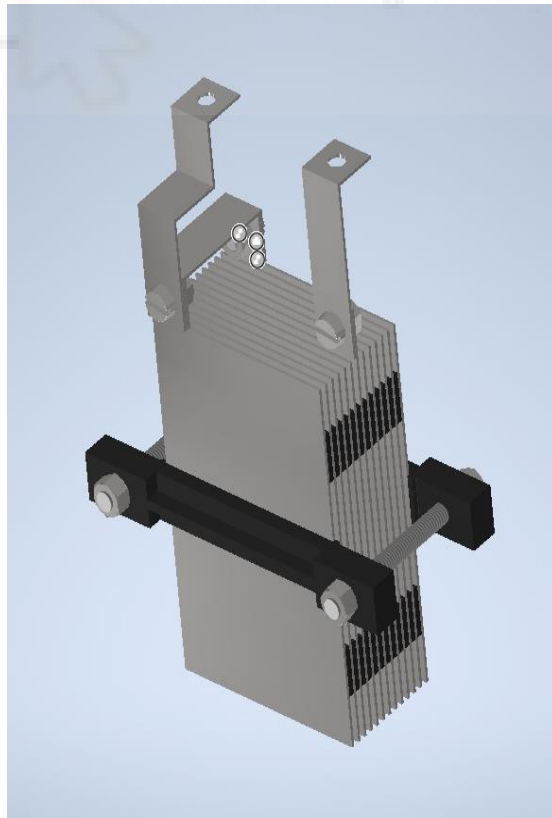


Ilustración 96: Subconjuntos 3D, subconjunto interior (tonos realistas)

6.2.4.2.2 SUBCONJUNTO RECIPIENTE Y CONEXIONES

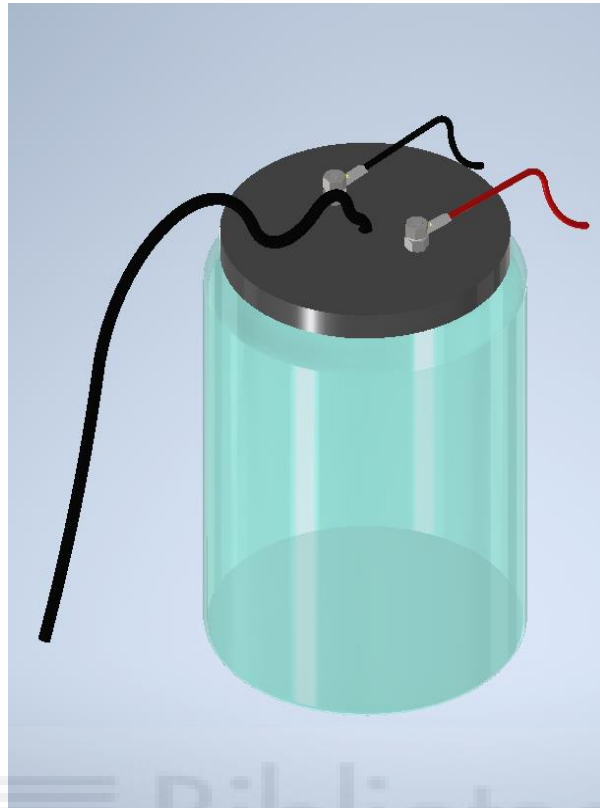


Ilustración 97: Subconjuntos 3D, subconjunto recipiente y conexiones (tonos referencia)

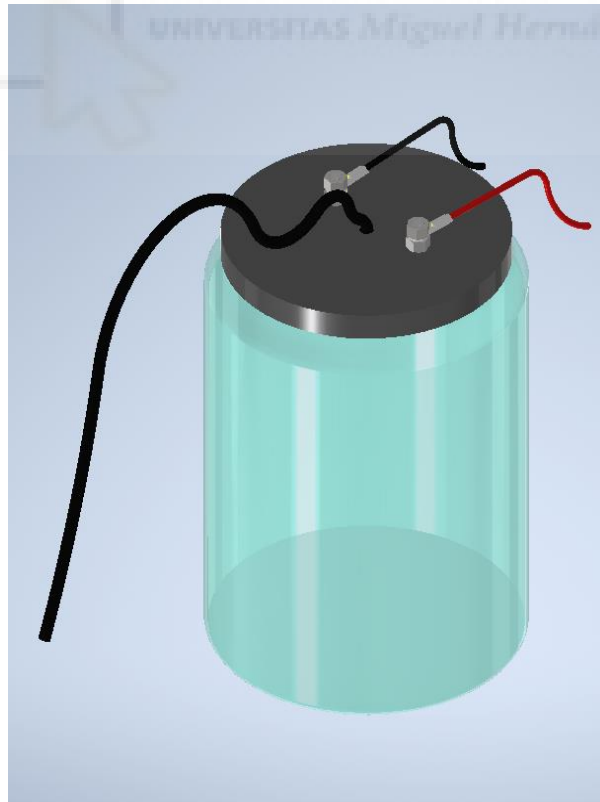


Ilustración 98: Subconjuntos 3D, subconjunto recipiente y conexiones (tonos realistas)

### 6.2.4.3 CONJUNTO GLOBAL

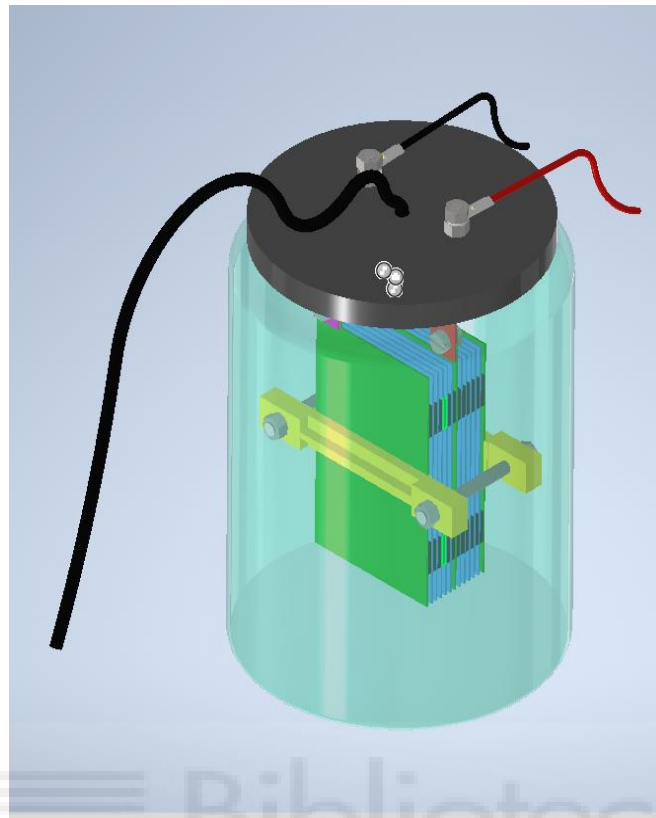


Ilustración 99: Conjunto 3D (tonos referencia)

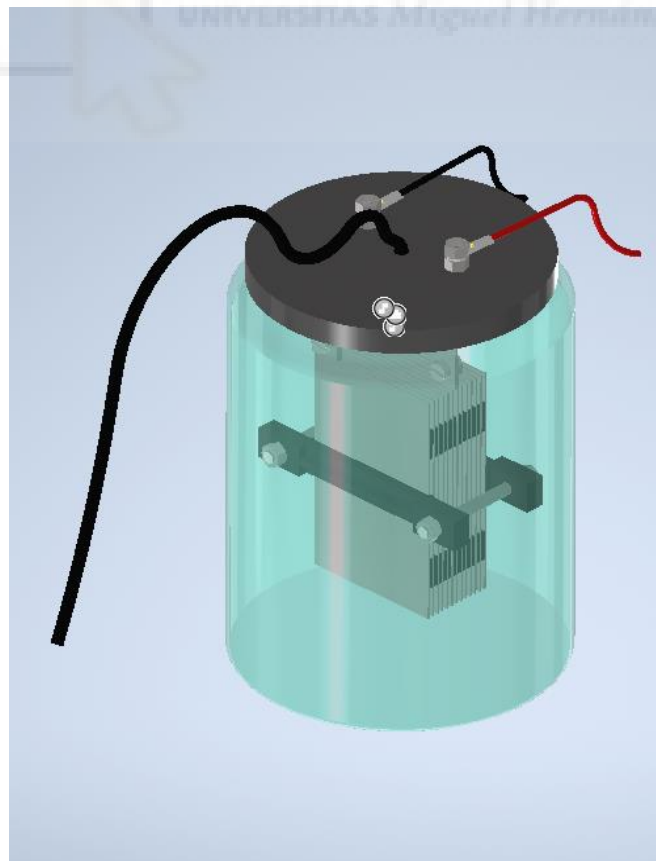
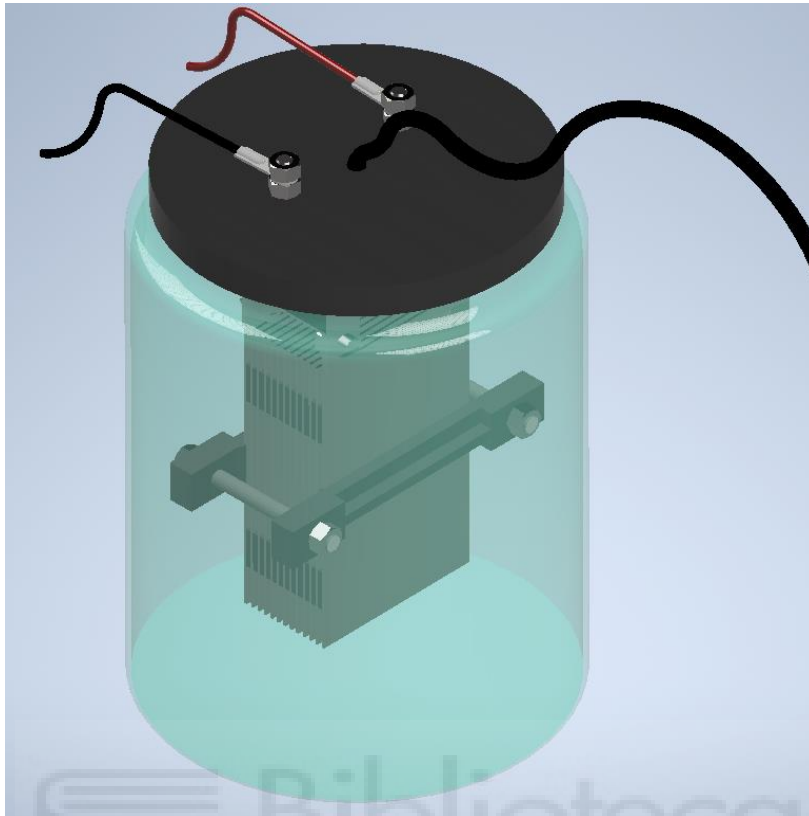


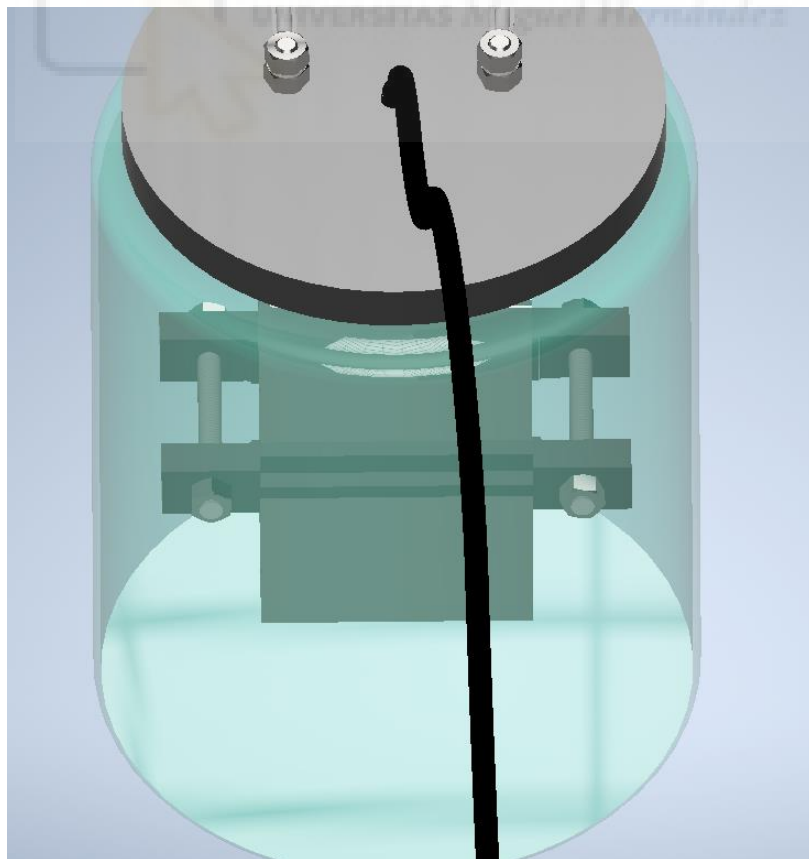
Ilustración 100: Conjunto 3D (tonos realistas)



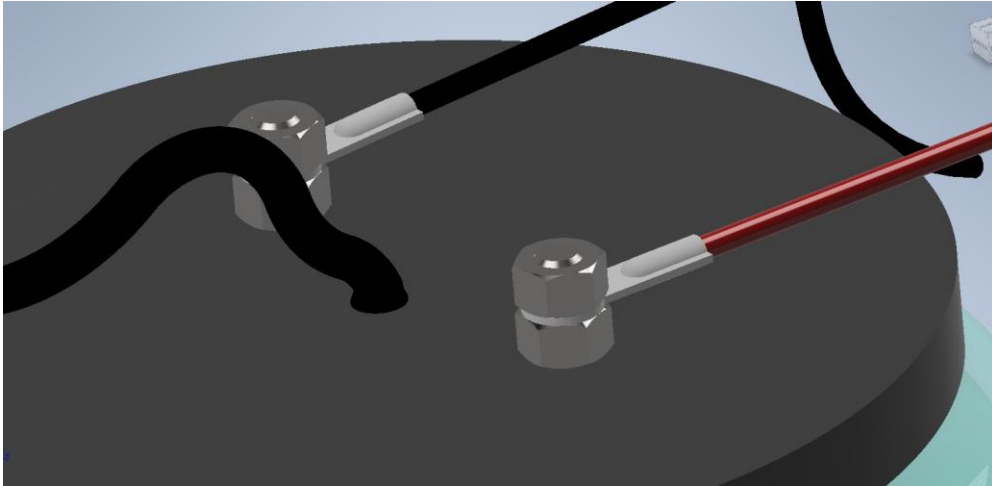
#### 6.2.4.4 IMÁGENES REALISTAS



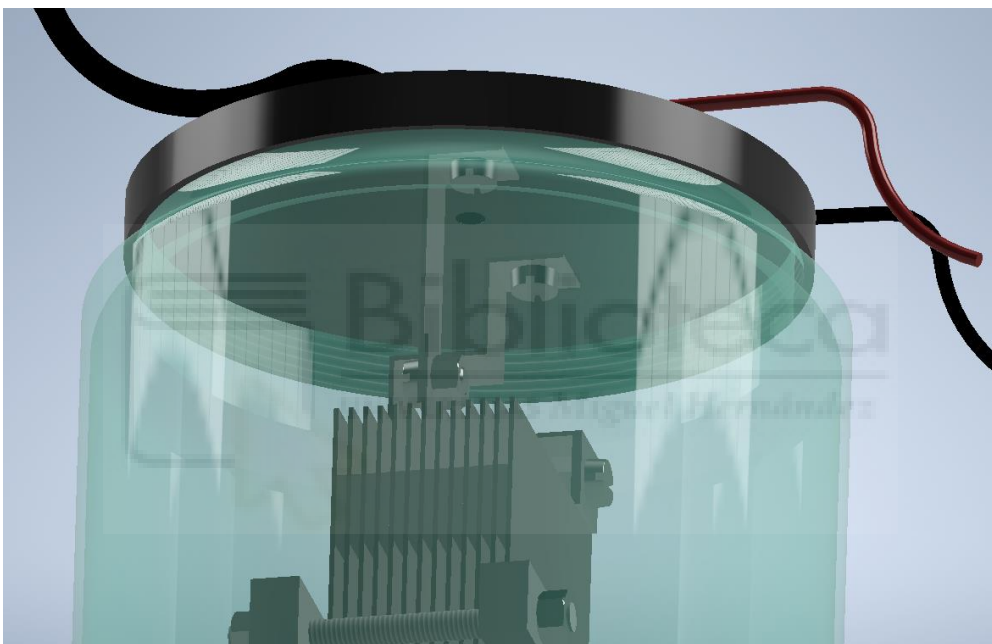
*Ilustración 101: Realismo 3D, plano general*



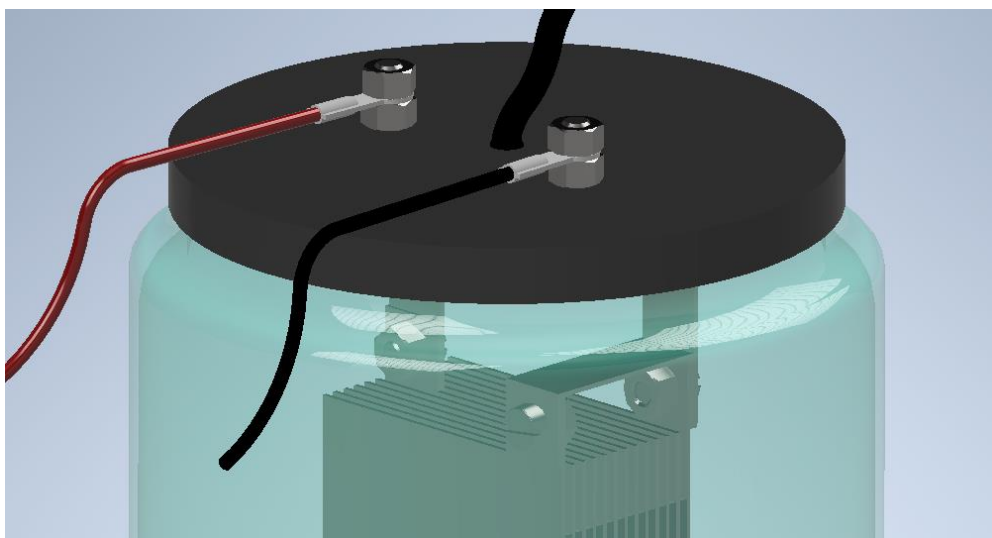
*Ilustración 102: Realismo 3D, plano picado*



*Ilustración 103: Realismo 3D, detalle conexiones*



*Ilustración 104: Realismo 3D, detalle sujeciones interiores*



*Ilustración 105: Realismo 3D, detalle conexiones placas*

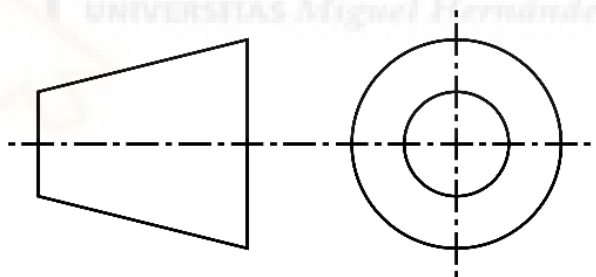
## 6.2.5 PLANOS

A continuación, se mostrarán los planos de los principales componentes de la celda, considerando como principales los elementos no comerciales realizados total o parcialmente mediante fabricación propia. La intención del aporte gráfico en forma de planos es ayudar a comprender mejor los aspectos espaciales y dimensionales de los elementos en cuestión.

Nuevamente cabe resaltar que los modelos representados a continuación pueden sufrir leves modificaciones en el diseño final si estas fuesen requeridas durante la optimización de la unidad.

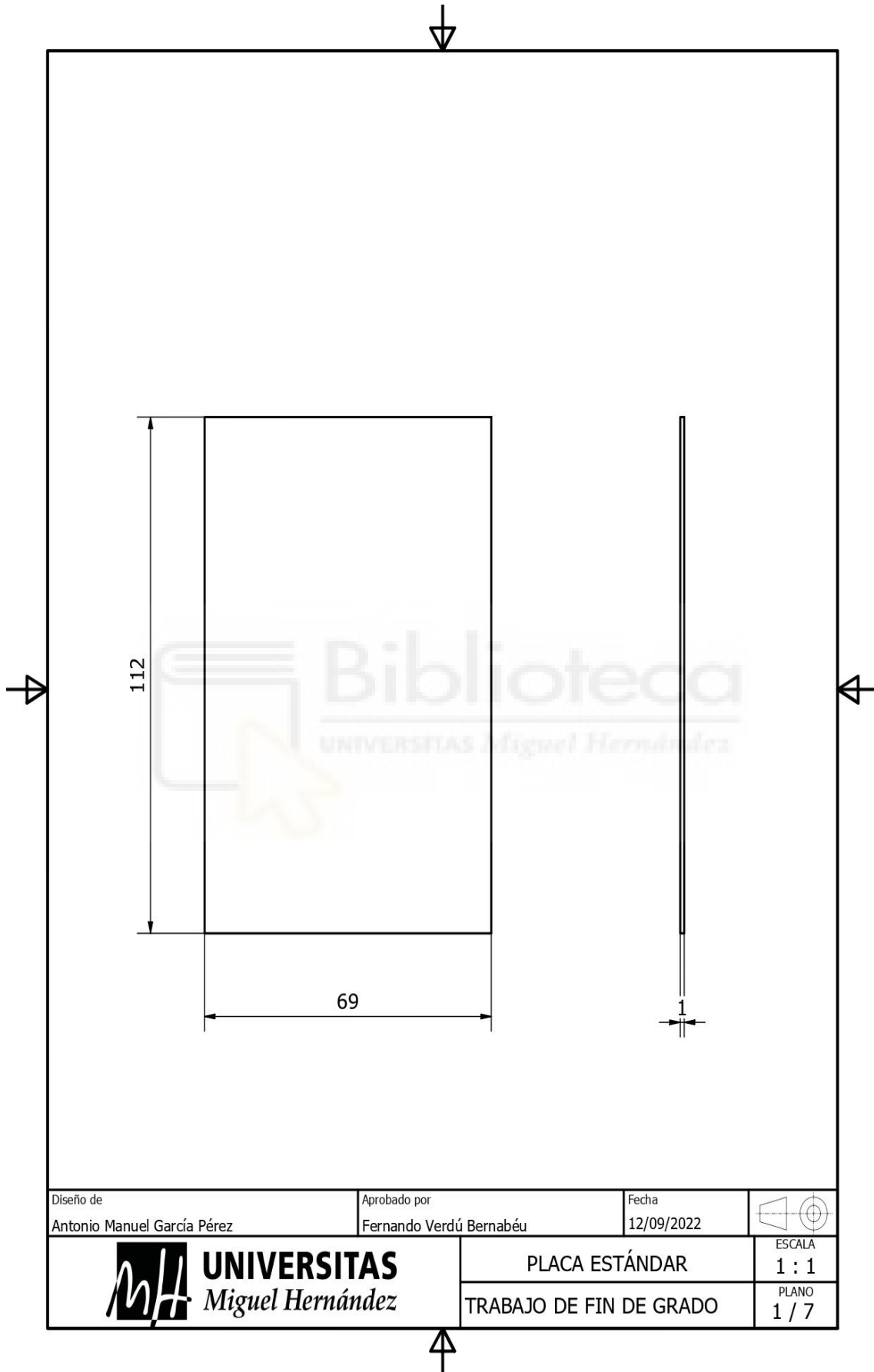
Consideraciones previas:

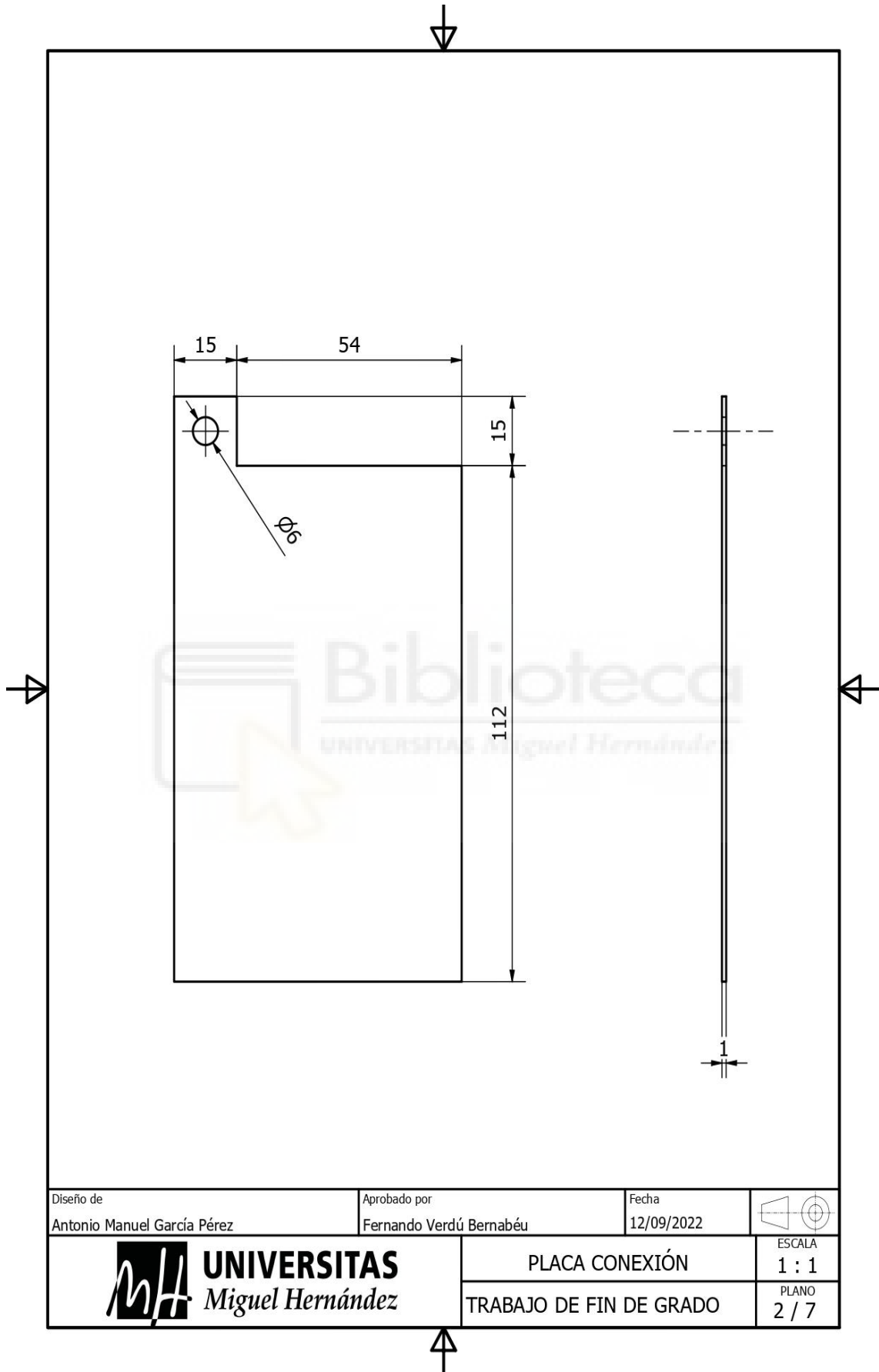
- La escala puede variar según los requerimientos de cada plano, siempre y cuando esta favorezca la visualización y/o comprensión dimensional de los elementos representados.
- Las cotas representadas son las reales empleadas en el modelo tridimensional y las que se emplearán como base en el modelo final.
- El sistema de vistas empleado es el europeo, esto se indica en la parte superior derecha del cajetín mediante el icono mostrado a continuación:

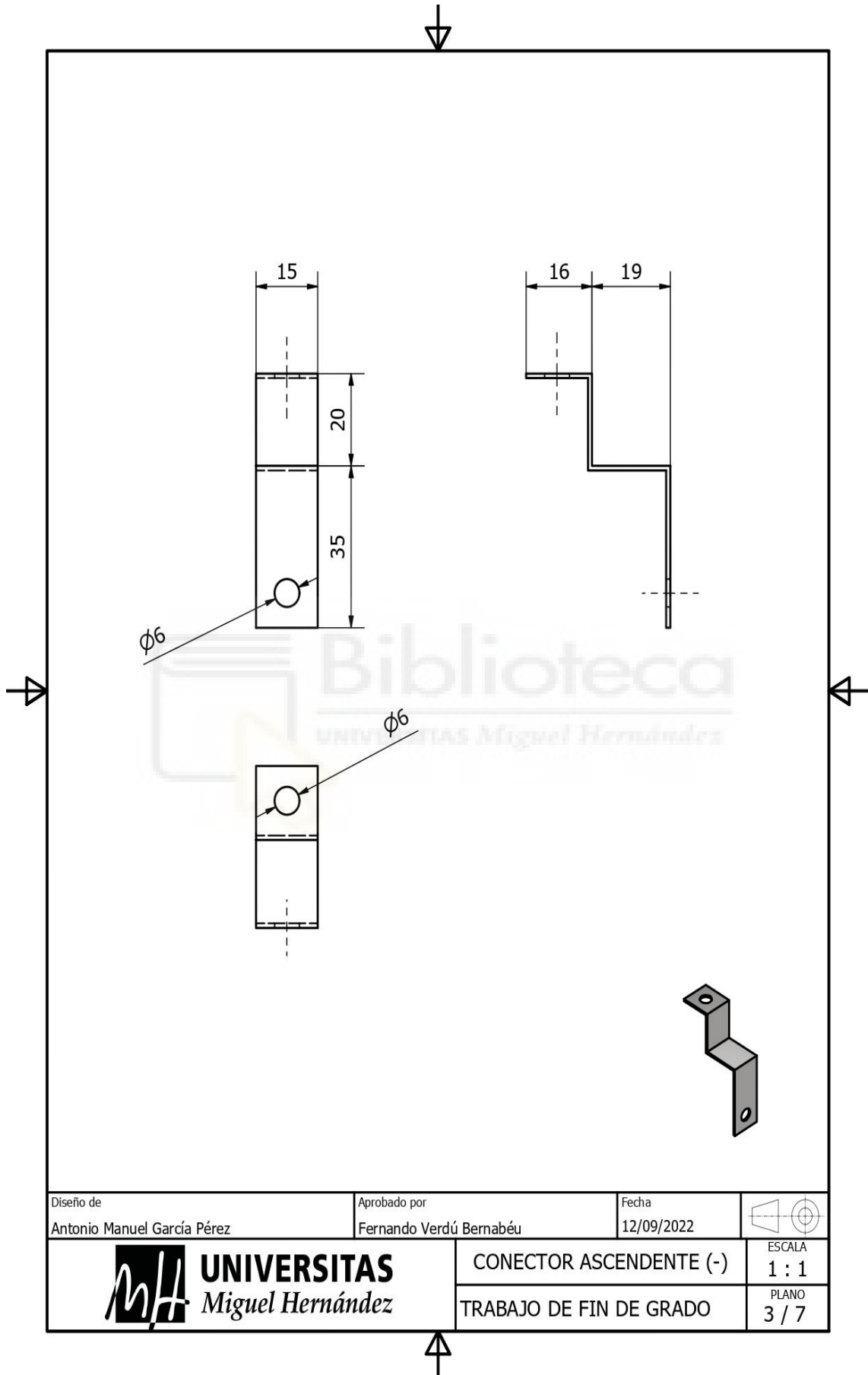


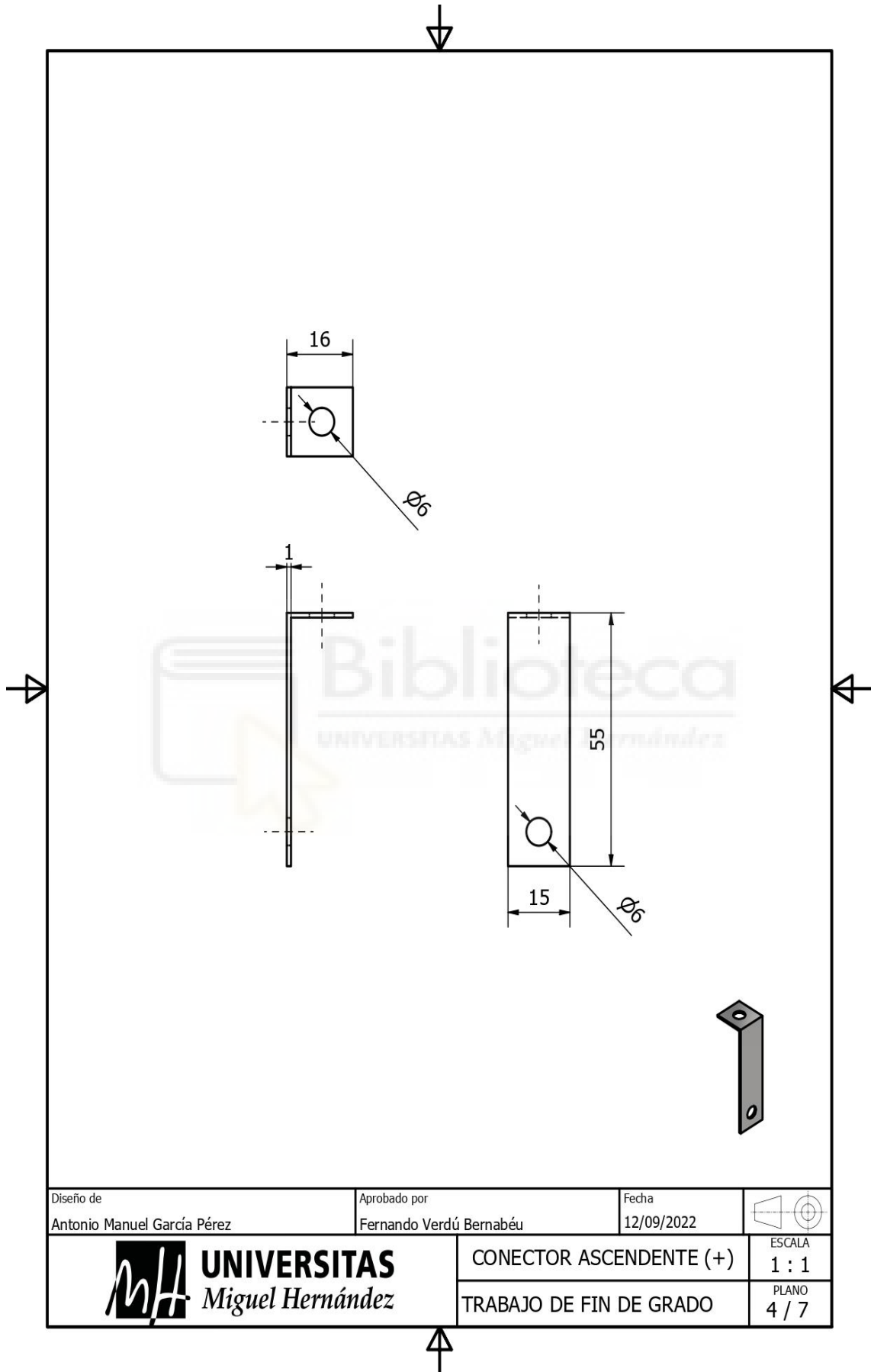
*Ilustración 106: Icono sistema europeo de vistas*

- La fecha mostrada en cada plano será la correspondiente a la última de las revisiones de cada uno de ellos.
- Los elementos generados a partir de cortes en chapa de acero carecerán de modelo tridimensional en sus planos, por considerarse estos innecesarios.
- Los productos estandarizados, comerciales o que carezcan de importancia dimensional no tendrán planos propios.
- Los planos mostrados a continuación no deberán tomarse como referencia única a la hora de construir una celda de hidrógeno ya que como se ha explicado anteriormente cada celda ha de optimizarse en base a diversos parámetros.



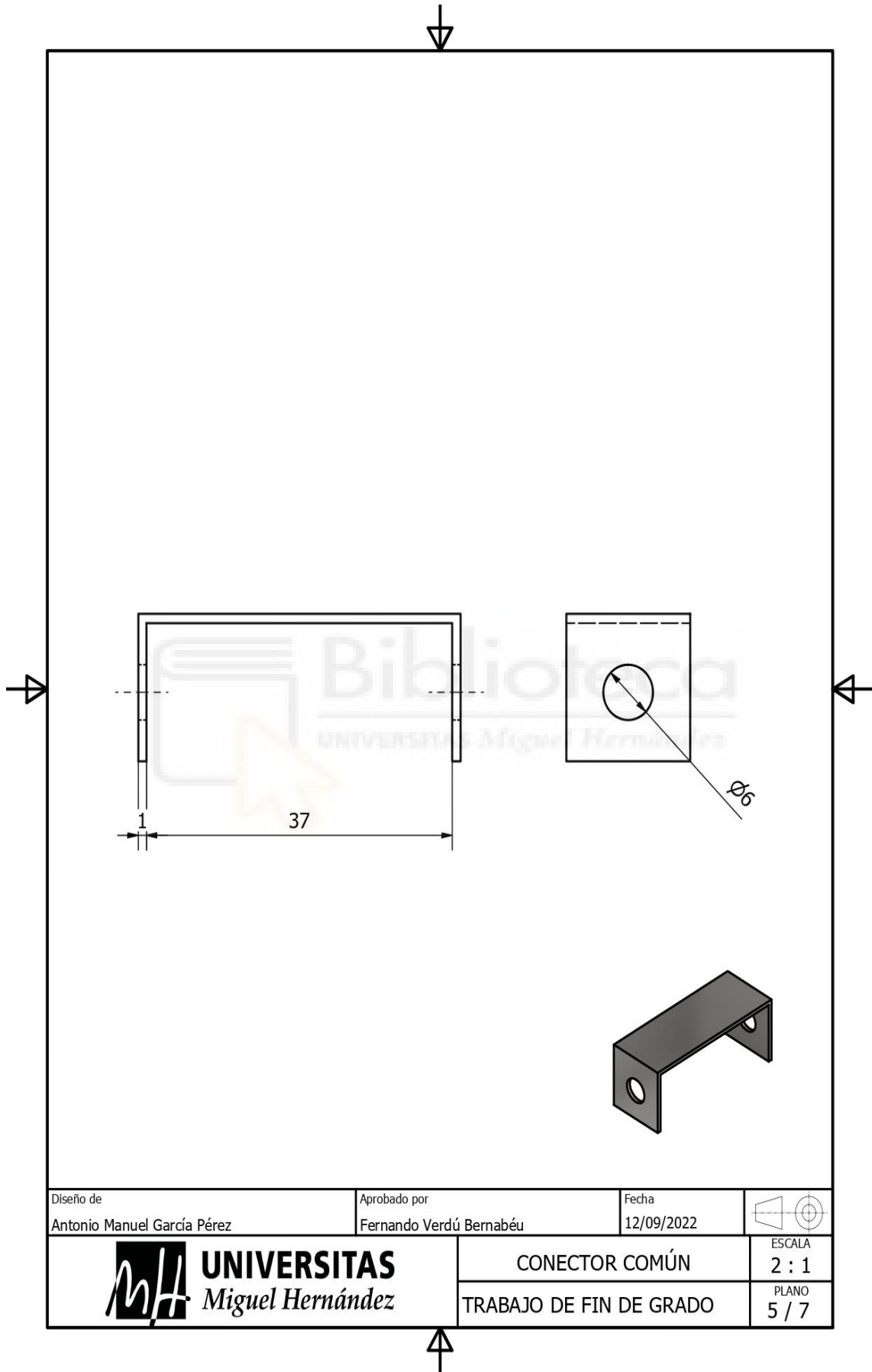




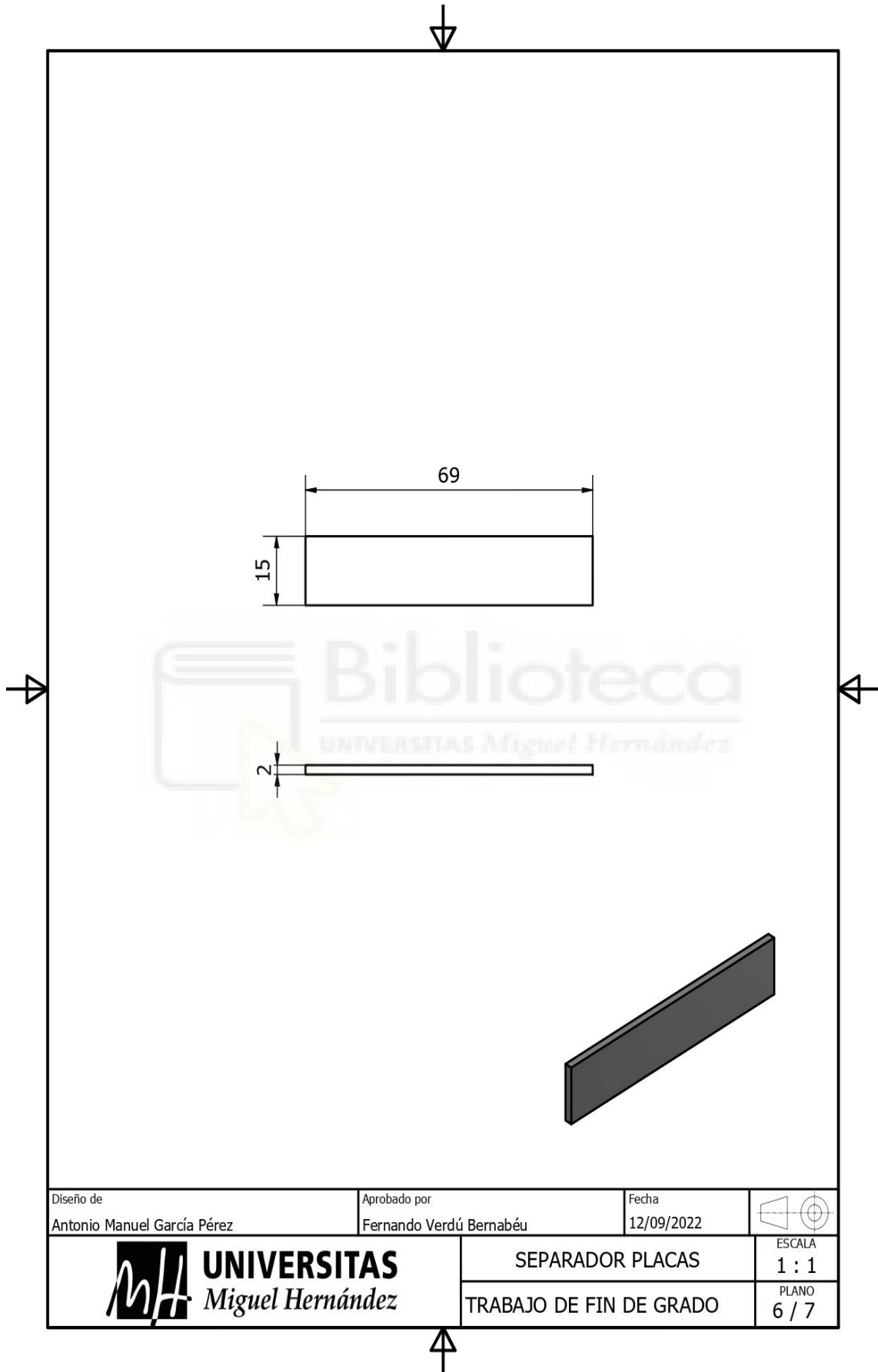


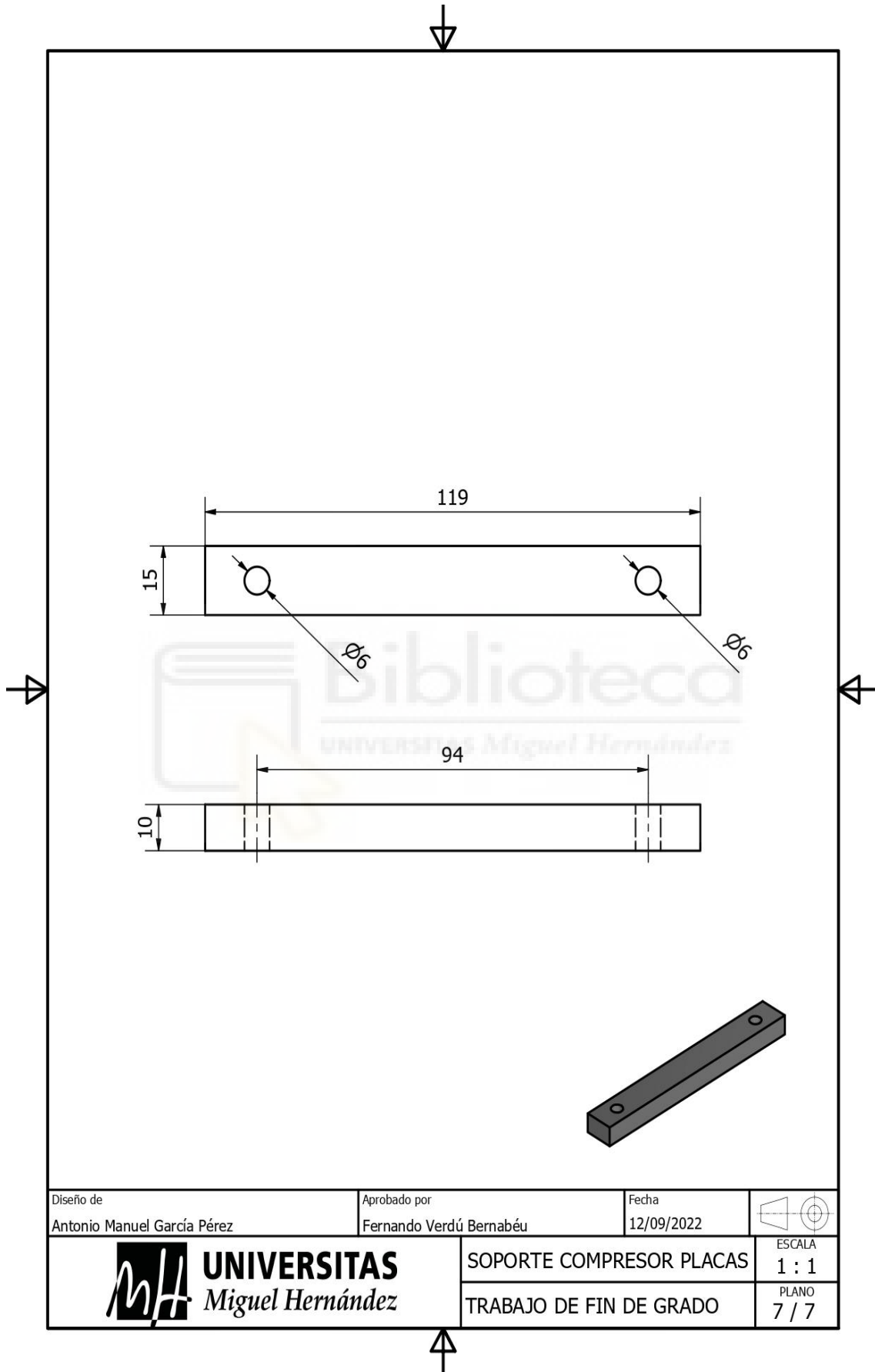
Diseño de Antonio Manuel García Pérez	Aprobado por Fernando Verdú Bernabéu	Fecha 12/09/2022	
<b>UNIVERSITAS</b> Miguel Hernández	CONECTOR ASCENDENTE (+)	ESCALA 1 : 1	
	TRABAJO DE FIN DE GRADO	PLANO 4 / 7	





Diseño de Antonio Manuel García Pérez	Aprobado por Fernando Verdú Bernabéu	Fecha 12/09/2022	
<b>UNIVERSITAS</b> Miguel Hernández	CONECTOR COMÚN		ESCALA 2 : 1
	TRABAJO DE FIN DE GRADO		PLANO 5 / 7





Diseño de Antonio Manuel García Pérez	Aprobado por Fernando Verdú Bernabéu	Fecha 12/09/2022	
<b>UNIVERSITAS</b> Miguel Hernández	SOPORTE COMPRESOR PLACAS	ESCALA 1 : 1	
	TRABAJO DE FIN DE GRADO	PLANO 7 / 7	

## 6.2.6 ENSAMBLAJE

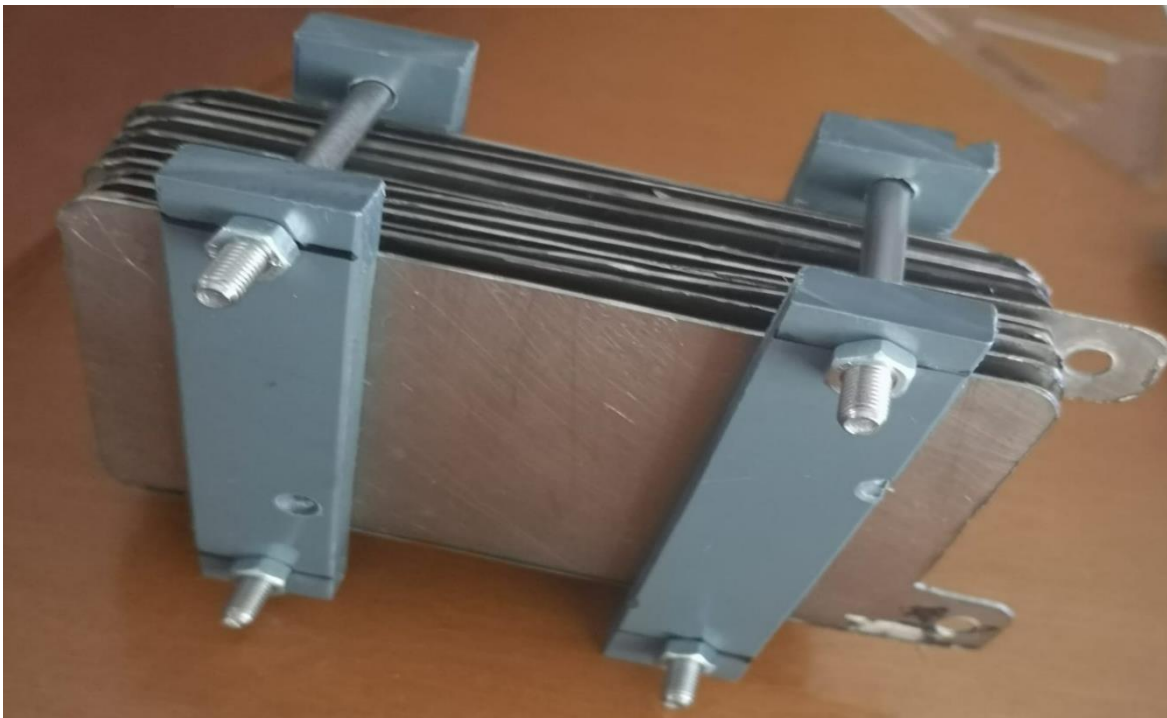
Tras la preparación de los materiales resulta clave ensamblarlos, comprobando a su vez que el conjunto queda según lo esperado y cumple los requerimientos preestablecidos.

En primer lugar, se aprovechan los soportes/conectores de la celda que ya se encuentran unidos y sellados en la tapa.



*Ilustración 107: Ensamblaje fase 1, tapa con soportes*

Teniendo esto ya preparado de la anterior fase, ahora solo ha de desenroscarse y extraerse la tapa con los respectivos soportes pudiendo así trabajar de un modo más cómodo, colocando ahora el núcleo de la celda que ya teníamos preensamblado.



*Ilustración 108: Ensamblaje, núcleo preparado*



*Ilustración 109: Ensamblaje fase 2.1, núcleo ensamblado*



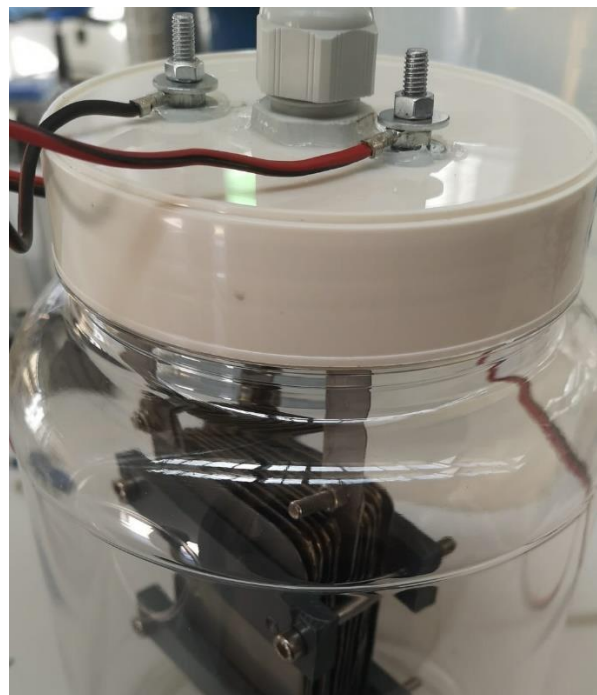
*Ilustración 110: Ensamblaje fase 2.2, núcleo ensamblado*

Ya teniendo el núcleo ensamblado a la tapa se comprueba que este está bien centrado respecto al tanque permitiendo así que exista en cualquier punto un volumen de agua entre el núcleo y el tanque, este ha de ser capaz de refrigerar la celda en su conjunto. Para esto resulta también imprescindible comprobar la estabilidad ya que, aunque vibre la celda el núcleo nunca debe entrar en contacto con las paredes por resultar esto peligroso.

Comprobado esto podemos ubicar el cableado de alimentación, prestando especial atención en no intercambiar el positivo con el negativo. Estos resultan ser fácilmente diferenciables ya que el negativo alimenta a dos placas y el positivo únicamente a una. Aprovechando la situación también colocaremos el conducto de salida de hidrógeno, ajustando los prensaestopas.



*Ilustración 111: Ensamblaje fase 3.1, conducto y cableado*



*Ilustración 112: Ensamblaje fase 3.2, conducto y cableado*

## 6.3 PUESTA EN MARCHA

### 6.3.1 PREPARACIÓN DEL CONTENIDO

Para poder poner en marcha la celda ha de prepararse la mezcla que se ubicará en su interior. Como bien se explicó al hablar del término clave de la conductividad, el agua no es para nada buena conductora de la electricidad por ello se le han de adicionar uno o varios elementos que permitan que esta conduzca la electricidad de forma sencilla. Una de las opciones más extendidas es la adición de cualquier tipo de sal que forme iones al disolverse en agua, siendo la cantidad de iones el parámetro determinante. A mayor número de iones mejor será la conductividad de la disolución.

Las sales convencionales generan problemas de corrosión y contaminación si se usan a largo plazo por esto se optó por emplear sosa cáustica o hidróxido de sodio (NaOH), este elemento a pesar de ser corrosivo no ataca al acero inoxidable presente en la celda. A su vez no se usará agua corriente por su gran mineralización, se empleará agua destilada, la cual permite trabajar sin precipitados durante grandes periodos de tiempo.

La sosa caustica fue difícil de conseguir en polvo por esto se compró en forma de lentejas y fue machacada con todas las precauciones necesarias hasta tener partículas del tamaño deseado para facilitar su disolución.

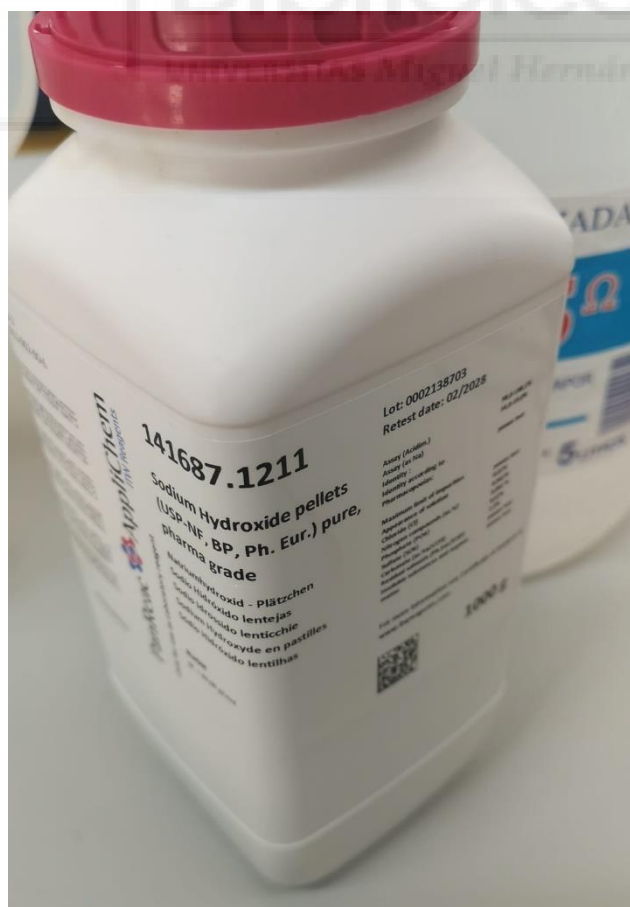


Ilustración 113: Lentejas de sosa cáustica o hidróxido de sodio (NaOH)



En primera instancia se planteó una mezcla al 2,1% en masa, esta no dio los resultados esperados por ello se varió la concentración de esta.



Ilustración 114: Agua destilada

Finalmente, la mezcla se realizó adicionando 16 g de sosa cáustica por cada litro de agua destilada, para propiciar una mejor disolución se fue mezclando litro a litro, agitando la mezcla hasta observar una uniformidad notable.

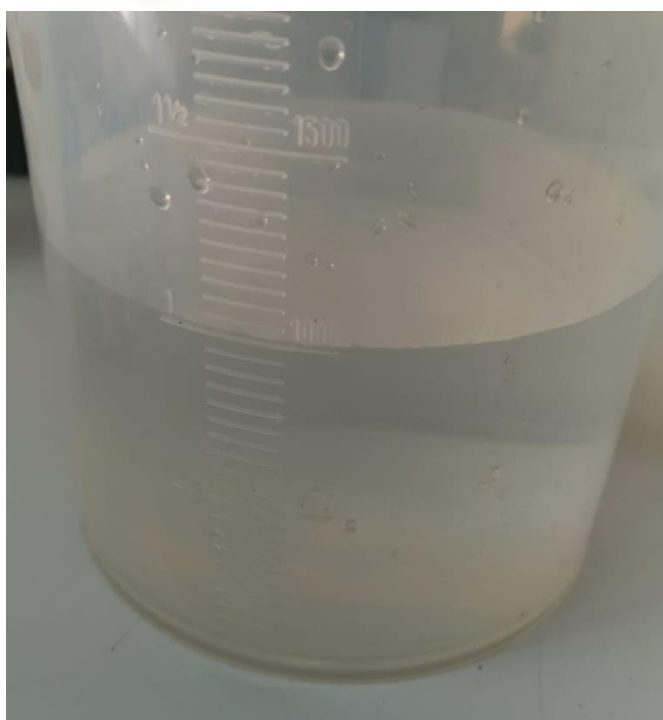


Ilustración 115: Mezcla litro a litro, agua destilada



*Ilustración 116: Pesaje de la sosa cáustica a adicionar.*



*Ilustración 117: Muestra de sosa cáustica*

Tras repetir este proceso en tres ocasiones tendremos listo el tanque para poder continuar con las posteriores etapas.



*Ilustración 118: Tanque lleno con disolución conductora*

### 6.3.2 CONEXIONES BÁSICAS

Tras llenar el tanque y preparar el cableado de alimentación resulta imprescindible conocer qué voltaje e intensidad es capaz de tolerar la celda, este tema ya ha sido mencionado en diversas ocasiones durante la redacción del presente documento, lo cual es claro indicador de su importancia.

En las primeras pruebas se instaló una fuente de 12V y 2,5A, estos parámetros bastante menores a los que se espera emplear en la experimentación, por andar lejos de la tolerancia teórica de la celda. Pero resulta imprescindible realizar una primera aproximación en busca de malas conexiones o cortocircuitos en el interior de la celda.



Ilustración 119: Fuente de alimentación 12V y 2,5A



Ilustración 120: Conexión de la fuente de alimentación 12V y 2,5A



Tras generar la conexión es hora de poner a prueba la celda activando la fuente de alimentación con especial atención en las temperaturas y los aromas que la celda desprenda.



*Ilustración 121: Primeros indicios de producción*

A los pocos segundos de la activación la celda logró polarizarse, comenzando en ese entonces la producción de oxígeno e hidrógeno. A priori, la producción era pobre pero muy útil ya que nos permite verificar que la celda funciona y que las placas siguen correctamente aisladas (no existe continuidad entre placas contiguas) como se verificó de forma previa al montaje con el multímetro o tester.



*Ilustración 122: Burbujas de hidrógeno*

Sumergiendo en un tanque de agua el manguito de salida puede observarse un leve burbujeo, la presión de salida es mínima a causa de la pobre producción.

Independientemente de la fuente la llegada de corriente a la celda se realizará del mismo modo, lo que variará es la fuente o la combinación de estas.

### 6.3.3 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Comprobado el funcionamiento de la celda es hora de optimizar la generación variando los parámetros de alimentación, al carecer de fuentes variables capaces de alcanzar de forma independiente los valores deseados se optó por ir probando cada una de las fuentes fijas disponibles. Tratando así de evitar la combinación de varias fuentes en paralelo o serie.

En primer lugar, se empleó una fuente de ordenador, la cual permitió probar varias combinaciones de voltaje e intensidad por presentar diversas salidas con distintas combinaciones de dichos parámetros.



Ilustración 123: Fuente de alimentación ordenador

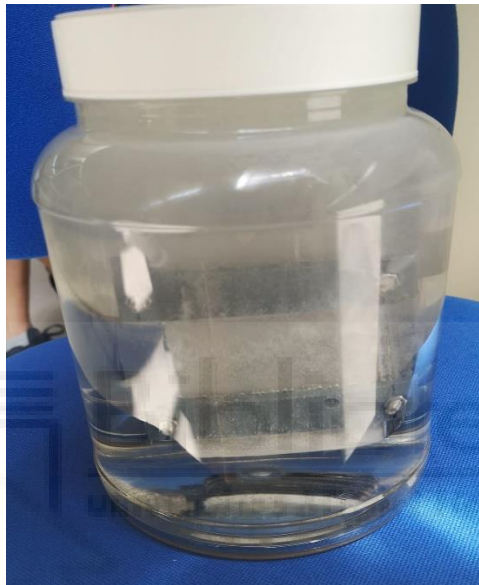


Ilustración 124: Ficha técnica fuente de alimentación ordenador



Tras probar todas las combinaciones se observó que la que mejor resultados arrojó fue la de 12V y 18A, la cual fue soportada por la celda sin apenas calentarse. Por tanto, el aumento de área llevado a cabo en las placas si estaba surgiendo un efecto positivo. Estando, trabajando ya de inicio lejos de los parámetros de las primeras versiones de entre 12-13V y 9A.

Dado que el incremento de área útil de las placas fue de 80,139%, podemos ver que dicho incremento no presenta una relación lineal con el voltaje y/o la intensidad tolerada, sino que varían de forma exponencial. Es decir, a más variación mayor importancia va presentando el cambio.



*Ilustración 125: Producción de hidrógeno con 18A y 12V*



*Ilustración 126: Salida de hidrógeno con 18A y 12V*

Como la presión era aceptable se colocó el elemento metálico de doble racor que se empleará en la instalación final, a modo de prueba realista, sumergiendo más o menos dicho elemento en función de la resistencia estimada a vencer en la instalación final, la cual no resultará ser mucha.

### 6.3.4 ÚLTIMOS AJUSTES

Dado que la celda tolera voltajes e intensidades por encima de lo esperado, se emplearán diversas fuentes conectadas en paralelo ya que lo que se pretende es aumentar la intensidad y no el voltaje, el cual viene limitado por la caída de tensión deseada entre placas.

Para comenzar resulta imprescindible comprobar que la sección de cable inicial resulta suficiente, tras la negativa de esta comprobación se incrementó la sección en busca de una menor resistencia y por tanto temperatura.



Ilustración 127: Conexión en paralelo de dos fuentes regulables



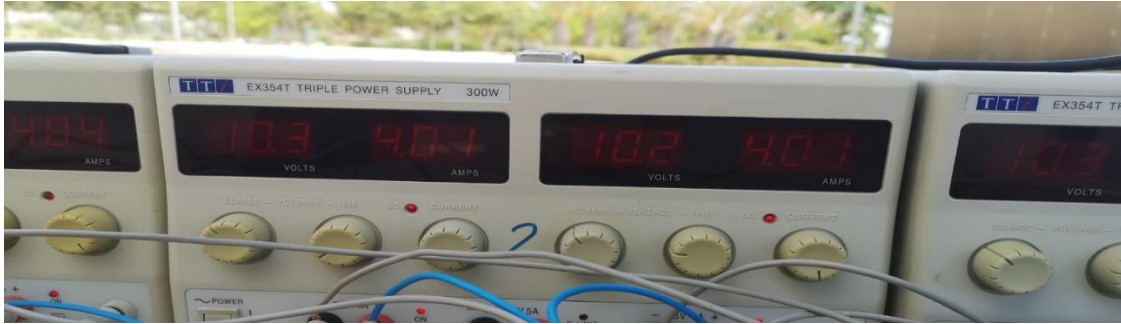
Cada una de las fuentes presentan una regulación de hasta 35V a 4A, esto no es del todo cierto ya que en función de la resistencia la fuente nos aportará uno u otro voltaje a esos 4A. Conectadas ambas fuentes se logra un total de cuatro pares de bornes, por presentar cada fuente dos módulos independientes. Por tanto, con la instalación de la imagen podríamos obtener un máximo teórico de 35V a 16A, el cual en realidad resultó ser de 8V a 16A.

En este caso se presentaba un escenario más desfavorable que con los valores de la fuente de ordenador por ser estos nuevos parámetros menores a los obtenidos antes, por lo que comprobada la efectividad del montaje en paralelo se optó por emplear una tercera fuente.



*Ilustración 128: Conexión tres fuentes en paralelo*

Dada la duplicidad de módulos de cada fuente, tenemos un total de 6 módulos de alimentación los cuales aportarán 24A y un voltaje máximo teórico de 35V. Nuevamente este voltaje dependerá de la resistencia global del circuito, componiéndose el mismo de la instalación y la propia celda.



*Ilustración 129: Parámetros resultantes de la instalación de 3 fuentes en paralelo*

Tras realizar las distintas conexiones y poner todo en funcionamiento se obtuvo un aporte final de 24A y 10,3V, dado que nos encontramos ante una intensidad 8A por encima de la máxima comprobada anteriormente. Entramos por tanto en una nueva fase de comprobación, en estas fases hay que prestar especial atención a la temperatura de la celda y del cableado como se ha mencionado anteriormente.



*Ilustración 130: Producción de hidrógeno con 3 fuentes en paralelo*

Como se aprecia en la imagen la producción de hidrógeno resulta ser muy rica, generando un burbujeo constante y una cantidad de hidrógeno bastante considerable. Dado el elevado grado de generación entra en juego un nuevo factor a tener en cuenta, la presión. Para asegurar un flujo constante de hidrógeno que asegure una presión regular en el tanque se ha optado por colocar una bomba a modo de impulsión de hidrógeno.



*Ilustración 131: Bomba impulsión hidrógeno*

Este elemento se ubica en la impulsión estando más próximo de la boca de salida que del propio tanque evitando así la posibilidad de aspirar gotas de agua que pudiesen alcanzar el motor en la instalación definitiva y presenta una doble funcionalidad ya que no únicamente impulsa al hidrógeno sino que al impulsar este junto al oxígeno presente ayuda a refrigerar el tanque.



Tras dejar funcionar el sistema bajo las condiciones impuestas por la fuente durante periodos prolongados de tiempo se observa que la temperatura máxima alcanzada en el interior de la celda es de unos 50°C.



*Ilustración 132: Control de temperatura de funcionamiento celda funcionando en vacío*

Esta temperatura no resulta dañina para los componentes por lo que se puede concluir el primer ensayo ajeno a la instalación final como favorable, dando así por válido el sistema y los parámetros establecidos para el mismo.

## **7 EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN**



## 7.1 EQUIPOS DE MEDIDA

### 7.1.1 TERMOPAR

Se han instalado dos termopares en el generador, uno en la admisión y otro en el circuito de refrigeración concretamente a la salida del bloque. El termopar ubicado a la salida del bloque pretende servir como referencia entre ensayos, detectando posibles anomalías.

Estos son monitorizados mediante un display de entrada múltiple simultánea, capaz de leer dos señales diferentes:



Ilustración 133: Equipos de medida, medidor TESTO 922 0560 9221

## 7.1.2 MEDIDORES DE POTENCIA

La energía suministrada por el generador a los consumos habrá de medirse mediante el empleo de un vatímetro. En el caso del consumo de la celda emplearemos un medidor eléctrico multifunción, capaz de indicar parámetros como el consumo en kWh, pero el parámetro más relevante vuelve a ser la potencia instantánea consumida.



Ilustración 134: Equipos de medida, medidor multifunción



Ilustración 135: Equipos de medida, vatímetro industrial

En ambos casos los consumos se conectarán mediante el uso de una regleta unificando así todos estos en cada uno de los equipos de medida.

### 7.1.3 CRONÓMETRO

Para los ensayos se ha estipulado un tiempo de 5 minutos, los cuales han de ser cronometrados con rigurosidad, por esto se han empleado cronómetros de alta precisión.



*Ilustración 136: Equipos de medida, cronómetro de alta precisión*

## 7.1.4 SONDA DE GASES

Para analizar los gases de escape se emplea un lector de valores específico para motores de caldera o grupos electrógenos, dicho dispositivo puede analizar diversos tipos de combustión indicando el combustible empleado en la misma.



Ilustración 137: Equipos de medida, analizador de gases de escape

Este equipo está dotado de un módulo empleado como impresora, pudiendo así pasar a papel los resultados obtenidos con solo pulsar un botón.



Ilustración 138: Equipos de medida, mini impresora testo



## 7.1.5 PISTOLA ESTROBOSCÓPICA

El generador no cuenta con tacómetro por lo que para obtener el régimen de giro han de emplearse equipos externos, existen pistolas que indican las revoluciones de forma directa, pero estas resultan ser caras. Es por esto y por la disponibilidad por lo que se ha optado por emplear una pistola estroboscópica convencional, apuntando la misma hacia el volante de inercia y tomando como referencia un tornillo de sujeción de este.



*Ilustración 139: Equipos de medida, pistola estroboscópica*

Esta presenta un ajuste poco preciso que permite acercar las revoluciones a las esperadas o simplemente generar una primera estimación, ya visto que las revoluciones no resultan distar demasiado a la de los pulsos de luz se pasa a emplear los controles de ajuste fino que permiten variar las revoluciones de 10 en 10.

### 7.1.6 ESTACIÓN METEREOLÓGICA PORTATIL

A la hora de realizar ensayos resulta clave conocer las condiciones ambientales, en especial las de temperatura y humedad. A la hora de emplear hidrógeno no podrán darse menores temperaturas que cuando este no se use, por ser una menor temperatura favorecedora para el proceso de combustión. Por esto deberán darse las misma o mayor temperatura a la hora de implementar el hidrógeno en el generador.



Ilustración 140: Equipos de medida, estación meteorológica portátil

### 7.1.7 CONTADOR CONSUMO GLOBAL COMBUSTIBLE

Para controlar los consumos se ha optado por aprovechar un marcador analógico de consumo de combustible. Aprovechando este sin necesidad de modificaciones, tomando una fotografía del valor al comienzo y trascurridos los 5 minutos del ensayo.

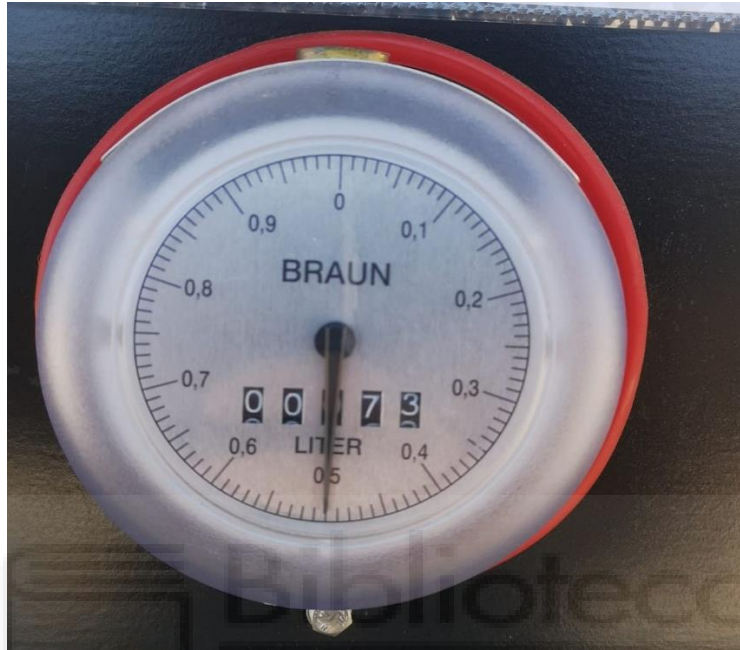


Ilustración 141: Equipos de medida, inicio contador combustible

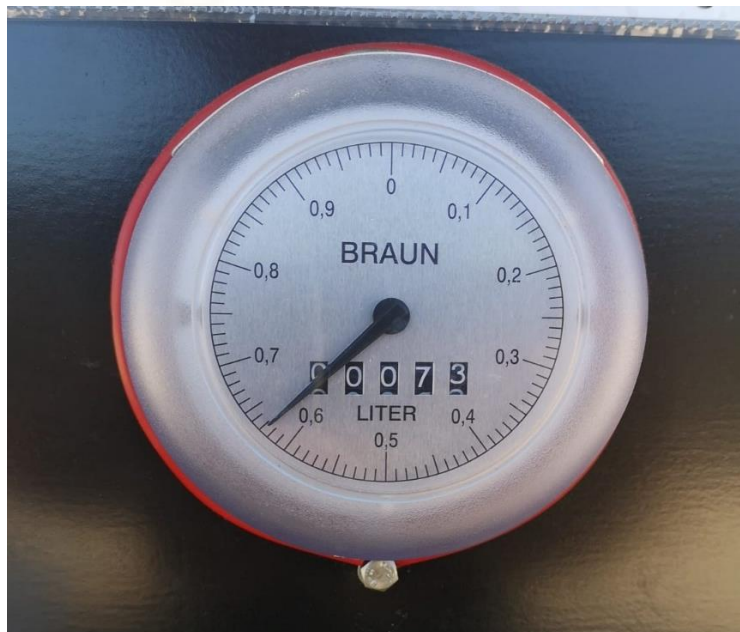


Ilustración 142: Equipos de medida, final contador combustible

Teniendo por tanto ambas instantáneas solo habrán de restarse los valores de consumo, extrayendo así el consumo en unidades de litro por cada 5 minutos de ensayo.



## **8 FASE EXPERIMENTAL**



## 8.1 INSTALACIÓN DEFINITIVA

Estudiados los elementos y su efectividad de forma independiente resulta conveniente generar el montaje definitivo, este será el empleado en la experimentación.

En primer lugar, se preparará el manguito de admisión que une el filtro de aire con la propia admisión, al ser un manguito de goma reforzado con fibras lineales interiores este puede ser taladrado sin problemas de ajuste.



*Ilustración 143: Taladrado directo sobre manguito de admisión*

Para poder retirar la viruta del interior del manguito este será desmontado retirando su abrazadera de sujeción.



*Ilustración 144: Desmontaje manguito admisión fase 1*



*Ilustración 145: Desmontaje manguito admisión fase 2*

La inserción no presenta holguras ni fugas, por tanto, solo queda comprobar que el punto de inyección de hidrógeno queda centrado respecto a la circunferencia interior del conducto.



*Ilustración 146: Comprobación interior punto de inyección manguito*

## TFG - SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDROGENO EN UN GENERADOR DIESEL

La localización del punto de inyección resulta estar más próximo del filtro de aire que de la admisión, por presentar esta segunda zona puntos calientes que podrían generar una llama en caso de accidente, pudiendo esta alcanzar la celda a contraflujo. Al no presentar llama directa la celda no requiere de sistema antirretorno de llama, pero no por esto han de olvidarse las precauciones básicas sobre todo en los casos en que no se perjudica al funcionamiento por estar del lado de la seguridad.

Ya considerado esto se procederá a reubicar el manguito en su ubicación original e insertar el conducto de aporte de hidrógeno, este será insertado a presión por no tener que resistir elevadas presiones, la canalización de aporte presenta un diámetro interior más que suficiente para no generar sobrepresiones ni cuellos de botella.

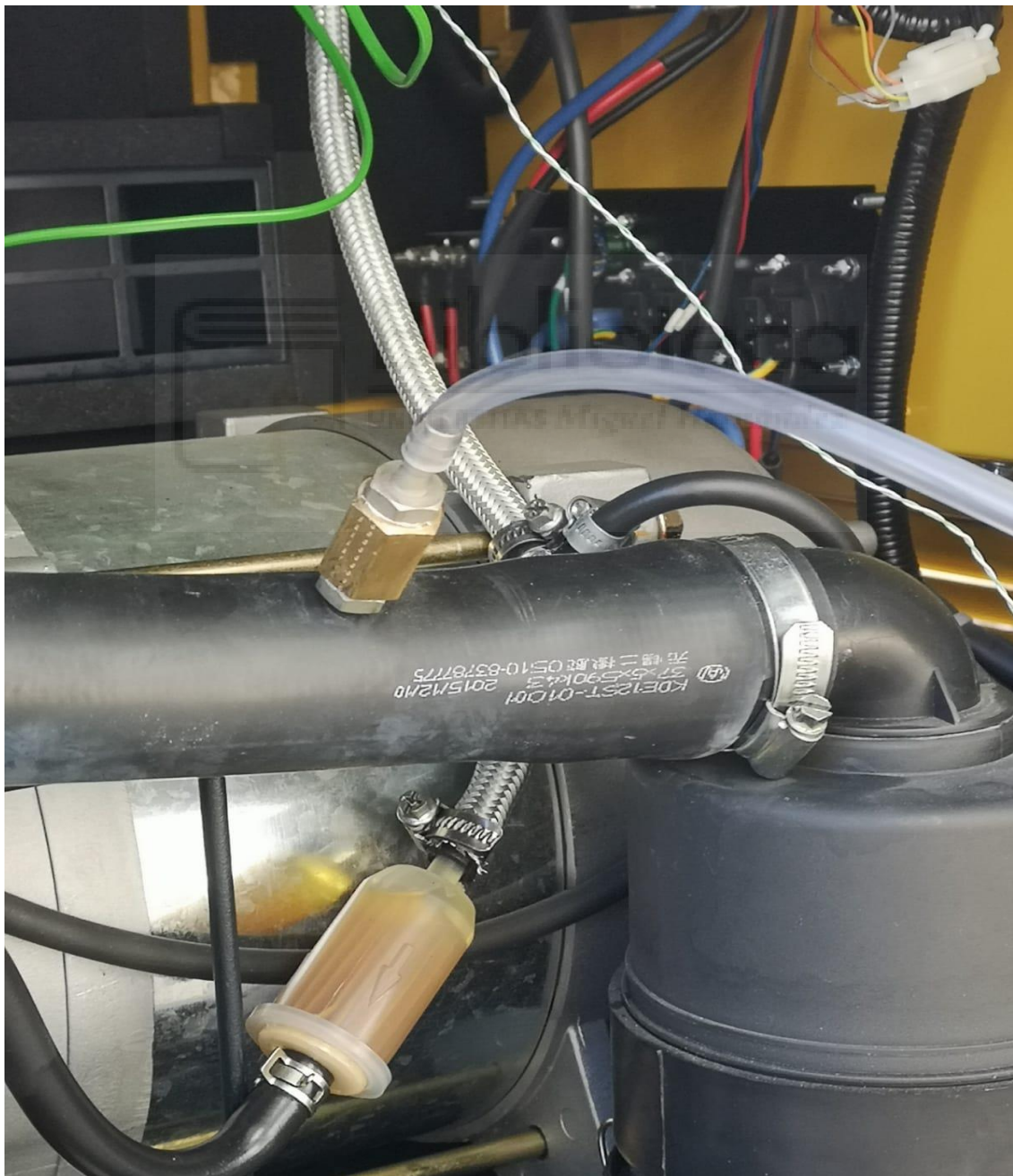


Ilustración 147: Sistema de inyección de hidrógeno



Para generar ensayos sin hidrógeno el conducto se bloquea con un elemento prisionero, que funciona mediante roscado manual, en lugar de presentar un tornillo con cabeza convencional presenta una cabeza con un moleteado para que no se resbale al apretarlo manualmente.



*Ilustración 148: Bloqueo inyección hidrógeno*

Este elemento evita que entre aire atmosférico sin pasar por el filtro, ya que dejando este conducto libre no entraría hidrógeno de la celda pero sí partículas indeseadas del ambiente, la cual cosa no resulta tolerable en una instalación de estas características.

## 8.2 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se dividirá en dos fases diferenciadas, una primera sin hidrógeno y otra con inyección forzada de hidrógeno. Ambas fases compartirán el procedimiento por lo tanto a continuación se irá explicando en detalle dicho procedimiento.

Etapas y pasos de la experimentación:

1. Puesta en marcha: En primer lugar, se pondrá en marcha el generador dejando que este se establezca en un rango de revoluciones y una temperatura del refrigerante. En caso de requerirse inyección de hidrógeno se suministrará corriente directa desde la red a la celda, esta será cuantificada para poder generar estudios de rentabilidad posteriormente.
2. Ensayos a realizar: En primer lugar, se realizará un ensayo en vacío es decir no se conectarán consumos al generador dejando que este trabaje en su rango estable de forma libre. Posteriormente se conectarán dos estufas, cada una de ellas con tres niveles de potencia, y se repetirá el ensayo descrito a continuación para las combinaciones 1-1 (ambas al mínimo), 2-2 (ambas a media potencia) y 3-3 (ambas al máximo), con y sin hidrógeno.

Por tanto, se realizarán ocho ensayos distintos del siguiente modo:

- Sin hidrógeno: Vacío, consumos al mínimo, consumos a media potencia y consumos a nivel máximo.
  - Con hidrógeno: Vacío, consumos al mínimo, consumos a media potencia y consumos a nivel máximo.
3. Procedimiento de ensayo: El procedimiento a realizar consta de una secuencia de pasos claramente definidos, estos son los descritos a continuación.
    - 1) Clima: Se toman los datos de temperatura y humedad de la estación meteorológica.
    - 2) Inicio: Se toma una fotografía del contador de consumo y se inicializa la cuenta del cronómetro.
    - 3) Gases de escape inicio: Se toma un análisis de los gases de escape al inicio, empleando en analizador de humos y se imprimen los datos.
    - 4) Régimen de giro: El régimen de giro es un indicador clave ya que obtener un menor régimen de giro supondrá un menor desgaste de los elementos móviles del motor, lo cual es una gran ventaja. Para medir esto se emplea una pistola estroboscópica, que nos permitirá conocer el de giro de forma bastante fiable.
    - 5) Consumo de las estufas: Observando el vatímetro se obtiene y anota el consumo en W de las estufas (en caso de estar en vacío este será nulo).



- 6) Consumo de la celda de hidrógeno y la bomba de impulsión: En caso de estar ensayando con hidrógeno la celda y su bomba estarán consumiendo de la red, la energía consumida resultará clave a la hora de generar conclusiones por esto se consultará el equipo de medida al que se conecta la regleta que alimenta las diversas fuentes de alimentación obteniendo así el valor de la energía en Wh.
- 7) Temperaturas de funcionamiento: A la hora de conocer si un motor funciona correctamente el indicador más claro es la temperatura, ya no tanto la temperatura del bloque o de un punto concreto, sino la de cualquier punto del circuito de refrigeración, ya que lo importante es tener una referencia que nos permita detectar anomalías y no tanto un valor concreto. En este tipo de ensayos resulta imprescindible controlar las temperaturas, ya que de no detectarse una anomalía los daños podrían ser irreparables. En este caso los puntos seleccionados serán la entrada de aire de admisión y la salida de agua de refrigerante del bloque.
- 8) Gases de escape final: Se toman nuevamente los datos referentes a los gases de escape, del mismo modo que se hizo antes.
- 9) Final: Se toma una nueva imagen del contador de consumo y se finaliza la cuenta a los 5 minutos, dando por concluido el ensayo.
- 10) Comprobación: Si el ensayo se ha realizado con hidrógeno tras el ensayo ha de sacarse el manguito transparente y sin apagar la celda ha de colocarse este en un recipiente con agua y jabón generando así burbujas de hidrógeno, ya generadas un par de pequeñas burbujas se aleja el recipiente y se detonan controladamente dichas burbujas, a modo de comprobación de que la celda no ha dejado de funcionar. Si la detonación se produce se dará por válido el anterior ensayo.



*Ilustración 149: Comprobación final ensayo*

## 8.3 DATOS CLAVE EXTRAIDOS DE LOS ENSAYOS

### 8.3.1 SIN HIDRÓGENO

#### 8.3.1.1 EN VACÍO

ENSAYOS	SIN HIDRÓGENO
	En vacío
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	32,1
Temperatura agua salida (°C)	60
Régimen de giro (rpm)	1286
Potencia consumos (W)	0
Potencia celda + impulsión (W)	0
Temperatura ambiente (°C)	33
Humedad ambiente (%)	31
Valor contador consumo inicial (litros)	73,5
Valor contador consumo final (litros)	73,6275
Consumo combustible (litros)	0,1275

Se adjuntan las imágenes del contador de consumo, estas no se aportarán en otros ensayos por ser obtenidas siempre del mismo modo:

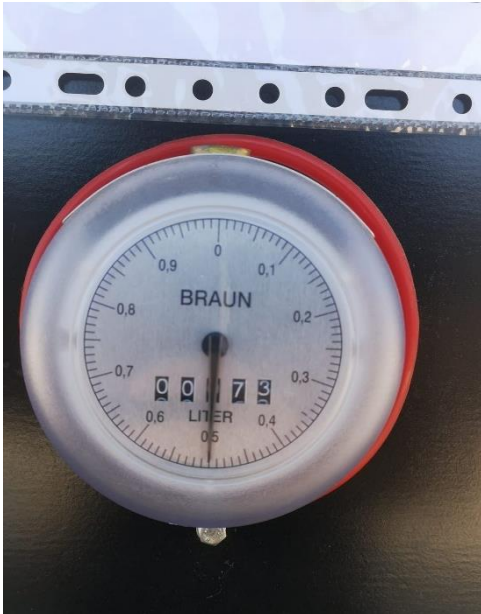


Ilustración 150: Lectura consumo 1.1

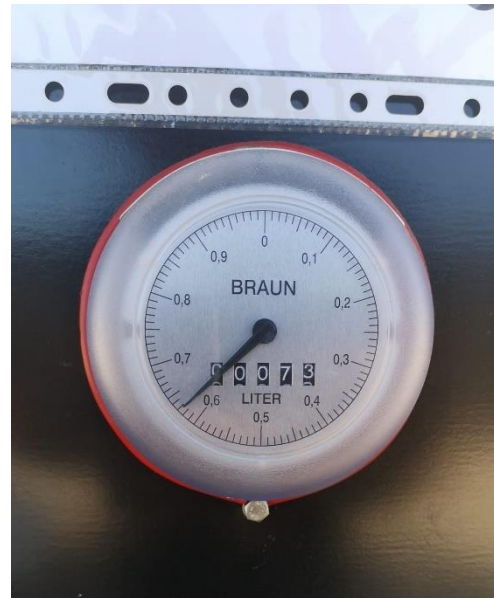


Ilustración 151: Lectura consumo 1.2

El consumo del ensayo (5 minutos) será la diferencia entre ambos valores.



Ilustración 152: Elementos de consumo empleados en el ensayo

### 8.3.1.2 NIVEL DE CARGA 1

ENSAYOS	SIN HIDRÓGENO
	Nivel 1
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	32,1
Temperatura agua salida (°C)	70,2
Régimen de giro (rpm)	1852
Potencia consumos (W)	1790
Potencia celda + impulsión (W)	0
Temperatura ambiente (°C)	33
Humedad ambiente (%)	29
Valor contador consumo inicial (litros)	73,9
Valor contador consumo final (litros)	74,048
Consumo combustible (litros)	0,148

### 8.3.1.3 NIVEL DE CARGA 2

ENSAYOS	SIN HIDRÓGENO
	Nivel 2
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	34
Temperatura agua salida (°C)	70,2
Régimen de giro (rpm)	2050
Potencia consumos (W)	2384
Potencia celda + impulsión (W)	0
Temperatura ambiente (°C)	32
Humedad ambiente (%)	37
Valor contador consumo inicial (litros)	74,148
Valor contador consumo final (litros)	74,315
Consumo combustible (litros)	0,167

### 8.3.1.4 NIVEL DE CARGA 3

ENSAYOS	SIN HIDRÓGENO
	Nivel 3
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	33,6
Temperatura agua salida (°C)	72,7
Régimen de giro (rpm)	2250
Potencia consumos (W)	4115
Potencia celda + impulsión (W)	0
Temperatura ambiente (°C)	32
Humedad ambiente (%)	37
Valor contador consumo inicial (litros)	74,75
Valor contador consumo final (litros)	74,952
Consumo combustible (litros)	0,202



Ilustración 153: Cronómetro empleado en el ensayo

## 8.3.2 CON HIDRÓGENO

### 8.3.2.1 EN VACÍO

ENSAYOS	CON HIDRÓGENO
	En vacío
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	35,8
Temperatura agua salida (°C)	61,3
Régimen de giro (rpm)	1490
Potencia consumos (W)	0
Potencia celda + impulsión (W)	408
Temperatura ambiente (°C)	36
Humedad ambiente (%)	25
Valor contador consumo inicial (litros)	76,1
Valor contador consumo final (litros)	76,215
Consumo combustible (litros)	0,115

### 8.3.2.2 NIVEL DE CARGA 1

ENSAYOS	CON HIDRÓGENO
	Nivel 1
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	36,7
Temperatura agua salida (°C)	66,9
Régimen de giro (rpm)	1530
Potencia consumos (W)	1800
Potencia celda + impulsión (W)	393
Temperatura ambiente (°C)	36
Humedad ambiente (%)	25
Valor contador consumo inicial (litros)	76,29
Valor contador consumo final (litros)	76,428
Consumo combustible (litros)	0,138



Ilustración 154: Fuentes de alimentación ensayo con hidrógeno





Ilustración 155: Control Temperaturaeratura de la celda durante el ensayo

### 8.3.2.3 NIVEL DE CARGA 3

ENSAYOS	CON HIDRÓGENO
	Nivel 3
Tiempo de ensayo (min)	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	37,5
Temperatura agua salida (°C)	74,3
Régimen de giro (rpm)	1620
Potencia consumos (W)	4135
Potencia celda + impulsión (W)	385,2
Temperatura ambiente (°C)	36
Humedad ambiente (%)	26
Valor contador consumo inicial (litros)	76,79
Valor contador consumo final (litros)	76,978
Consumo combustible (litros)	0,188



## 8.4 GASES DE ESCAPE

En cuanto a las emisiones no se observa una variación notable, al disponer de equipos de toma de datos puntual y no continuada en el tiempo los datos no resultan tan enriquecedores.

A continuación, se muestran las fichas de datos de interés:

### 8.4.1 EN VACÍO

SIN HIDRÓGENO		CON HIDRÓGENO	
INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:13:37 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 127.1 °C Temp. PDC's 1952 ppm CO corregido 19.3 % O2 158 ppm CO 12.35 Lambda 1.25 % CO2 40.4 % qAnet 40.4 % qAbr. 29.5 °C Temp. Amb. 59.6 % REN 59.6 % REN 158 ppm COamb --- ppm CO2amb 30.5 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:17:41 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 130.1 °C Temp. PDC's 3793 ppm CO corregido 19.4 % O2 289 ppm CO 13.12 Lambda 1.18 % CO2 44.9 % qAnet 44.9 % qAbr. 30.3 °C Temp. Amb. 55.1 % REN 55.1 % REN 289 ppm COamb --- ppm CO2amb 30.8 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 19.07.2022 12:58:04 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 117.7 °C Temp. PDC's 3348 ppm CO corregido 19.2 % O2 287 ppm CO 11.67 Lambda 1.33 % CO2 33.2 % qAnet 33.2 % qAbr. 35.7 °C Temp. Amb. 66.8 % REN 66.8 % REN 287 ppm COamb --- ppm CO2amb 35.5 °C Pto. de rocío	19.07.2022 13:02:34 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 127.8 °C Temp. PDC's 2828 ppm CO corregido 18.2 % O2 377 ppm CO 7.50 Lambda 2.07 % CO2 24.4 % qAnet 24.4 % qAbr. 36.0 °C Temp. Amb. 75.6 % REN 75.6 % REN 377 ppm COamb --- ppm CO2amb 37.5 °C Pto. de rocío

Como se aprecia en la tabla no se observa una relación directa entre el uso de hidrógeno y las emisiones del grupo electrógeno, de hecho los valores no son concluyentes por aportar datos incluso contradictorios



Ilustración 156: Equipo de medición de gases

### 8.4.2 NIVEL DE CARGA 1

SIN HIDRÓGENO		CON HIDRÓGENO	
INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:28:05 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 148.0 °C Temp. PDC's 1522 ppm CO corregido 17.4 % O2 261 ppm CO 5.83 Lambda 2.66 % CO2 23.8 % qAnet 23.8 % qAbr. 29.5 °C Temp. Amb. 76.2 % REN 76.2 % REN 261 ppm COamb --- ppm CO2amb 34.6 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:51:09 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 157.5 °C Temp. PDC's 932 ppm CO corregido 16.2 % O2 213 ppm CO 4.38 Lambda 3.54 % CO2 19.1 % qAnet 19.1 % qAbr. 31.3 °C Temp. Amb. 80.9 % REN 80.9 % REN 213 ppm COamb --- ppm CO2amb 37.8 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 19.07.2022 13:04:57 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 134.0 °C Temp. PDC's 2261 ppm CO corregido 17.6 % O2 366 ppm CO 6.18 Lambda 2.51 % CO2 21.6 % qAnet 21.6 % qAbr. 35.1 °C Temp. Amb. 78.4 % REN 78.4 % REN 366 ppm COamb --- ppm CO2amb 37.9 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 19.07.2022 13:10:21 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 147.8 °C Temp. PDC's 1148 ppm CO corregido 16.7 % O2 235 ppm CO 4.88 Lambda 3.17 % CO2 19.1 % qAnet 19.1 % qAbr. 35.1 °C Temp. Amb. 80.9 % REN 80.9 % REN 235 ppm COamb --- ppm CO2amb 39.3 °C Pto. de rocío

### 8.4.3 NIVEL DE CARGA 2

SIN HIDRÓGENO		CON HIDRÓGENO	
INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:36:03 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 150.0 °C Temp. PDC's 952 ppm CO corregido 16.3 % O2 213 ppm CO 4.47 Lambda 3.47 % CO2 18.6 % qAnet 18.6 % qAbr. 29.7 °C Temp. Amb. 81.4 % REN 81.4 % REN 213 ppm COamb --- ppm CO2amb 36.8 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 08.07.2022 12:49:09 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 160.7 °C Temp. PDC's 639 ppm CO corregido 16.4 % O2 140 ppm CO 4.57 Lambda 3.40 % CO2 20.5 % qAnet 20.5 % qAbr. 29.3 °C Temp. Amb. 79.5 % REN 79.5 % REN 140 ppm COamb --- ppm CO2amb 36.4 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 19.07.2022 13:29:03 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 137.2 °C Temp. PDC's 781 ppm CO corregido 17.8 % O2 119 ppm CO 6.56 Lambda 2.36 % CO2 22.6 % qAnet 22.6 % qAbr. 34.9 °C Temp. Amb. 77.4 % REN 77.4 % REN 119 ppm COamb --- ppm CO2amb 37.4 °C Pto. de rocío	testo 330-1 LL V1.07 02130489/E 19.07.2022 13:32:34 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 % PdC 154.6 °C Temp. PDC's 1036 ppm CO corregido 18.0 % O2 148 ppm CO 7.00 Lambda 2.21 % CO2 28.0 % qAnet 28.0 % qAbr. 35.8 °C Temp. Amb. 72.0 % REN 72.0 % REN 148 ppm COamb --- ppm CO2amb 37.7 °C Pto. de rocío

Tanto con o sin hidrógeno las temperaturas del refrigerante por su lado seguían estables siendo esta mucho menor que la de los gases de escape como era de esperar.



Ilustración 157: Temperatura refrigerante



Ilustración 158: Unidad lectora e impresora de datos gases

### 8.4.4 NIVEL DE CARGA 3

SIN HIDRÓGENO		CON HIDRÓGENO	
INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
testo 330-1 LL V1. 07 02130489/E 08. 07. 2022 12:56:12 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 %	testo 330-1 LL V1. 07 02130489/E 08. 07. 2022 13:00:15 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 %	testo 330-1 LL V1. 07 02130489/E 19. 07. 2022 13:37:09 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 %	testo 330-1 LL V1. 07 02130489/E 19. 07. 2022 13:40:50 Situación: ELCHE Tipo de sistema Caldera atmosférica de. FOLDER Combustible: Gasoleo A O2ref.: 3.0 % CO2Máx: 15.5 %
PdC 170.4 °C Temp. PDC's 762 ppm CO corregido 15.9 % O2 185 ppm CO 4.12 % Lambda 3.76 % CO2 19.7 % qAnet 19.7 % qAbr. 31.3 °C Temp. Amb. 80.3 % REN 80.3 % REN 185 ppm COamb --- ppm CO2amb 38.3 °C Pto.de rocío	PdC 177.4 °C Temp. PDC's 571 ppm CO corregido 15.0 % O2 163 ppm CO 3.50 % Lambda 4.43 % CO2 17.6 % qAnet 17.6 % qAbr. 31.8 °C Temp. Amb. 82.4 % REN 82.4 % REN 163 ppm COamb --- ppm CO2amb 40.0 °C Pto.de rocío	PdC 174.5 °C Temp. PDC's 943 ppm CO corregido 16.3 % O2 211 ppm CO 4.47 % Lambda 3.47 % CO2 21.4 % qAnet 21.4 % qAbr. 35.6 °C Temp. Amb. 78.6 % REN 78.6 % REN 211 ppm COamb --- ppm CO2amb 40.2 °C Pto.de rocío	PdC 181.1 °C Temp. PDC's 776 ppm CO corregido 15.4 % O2 207 ppm CO 3.75 % Lambda 4.13 % CO2 19.0 % qAnet 19.0 % qAbr. 34.8 °C Temp. Amb. 81.0 % REN 81.0 % REN 207 ppm COamb --- ppm CO2amb 41.0 °C Pto.de rocío

Finalmente se observa que los datos relacionados con los gases siguen sin aportar tendencia clara, por lo que se puede concluir que el uso de hidrógeno no trae consigo una reducción de las emisiones, al menos no sin ajustes electrónicos en la centralita de la unidad.



## 8.5 CONCLUSIONES TÉCNICAS

Tras la realización de los ensayos es momento de tratar de extraer las conclusiones objetivo. Estas podrían dar respuesta a algunas de las preguntas planteadas al comienzo del presente documento:

- ¿Existe un ahorro de combustible real?
- ¿Se reducen las emisiones?
- ¿Resulta rentable el empleo de estos sistemas?
- ¿Resultaría necesario un ajuste electrónico?
- ¿Se aprecian mejoras en el funcionamiento?

Resumen de datos extraídos de la experimentación:

ENSAYOS	SIN HIDRÓGENO			
	En vacío	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tiempo de ensayo (min)	5 min	5 min	5 min	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	32,1	32,1	34	33,6
Temperatura agua salida (°C)	60	70,2	70,2	72,7
Régimen de giro (rpm)	1286	1852	2050	2250
Potencia consumos (W)	0	1790	2384	4115
Potencia celda + impulsión (W)	0	0	0	0
Temperatura ambiente (°C)	33	33	32	32
Humedad ambiente (%)	31	29	37	37
Valor contador consumo inicial (litros)	73,5	73,9	74,148	74,75
Valor contador consumo final (litros)	73,6275	74,048	74,315	74,952
Consumo combustible (litros)	0,1275	0,148	0,167	0,202

ENSAYOS	CON HIDRÓGENO			
	En vacío	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tiempo de ensayo (min)	5 min	5 min	5 min	5 min
Temperatura aire entrada (°C)	35,8	36,7	38	37,5
Temperatura agua salida (°C)	61,3	66,9	69,8	74,3
Régimen de giro (rpm)	1490	1530	1590	1620
Potencia consumos (W)	0	1800	2390	4135
Potencia celda + impulsión (W)	408	393	388,7	385,2
Temperatura ambiente (°C)	36	36	36	36
Humedad ambiente (%)	25	25	25	26
Valor contador consumo inicial (litros)	76,1	76,29	76,531	76,79
Valor contador consumo final (litros)	76,215	76,428	76,688	76,978
Consumo combustible (litros)	0,115	0,138	0,157	0,188

Generando una tabla con las diferencias obtenidas en los principales parámetros pueden observarse más claramente los beneficios en caso de existir estos:

BENEFICIOS	En vacío	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Régimen de giro	204	-322	-460	-630
Consumo (l/5min)	-0,0125	-0,01	-0,01	-0,014
Consumo (l/h)	-0,15	-0,12	-0,12	-0,168

Vemos que tanto el régimen de giro como el consumo disminuyen notablemente, dejando ver una clara tendencia positiva. En vacío vemos que el régimen de giro no decae, sino que crece, pero esto no resulta problemático por ser la circunstancia más favorable para el grupo electrógeno, probablemente se deba a una variación puntual de la velocidad de giro.

El ahorro de combustible por hora es bastante notable, pero aun así esto no resulta suficiente con estudiar este parámetro ya que ha de conocerse si este ahorro compensa el coste energético de la celda y su bomba.

BALANCE ENERGÉTICO 1 HORA	En vacío	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Consumo celda + impulsión (kWh)	0,408	0,393	0,3887	0,3852
Coste energético € (0.31616 €/kWh)	0,12899328	0,12425088	0,12289139	0,12178483
Ahorro combustible	-0,15	-0,12	-0,12	-0,168
Coste combustible € (1.968 €/l)	-0,2952	-0,23616	-0,23616	-0,330624
Balance global (€/h)	0,16620672	0,11190912	0,11326861	0,20883917

El balance sigue siendo claramente positivo logrando un ahorro de hasta casi 21 céntimos de euro por hora, para usos prolongados el ahorro sería notable. Por ejemplo, una empresa dotada de 5 grupos electrógenos activos durante 10 horas al día estaría generando un ahorro de 10,5 euros diarios, lo que supone un ahorro mensual de 315 euros.

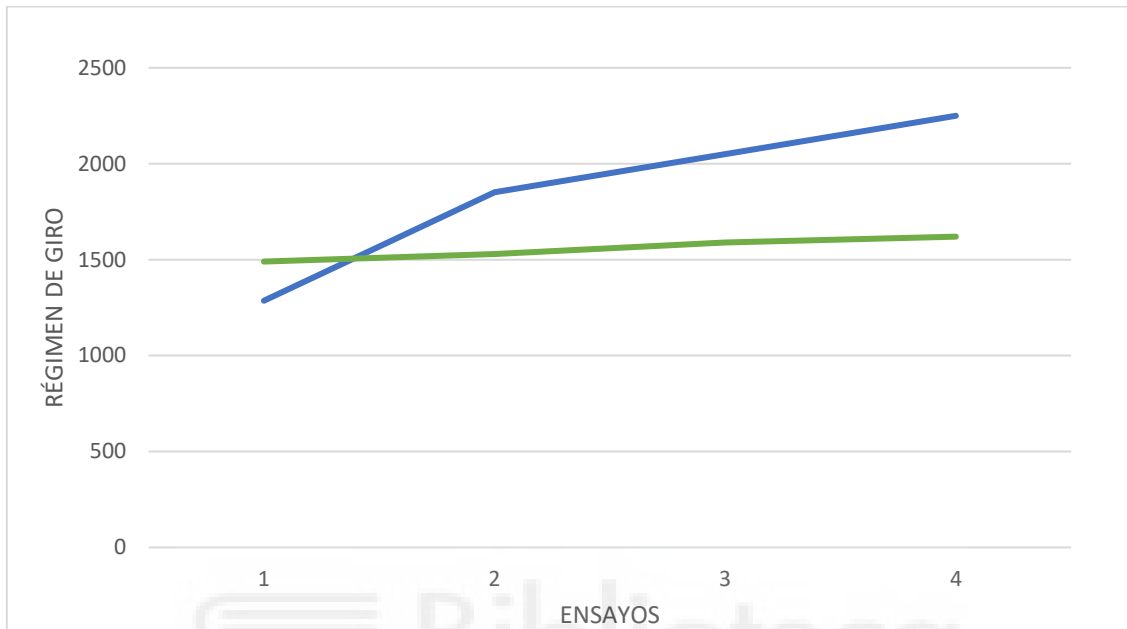
¿Resultaría conveniente un ajuste electrónico?

Tras experimentar con el grupo electrógeno sin ajustes electrónicos y analizar la influencia del uso de hidrógeno ha quedado demostrado que el ahorro de combustible resulta más que notable, no por esto resulta descabellado pensar en ajustes electrónicos, ya que haber obtenido resultados positivos no implica que estos no sean mejorables. Al inyectar hidrógeno el poder calorífico de la mezcla presente en la cámara de combustión se incrementa, es por esto por lo que la centralita decide reducir la cantidad de combustible, considerando suficiente un menor nivel de combustible inyectado. Pero la centralita no está interpretando lo ocurrido como debe, solo está recibiendo señales de una confundida sonda lambda que detecta que los niveles de oxígeno presentes son inferiores a los que debería en la línea de escape, intuyendo que el oxígeno se está aprovechando totalmente en producir la combustión del combustible y por tanto reduciendo la inyección de este para no desperdiciarlo, generando así el ahorro deseado.

Por tanto, podría concluirse en que la inversión en ajustes electrónicos mejoraría los resultados y el ahorro, pero habría de estudiarse la rentabilidad de dicha inversión en base a factores como el tiempo de uso diario de los equipos, la importancia de estos en la industria o actividad y el número de equipos.

¿Se observan mejoras en el funcionamiento?

En cuanto al funcionamiento resulta imprescindible mencionar el de giro y el nivel sonoro del equipo. Como se ha mostrado en los datos resultantes del ensayo el régimen de giro presenta una tendencia mucha más lineal y plana al emplear hidrógeno, distando bastante de las velocidades de giro alcanzadas sin el uso de este.



Esto se traduce en un menor desgaste de los elementos vitales del equipo a causa de una fricción e inercias menores, y en un nivel sonoro algo menor. Al inyectar hidrógeno el sonido cambiaba ligeramente, no se reducía demasiado pero sí mínimamente.



Ilustración 159: Fricción de elementos móviles



## **9 CONCLUSIONES GENERALES**



## 9.1 EQUIPOS COMERCIALES

Desde el comienzo de la redacción del presente documento han sido mencionados en múltiples ocasiones los equipos de carácter comercial, estos prometen unos resultados difícilmente creíbles. En las primeras ocasiones que se mencionaron se optó por no mostrar documentación, limitando la aportación a menciones puntuales de datos sobre dichos equipos.

Tras comprender el funcionamiento de estos equipos y observar datos de carácter real es el momento de mostrar datos técnicos y contrastarlos generando unas conclusiones respaldadas por la realizada experimentación. Para llevar a cabo este proceso he seleccionado en primer lugar una empresa con sede en Portugal especializada en este tipo de kits de instalación directa.

En su web se muestran unos beneficios generales, los cuales resultan ser a priori válidos para cualquiera de sus productos, estos son los mostrados a continuación:

### Ventajas de nuestro producto

- 1. Ahorro en su gasto de combustible actual en un 20 y 30%.** Esto es válido para la conducción, tanto para la carretera como para la ciudad también. Imagínese cuánto puede ahorrar al final del año!
- 2. Aumenta la potencia y el rendimiento de su vehículo.** Cuanto más combustible se quema, el motor más ruido hace y tiene menos rendimiento. Una vez que cambia al agua, aumenta la potencia y aumenta el rendimiento.
- 3. Aumenta la vida útil de su motor.**
- 4. Reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y CO.** La eliminación de la contaminación y otras sustancias perjudiciales que nuestros motores dejan escapar. ¿Qué hay de malo en hacer algo bueno para el medio ambiente?
- 5. Reduce la temperatura en el motor.** También mejora la vida útil del motor ya que su combustión está en un estado mucho más fresco..
- 6. Elimina el carbono depositado en su motor** y evita acumulación futura del carbón.
- 7. Menor nivel de ruido en el motor.** Cambio del ciclo de combustión con el hidrogeno. El motor suena mucho más tranquilo de lo que era antes, esto es debido a la menor combustión en su coche.

Analizando dichas ventajas de forma independiente podrán extraerse enriquecedoras conclusiones con las cuales poder generar un posicionamiento crítico:

#### 1. AHORRO DE COMBUSTIBLE DE ENTRE 20 Y 30%

El ahorro de combustible varió según la carga a la que se sometía al generador, siendo los mostrados a continuación.

EN VACÍO	CARGA BAJA	CARGA MEDIA	CARGA ALTA
9,8 %	6,76 %	5,99 %	6,93 %

Siendo objetivos los valores ofrecidos por el fabricante resultan muy optimistas y como se puede observar distan bastante de los valores obtenidos en la experimentación. Siendo el tamaño de placa de su celda menor, el número de placas idéntico y los parámetros de alimentación inferiores difícilmente podrán obtenerse los porcentajes facilitados por el fabricante.

2. AUMENTO DE POTENCIA

En cuanto al aumento de potencia las observaciones extraídas de la experimentación no tienen un contraste directo. El fabricante aporta poca información al respecto, únicamente afirma que quemar menos combustible mejora el rendimiento cosa que no siempre es así, el combustible ha de quemarse en su justa medida, no por quemar menos combustible este ha de estar mejor aprovechado por poder darse una combustión ineficiente.

Bien es cierto que podría lograrse un aumento de potencia si se ajustasen las cartografías almacenadas en la centralita del coche, las cartografías son mapas tridimensionales que generan una guía de actuación para el vehículo, indicando a cada sistema como actuar según el régimen de giro y el nivel de pedal de acelerador.

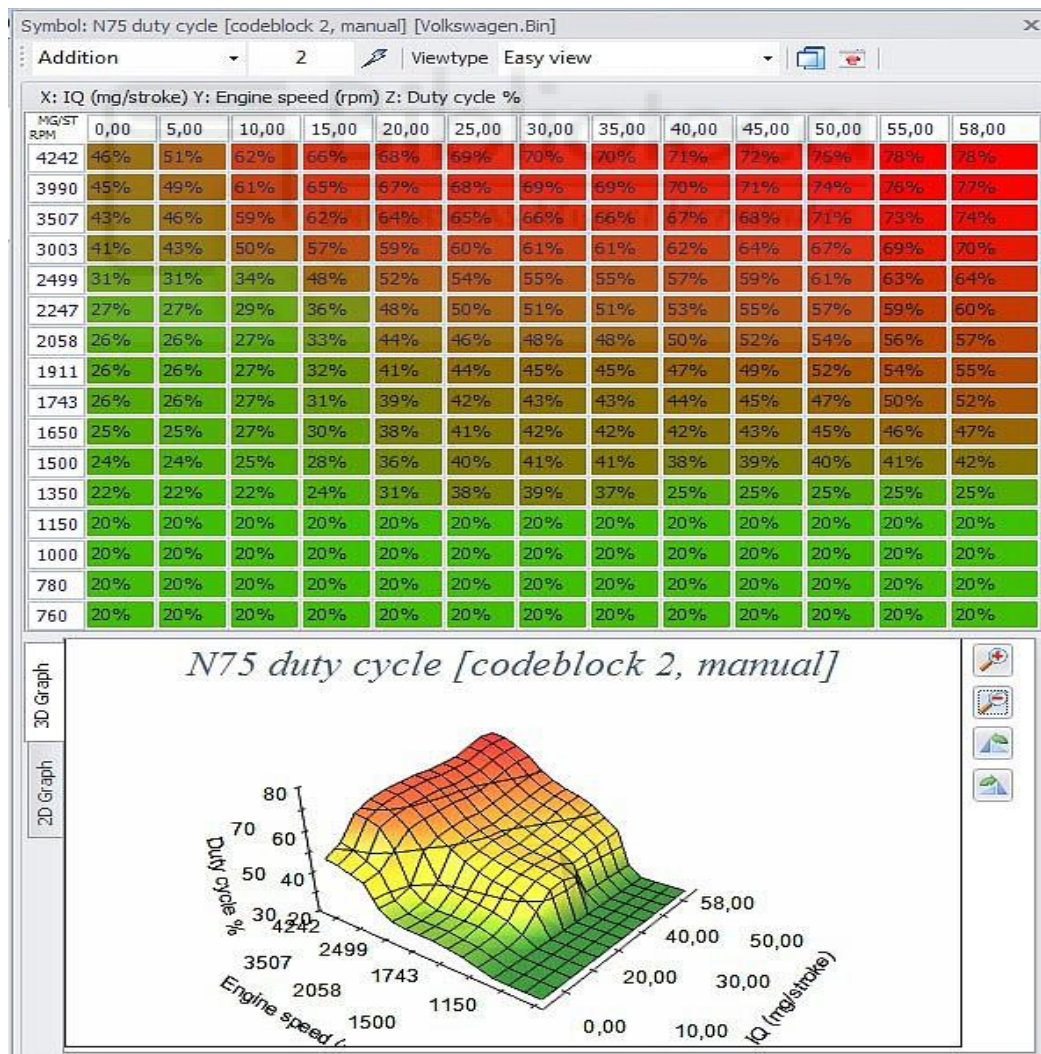


Ilustración 160: Ejemplo cartografía centralita

Existen vehículos como por ejemplo la motocicleta KTM DUKE 1290, para los que se generan cartografías con parámetros coordinados según 6 o más ejes. Estas centralitas no únicamente contrastan el porcentaje de pedal de acelerador y las revoluciones para por ejemplo saber cuánto inyectar, sino que también tienen en cuenta si nos encontramos recostados trazando una curva, si la moto está tratando de levantarse, la marcha engranada entre otros parámetros.

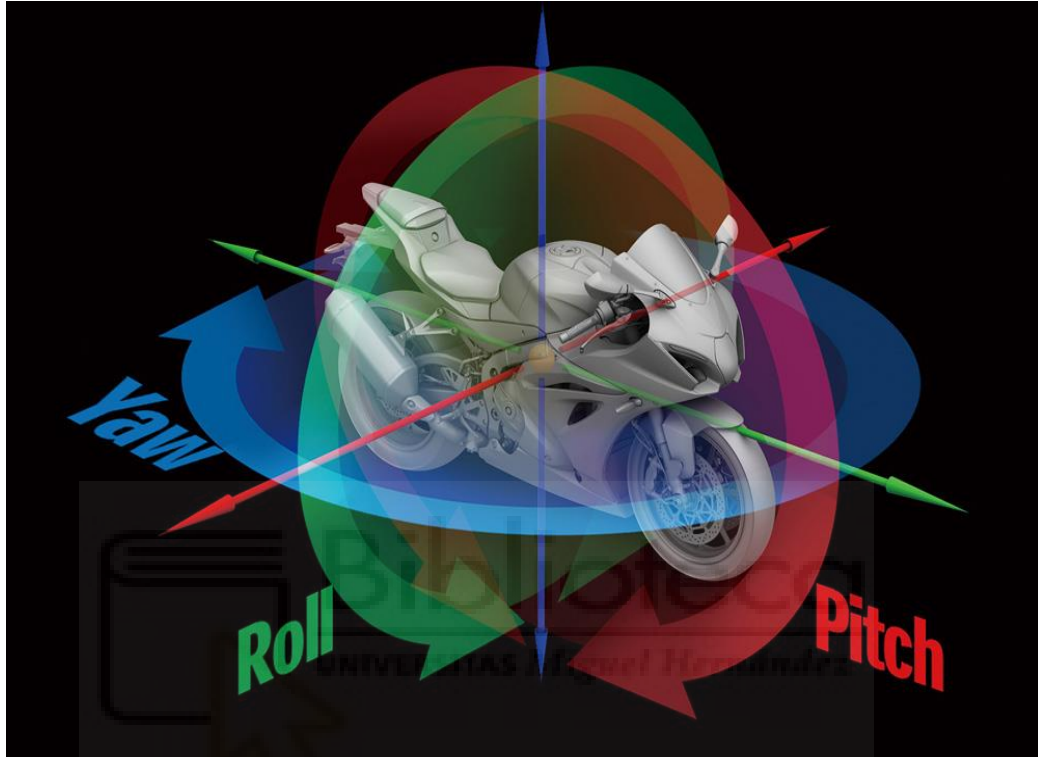


Ilustración 161: Centralitas con más de 3 axis



Ilustración 162: KTM DUKE 1290 – Versión 2022

El fabricante facilita algunos artículos científicos genéricos de entidades reconocidas como la NASA, pero estos solo afirman que el uso de hidrógeno es viable y trae consigo ciertas ventajas. Otros fabricantes mencionan aumentos de potencia del 30% sin ajustar nada que resulta imposible para un kit de estas características.

### 3. AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DEL MOTOR

El aumento de la vida útil resulta coherente ya que los regímenes de giro se reducen al emplear hidrógeno bien es cierto que este no es el único factor influyente a la hora de hablar de la vida útil.

El poder calorífico del combustible y su inflamabilidad resultan ser también determinantes.

El primero de estos factores no tiene tanta influencia ya que el motor inyecta la cantidad justa de combustible para que el motor en global logre en su cámara de combustión una mezcla con el poder calorífico necesario.

En cambio el segundo de los factores podría causar graves daños ya que en un motor de combustión el combustible no se quema de forma puntual e instantánea, sino que presenta unos tiempos muertos en los que absorbe la energía de activación necesaria aportada por una chispa o por la propia compresión, estos tiempos van muy ligados a los adelantos de la inyección ya que si el motor gira más rápido la distancia recorrida por el pistón en ese tiempo es mayor por lo que habrá de inyectarse antes el combustible.

El hidrógeno podría variar estos tiempos y resultar dañino ya que ante una energía de activación el hidrógeno estalla casi de forma uniforme e inmediata sin presentar un tiempo claramente definido de avance de llama como sucedería con un combustible convencional.

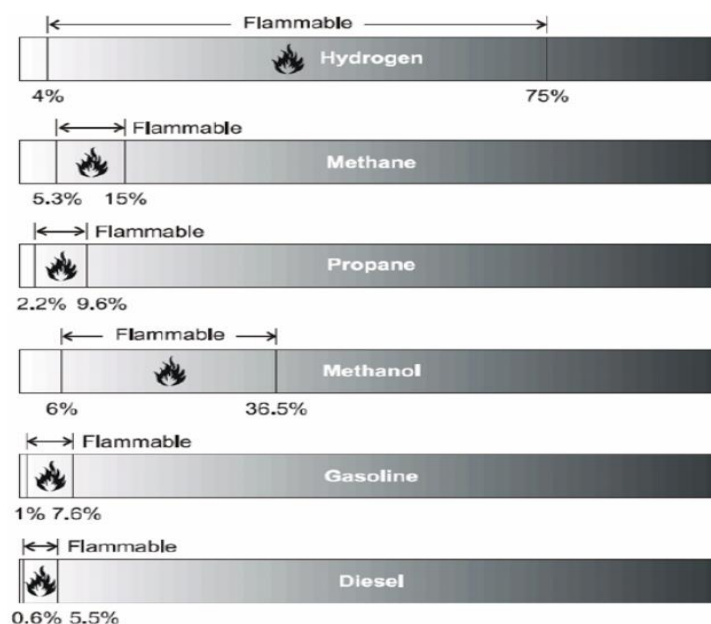


Ilustración 163: Rango inflamabilidad hidrógeno



Como podemos observar el hidrógeno presenta un gran rango de inflamabilidad por lo que puede ser altamente inflamable ante muchas circunstancias diferentes, por ejemplo, el hidrógeno puede combustionar perfectamente con dosados super pobres o ricos indistintamente.

#### 4. REDUCCIÓN DE EMISIONES

Sobre la reducción de emisiones no se han apreciado indicios claros, ni tendencias válidas es por esto por lo que podría decirse que las emisiones se mantienen prácticamente constantes al inyectar cantidades relativamente pequeñas de hidrógeno.

#### 5. REDUCCIÓN DE TEMPERATURA

Las temperaturas se mantienen prácticamente constantes con o sin inyección de hidrógeno, cosa que resulta lógica por mantener un poder calorífico similar en ambos casos, variando únicamente la cantidad de combustible que ha de inyectarse para lograr dicho poder calorífico.

Solo podría reducirse la temperatura a causa de la reducción del régimen de giro, no por la fricción ya que la variación resulta insignificante pero sí por requerir de menor poder calorífico para mantener dicho régimen. En ambos casos la variación resulta poco notable, por lo que no deberían poder obtenerse reducciones de temperaturas.

#### 6. ELIMINACIÓN DE CARBONILLA

La eliminación de carbonilla mediante el empleo de hidrógeno es una realidad hoy en día, se lleva empleando con éxito en vehículos a motor desde hace años.

Para eliminar la carbonilla se utiliza un proceso en el cual se inyecta hidrógeno y se mantiene al motor girando en un rango concreto de revoluciones cercano a las 3500 rpm durante un periodo estimado de una hora, bien es cierto que el motor no gira desde el primer instante a 3500 rpm sino que se van escalonando los regímenes de giro durante parte de dicha hora hasta alcanzar esas revoluciones.

Parte de la descarbonización se realiza por pirólisis que consiste en aumentar la temperatura de determinadas zonas degradando las sustancias retenidas. Por otro lado, también existe una componente menor de carácter reactivo en la que se eliminan depósitos de carbonilla mediante la generación de metano  $\text{CH}_4$ .

Por tanto, en este caso no resulta descabellado afirmar que la eliminación de carbonilla es una realidad y ventaja del uso de este tipo de equipos.

#### 7. REDUCCIÓN DE RUIDO

La reducción de ruido sí existe, pero esta es poco notable. Al inyectar hidrógeno el motor suena algo más suave reduciendo mínimamente los niveles de ruido. La menor sonoridad se debe a que el motor requiere una mezcla en la cámara de combustión con un menor poder calorífico global a menor sea el rango de giro (menor masa de combustible), como dicho régimen se reduce ligeramente el nivel sonoro también lo hace. Siendo la diferencia tan pequeña no debería considerarse una ventaja destacable de este tipo de sistemas.



## 9.2 AMORTIZACIÓN

El presupuesto de fabricación del equipo empleado en la presente investigación resulta ser difícilmente cuantificable ya que se han reutilizado todos los materiales posibles (en el punto 10 se generará un presupuesto estimado). A su vez la mayoría de los usuarios no fabricarán su propio equipo, por esto he generado una selección de precios de equipos comerciales con los que poder estudiar los periodos de retorno de inversión.

Los precios resultan ser muy variables yendo desde los 169,9 € hasta los 529 €, pero el precio en torno al que se concentran la mayoría de los productos de características similares al equipo empleado en esta investigación es el de 200 €.



**DC2000**  
FUEL SAVER KIT

**169,90 €**

View

Add to cart

**60A CCPWM**  
Corriente...

CCPWM Corriente  
Constante - Control  
Electrónico Modulador de  
ancho de Pulso



HYDROGEN GENERATOR DM-45, FUEL SAVER CAR KIT UPTO 240HP INSTEAD HHO, CC PWM. ES

Estado: Nuevo

Cantidad:  8 disponible(s) / 5 vendidos

Precio: **529,00 EUR**

¡Cómpralo ya!

Añadir a la cesta

♥ Añadir a la lista de seguimiento

Se aceptan devoluciones

45 seguidores



Por tanto, ya fijado ese valor como referencia podrá realizarse el estudio de retorno de la inversión o amortización, apoyando este en los datos extraídos de la fase experimental.

En primer lugar, deberíamos conocer el consumo eléctrico del generador, en este caso al ser un cálculo genérico emplearemos todos los rangos de consumo.

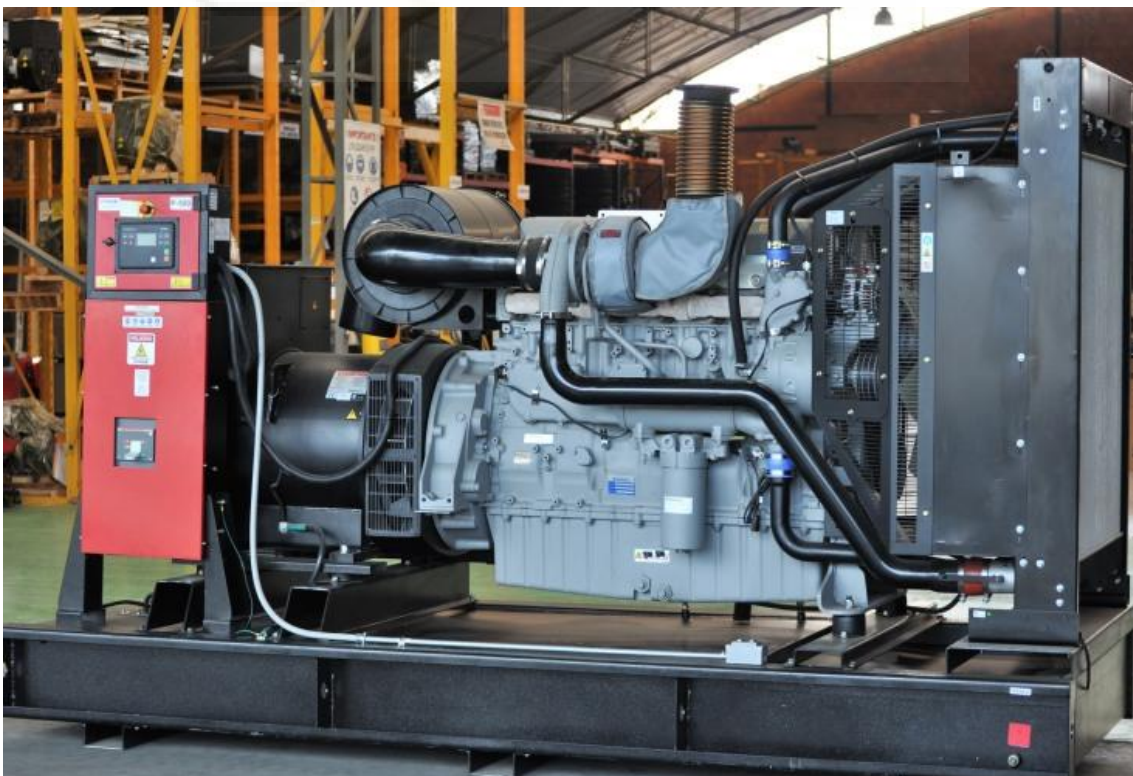
	En vacío	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Balance global (€/h)	0,16620672	0,11190912	0,11326861	0,20883917
Coste equipo (€)	200	200	200	200
Horas amortización	1203,32078	1787,164442	1765,714261	957,6747504
Días amortización (5h/día)	240,6641561	357,4328884	353,1428522	191,5349501
Días amortización (10h/día)	120,332078	178,7164442	176,5714261	95,76747504

## TFG - SISTEMA DE INYECCIÓN DE HIDROGENO EN UN GENERADOR DIESEL

Realizados los cálculos se observa que si el equipo trabaja un mínimo de 5 horas diarias no se extiende mucho en el tiempo la recuperación del capital invertido. Por lo que considero una buena opción la instalación de este tipo de equipos, incluso para aplicaciones en las que los equipos no se usen tanto, por ejemplo, una industria que trabaje 3 horas y 18 minutos al día con el equipo encendido lograría amortizar la inversión en tan solo un año.



*Ilustración 164: Ejemplo 1 instalación con múltiples grupos electrógenos*



*Ilustración 165: Ejemplo 2 instalación con múltiples grupos electrógenos*

## 9.3 FABRICACIÓN PROPIA

Por último, me gustaría hablar acerca de la rentabilidad y viabilidad de fabricar un equipo pieza a pieza.

Desde mi punto de vista la fabricación es viable pero no por ello sencilla, han de tenerse en cuenta un gran número de factores, como los materiales constructivos, los tamaños de cada elemento, las temperaturas que se prevén alcanzar, la sección del cableado, las características de la o las fuentes a emplear, el rango de intensidades y voltajes de funcionamiento sobre los que se pretende optimizar la celda... Estando todos estos factores estrechamente interrelacionados, lo que hace que la toma de decisiones no sea sencilla.

El primero de los inconvenientes, es que se requiere de ciertas herramientas no tan habituales, las cuales ya fueron mencionadas anteriormente. Cabe destacar las siguientes:

- Máquina de disco: Para realizar los cortes del acero inoxidable.
- Taladro: Se requiere de la realización de agujeros con brocas específicas para acero y en algunos casos con coronas circulares, como por ejemplo en la tapa circular para la salida de hidrógeno.
- Prensa hidráulica: Se emplea la prensa para planificar las chapas de acero reutilizadas, ya que suelen presentar pequeñas desviaciones y a su vez el calentamiento producido por el corte puede agravar dichas imperfecciones.
- Esmeriladora de banco: Para eliminar rebabas en el acero y rebajar los filos cortantes.

El segundo de los inconvenientes a destacar es que pocas personas tendrán materiales válidos para reutilizarse en la fabricación de la celda, por ser estos bastante específicos, en mi caso he podido contar con muchos de estos, pero no resulta común. Las piezas clave creadas a partir de materiales reciclados o reutilizados son las siguientes:

- Separadores de placas: Se ha empleado caucho proveniente de neumáticos.
- Placas: Se ha empleado acero inoxidable proveniente de distintos artículos desechados como un microondas o un frigorífico, prestando especial atención a que el espesor fuese el mismo en todo caso.
- Anclajes de sujeción de las placas: Los elementos de plástico encargados de comprimir las placas y sus respectivos separadores han sido fabricados a partir de una tapa de PVC propia instalaciones hidráulicas o de fontanería.
- Soporte tubo de salida de hidrógeno: El anclaje del manguito de salida de gas resulta ser unos prensaestopas propio de instalaciones de carácter eléctrico.
- Tuberías: La pareja de manguitos transparentes utilizados son manguitos propios de instalaciones hidráulicas, los cuales se encontraban almacenados y en desuso.
- Cableado: Todo el cableado ha sido reutilizado, siendo este proveniente de antiguas instalaciones o electrodomésticos desechados.

Por esto considero que si no se dispone de alguno de estos materiales o herramientas la fabricación propia debería ser desestimada, siendo mejor opción desde el punto de vista económico la compra directa. A continuación, se muestra un presupuesto estimado.

## 10 PRESUPUESTO





Como se ha comentado en el apartado 9 la gran mayoría de los materiales han sido obtenidos de equipos rotos, en desuso o despiezados. Aun así, resulta posible generar un presupuesto estimado. A continuación se mostrarán los precios comerciales o estimados de los productos empleados y el coste total generado por estos.

Identificador	Información	Coste
Chapa de acero	500x500x1 mm	50 €
Barra PVC	10x20x1000 mm	5,00 €
Tanque plástico	Altura: 200 mm / Diámetro: 190 mm	6,00 €
Tubo transparente	Diámetro ext: 10 mm / Espesor: 2 mm	2,99 €
Mini bomba de agua	No procede	3,99 €
Prensaestopas	Diámetro int máximo: 15 mm	3,95 €
Material aislante	1000x1000 mm	2,99 €
3x Tornillo inoxidable	M5x20 mm	1,50 €
2x Tornillo inoxidable	M5x30 mm	1,00 €
4x Tornillo inoxidable	M5x 65 mm	2,50 €
Sosa caustica	1000 g	3,99 €
Agua destilada	5 l	4,07 €
Racor macho latón	Diámetro macho: 8 mm	1,99 €
Cables unipolares Cu	Sección: 6 mm / L: 2 m	2,99 €
2x Terminales cables	Diámetro anillo: 15	0,99 €
3x Fuente de alimentación	0-24V / 0-8A	75 €
<b>TOTAL</b>		<b>168,95 €</b>

Para la elaboración del presente presupuesto se ha optado por emplear tres fuentes únicas de mayor amperaje, en lugar de tres fuentes con doble módulo (equivalentes a seis fuentes), por ser esta la opción económicamente más viable. Por otro lado, tampoco se ha optado por usar una única fuente o un par de ellas, ya que cuando el amperaje que puede aportar una fuente excede los 10 A su coste aumenta de forma exponencial.

Criterios seguidos para la realización del presupuesto:

- No se han tomado los precios más bajo encontrados sino los precios con mayor concentración de resultados.
- Las calidades tenidas en cuenta para la realización del presente presupuesto han sido en todo caso las mínimas exigidas por el diseño.
- En caso de no encontrar materiales del tamaño deseado estos se han sobredimensionado, asegurando así la suficiencia del material requerido.
- La calidad mínima de la tornillería seleccionada es 5.8, por ser su resistencia poco importante en el presente diseño y por ser esta calidad más que suficiente.

GRADO	DIAMETRO DEL TORNILLO (mm)						
	12	14	16	20	22	24	27
4.6	21,71	29,55	38,60	60,32	72,98	86,86	109,93
5.6	27,14	36,95	48,25	75,40	91,23	108,57	137,41
6.8	32,57	44,33	57,90	90,48	109,48	130,28	164,89
8.8	43,43	59,11	77,21	120,64	145,97	173,72	219,86
10.9	54,28	73,89	96,50	150,80	182,46	217,14	274,82

Ilustración 166: Calidades tornillería



## 11 BIBLIOGRAFÍA



A la hora de reunir información siempre resulta imprescindible contrastar la misma, es por esto por lo que además de emplear los conocimientos personales se ha recurrido a las siguiente páginas web:

- <https://www.mylpg.eu/es/estaciones/espana/precios/>
- <https://www.motor.es/que-es/glp>
- <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-drive/tendencias/ventajas-hidrogeno-como-combustiblehttps://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/lubricacion-carter-seco/>
- <https://concepto.de/hidrolisis/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_de\\_combustible](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_de_combustible)
- <https://www.ms-motorservice.com/es/tecnipedia/post/fallas-de-combustion-23/>
- <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/que-es-el-picado-de-biela>
- <https://www.motor.es/que-es/sonda-lambda>
- <https://www.mundodelmotor.net/fallas-comunes-sonda-lambda/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=85pOijg0c7U>
- [https://www.udc.es/export/sites/udc/gem/\\_galeria\\_down/congresos/Copinaval\\_2011\\_103\\_-\\_USO\\_DE\\_HIDRxGENO\\_de\\_Troya\\_Calatayud\\_y\\_otros\\_.pdf\\_2063069294.pdf](https://www.udc.es/export/sites/udc/gem/_galeria_down/congresos/Copinaval_2011_103_-_USO_DE_HIDRxGENO_de_Troya_Calatayud_y_otros_.pdf_2063069294.pdf)

