



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de una celda electrolítica para abastecer distintas aplicaciones con hidrógeno verde de producción propia

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Eléctrica

AUTOR/A: Reig Morant, David

Tutor/a: Micó Reche, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

# *Resumen:*

El siguiente trabajo de fin de carrera se centra en el diseño de una celda electrolítica para abastecer distintas aplicaciones con hidrógeno verde de producción propia, como vector energético alternativo a los combustibles fósiles.

Una instalación fotovoltaica se dedica a producir el gas por electrólisis para distintas aplicaciones, como son la pila de combustible, calefacción, fogones de cocina, mejora de motores térmicos e incluso un grupo electrógeno de emergencia.

La celda electrolítica, funcionará con un circuito electrónico de corriente pulsada PWM para su regulación, reduciendo las pérdidas por calor, distintamente a las celdas convencionales de corriente continua.

El objeto de este trabajo será el diseño de la celda electrolítica, su electrónica de control, la descripción de sus aplicaciones, definir sus demandas de hidrógeno, y la instalación destinada a su producción.

## **PALABRAS CLAVE**

CELDA ELECTROLÍTICA

HIDRÓGENO VERDE

TRANSICIÓN ENERGÉTICA

MOTORES TÉRMICOS

FOGONES Y CALEFACCIÓN

## *Abstract:*

This Degree Final Project focuses on the design of an electrolytical cell to supply different applications with self-produced green hydrogen as a clean alternative to fossil fuels.

A photovoltaic installation is used to produce the gas by electrolysis for different applications, such as fuel cells, heating, kitchen cooker, improvement of thermal engines and even an emergency generator set.

The electrolytic cell will work with a PWM pulsed current electronic circuit for regulation, reducing heat losses, unlike conventional direct current cells.

The objectives of this work will be the design of the electrolytic cell, its control electronics, the description of its applications, define its demands of hydrogen, and the installation for its production.

### KEYWORDS

ELECTROLITICAL CELL

GREEN HYDROGEN

ENERGETICAL TRANSITION

THERMAL ENGINES

COOKER AND HEATING

## *Resum:*

El següent treball de fi de carrera s'enfoca en el disseny d'una cel·la electrolítica per a suministrar a distintes aplicacions amb hidrogen verd de producció pròpia, com a vector energètic alternatiu als combustibles fòssils.

Una instal·lació fotovoltaica es dedica a produir el gas per electròlisi per a distintes aplicacions com son la pila de combustible, calefacció, fogons de cuina, millora dels motors tèrmics y inclús un grup electrogen de emergència.

La cel·la electrolítica funcionarà amb un circuit electrònic de corrent polsada PWM, per a la seua regulació, reduint les pèrdues per calor, distintament a les cel·les convencionals de corrent continua.

El objectiu d'aquest treball es el disseny de la cel·la electrolítica, la seua electrònica de control, la descripció de les seues aplicacions, definir les seues necessitats de hidrogen i la instal·lació destinada a la seua producció.

### **PARAULES CLAU**

CEL·LA ELECTROLÍTICA

HIDROGEN VERD

TRANSICIÓ ENERGÉTICA

MOTORS TÈRMICS

FOGONS I CALEFACCIÓ

# *Agradecimientos:*

*A mis padres José y Emi por haberme permitido estudiar, apoyándome en mis decisiones y en mis caídas, un ejemplo de vida y perseverancia. A mi suerte de tenerlos, muchas gracias.*

*A Carlos, Marcos, Rafa, Paco, por su gran ayuda durante la redacción del trabajo.*

*A todos mis profesores por su trabajo y todos los conocimientos adquiridos.*

*A mis camaradas de carrera por todas las vivencias.*

*Muchas gracias por existir.*

*<< La ciencia no es sino una perversión de sí misma, a menos que tenga como objetivo final el mejoramiento de la humanidad. >>*

*Nikola Tesla.*

*<< Si, amigos míos, creo que el agua se usará un día como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados aislada y simultáneamente, producirán una fuente de calor y de luz inagotable y de una intensidad mucho mayor que la de la hulla. >>*

*Julio Verne, La Isla misteriosa 1874.*

*<< La libertad, Sancho, es uno de los más preciosos dones que a los hombres dieron los cielos>>*

*Miguel de Cervantes, Don Quijote de la Mancha 1605.*



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## Índice general:

### ORDEN DEL CONTENIDO

Resumen	I
Abstract	II
Resum	III
Agradecimientos	IV
Índice general	V
Lista de tablas	VI
Lista de imágenes	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivaciones y justificación	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Asignaturas de la carrera aplicadas	2
1.4. Competencias transversales del trabajo final de grado	23
2. El hidrógeno como alternativa	25
2.1. Características del hidrógeno	26
2.2. Colores del hidrógeno	28
2.3. Almacenamiento, transporte y seguridad	29
3. Electrólisis	33
3.1. Concepto	33
3.2. Tecnologías existentes	35
3.3. Configuración de los electrodos	41
4. Aplicaciones y demandas	43
4.1. Pila de combustible	43
4.2. Calefacción, estufas, agua sanitaria y fogones de cocina	45
4.3. Mejora de los motores térmicos	47
4.4. Grupo electrógeno de emergencia	49
5. Diseño de la celda electrolítica	55
5.1. Dimensionado eléctrico	55
5.2. Componentes y medidas	61
5.3. Descripción del sistema	62
6. Electrónica de control	65
6.1. Concepto	65
6.2. Circuito de regulación	69

7. Sistema fotovoltaico y de almacenamiento	71
7.1. Cálculo de la instalación fotovoltaica	71
7.2. Sistema de compresión y almacenamiento	75
7.3. Descripción del esquema unifilar	80
7.4. Aspectos de seguridad y normativa	81
8. Balance energético	85
9. Presupuesto	86
10. Conclusión	87
11. Bibliografía	88
12. Anexos	94
12.1. Componentes y medidas	95
12.2. Despiece y seccionado de la celda	96
12.3. Diagrama simplificado	97
12.4. Vista real del equipo	98
12.5. Circuito de regulación	99
12.6. Sistema de compresión y almacenamiento	100
12.7. Esquema unifilar de la instalación	101

## Lista de tablas:

Tabla 1.3_01: Matemáticas I	3
Tabla 1.3_02: Competencias Matemáticas I	3
Tabla 1.3_03: Física	3
Tabla 1.3_04: Competencias Física	3
Tabla 1.3_05: Competencias Transversales Física	3
Tabla 1.3_06: Electricidad	3
Tabla 1.3_07: Competencias Electricidad	4
Tabla 1.3_08: Competencias Transversales Electricidad I	4
Tabla 1.3_09: Expresión Gráfica	4
Tabla 1.3_10: Competencias Expresión Gráfica	5
Tabla 1.3_11: Competencias Transversales Expresión Gráfica	5
Tabla 1.3_12: Química	6
Tabla 1.3_13: Competencias Química	6
Tabla 1.3_14: Competencias Transversales Química	6
Tabla 1.3_15: Informática	7
Tabla 1.3_16: Competencias Informática	7
Tabla 1.3_17: Competencias Transversales Informática	7
Tabla 1.3_18: Circuitos Eléctricos	7
Tabla 1.3_19: Competencias Circuitos Eléctricos	7
Tabla 1.3_20: Competencias Transversales Circuitos Eléctricos	7
Tabla 1.3_21: Máquinas y Mecanismos	8
Tabla 1.3_22: Competencias Máquinas y Mecanismos	8
Tabla 1.3_23: Competencias Transversales Máquinas y Mecanismos	8
Tabla 1.3_24: Ciencia de Materiales	8
Tabla 1.3_25: Competencias Ciencia de Materiales	8
Tabla 1.3_26: Matemáticas II	9
Tabla 1.3_27: Competencias Matemáticas II	9
Tabla 1.3_28: Competencias Transversales Matemáticas II	9
Tabla 1.3_29: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos	10

<i>Tabla 1.3_30: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos</i>	10
<i>Tabla 1.3_31: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos</i>	10
<i>Tabla 1.3_32: Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio</i>	11
<i>Tabla 1.3_33: Competencias Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio</i>	11
<i>Tabla 1.3_34: Competencias Transversales Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio</i>	11
<i>Tabla 1.3_35: Estadística</i>	12
<i>Tabla 1.3_36: Competencias Estadística</i>	12
<i>Tabla 1.3_37: Competencias Transversales Estadística</i>	12
<i>Tabla 1.3_38: Termodinámica y Transmisión de calor</i>	13
<i>Tabla 1.3_39: Competencias Termodinámica y Transmisión de calor</i>	13
<i>Tabla 1.3_40: Competencias Transversales Termodinámica y Transmisión de calor</i>	13
<i>Tabla 1.3_41: Máquinas Eléctricas</i>	14
<i>Tabla 1.3_42: Competencias Máquinas Eléctricas</i>	14
<i>Tabla 1.3_43: Competencias Transversales Máquinas Eléctricas</i>	14
<i>Tabla 1.3_44: Electrónica</i>	14
<i>Tabla 1.3_45: Competencias Electrónica</i>	14
<i>Tabla 1.3_46: Competencias Transversales Electrónica</i>	14
<i>Tabla 1.3_47: Sistemas de Producción Industrial</i>	15
<i>Tabla 1.3_48: Competencias Sistemas de Producción Industrial</i>	15
<i>Tabla 1.3_49: Competencias Transversales Sistemas de Producción Industrial</i>	15
<i>Tabla 1.3_50: Resistencia de Materiales</i>	16
<i>Tabla 1.3_51: Competencias Resistencia de Materiales</i>	16
<i>Tabla 1.3_52: Competencias Transversales Resistencia de Materiales</i>	16
<i>Tabla 1.3_53: Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas</i>	17
<i>Tabla 1.3_54: Competencias Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas</i>	17
<i>Tabla 1.3_55: Competencias Transversales Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas</i>	17
<i>Tabla 1.3_56: Ampliación de Maquinas Eléctricas</i>	18
<i>Tabla 1.3_57: Competencias Ampliación de Maquinas Eléctricas</i>	18
<i>Tabla 1.3_58: Competencias Transversales Ampliación de Maquinas Eléctricas</i>	18
<i>Tabla 1.3_59: Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión</i>	19

<i>Tabla 1.3_60: Competencias Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 1.3_61: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 1.3_62: Energías Renovables</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.3_63: Competencias Energías Renovables</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.3_64: Competencias Transversales Energías Renovables</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.3_65: Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 1.3_66: Competencias Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 1.3_67: Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.3_68: Competencias Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.3_69: Competencias Transversales Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.3_70: Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.3_71: Competencias Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.4_01: Competencias Transversales</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 1.4_02: Competencias Transversales de las asignaturas</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2.1_01: Tabla de propiedades del hidrógeno y carburantes</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2.3.1_01: Tabla tal Equivalencias Asociación Española del Hidrógeno</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2.3.1.3_01: Comparativa de combustibles a distintos estados</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4.1_01: Tipos de pila de combustible AIREMA</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4.1_02: Pilas de combustible y otros medios de generación eléctrica</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 4.2_01: Comparativa de temperatura adiabática de la llama de varios combustibles</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5.1_01: Tabla de las distintas características eléctricas del agua</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 7.1_01: Cargas básicas de la instalación</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 7.4_01: Directivas ATEX</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 9_01: Tabla presupuesto celda</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 9_02: Tabla presupuesto instalación</i>	<i>86</i>

## Lista de imágenes:

<i>Imagen 2.1_01: Descomposición de la molécula del agua en sus componentes</i>	26
<i>Imagen 2.1_02: Gráfico de las temperaturas según la concentración de hidrógeno</i>	27
<i>Imagen 2.2_01: Metodologías de producción del hidrógeno en el mundo</i>	28
<i>Imagen 2.3.1_01: Gráfico de las fases del hidrógeno</i>	29
<i>Imagen 3.1_01: Proceso de Electrólisis Alcalina</i>	33
<i>Imagen 3.1_02: Cátodo y ánodo con su producción de gas</i>	33
<i>Imagen 3.1_03: Reacción en medio alcalino</i>	34
<i>Imagen 3.1_04: Reacción en medio básico</i>	34
<i>Imagen 3.1_05: Reacción global</i>	34
<i>Imagen 3.2.1_01: Electrolizador alcalino</i>	35
<i>Imagen 3.2.2_01: Electrolizador PEM</i>	36
<i>Imagen 3.2.2_02: Sección transversal de una celda PEM</i>	36
<i>Imagen 3.2.2_03: Comparativa electrolisis alcalina y PEM</i>	37
<i>Imagen 3.2.3_01: Electrolizador AEM</i>	37
<i>Imagen 3.2.4_01: Electrolizador SOE</i>	38
<i>Imagen 3.2.4_02: Reacción celda SOE</i>	39
<i>Imagen 3.3_02: Estructura Nafión</i>	40
<i>Imagen 3.3_02: Estructura monómero PTFE o teflón</i>	40
<i>Imagen 3.4_01: Configuración monopolar</i>	41
<i>Imagen 3.4_02: Configuración bipolar</i>	41
<i>Imagen 3.4_03: Configuración bipolar con membranas</i>	42
<i>Imagen 3.4_04: Configuración bipolar con membranas a mayor tensión</i>	42
<i>Imagen 4.1_01: Principio de operación de una celda PEMFC</i>	43
<i>Imagen 4.1_02: Principio de operación de una celda PEMFC</i>	44
<i>Imagen 4.1_03: Componentes de una pila de combustible</i>	44
<i>Imagen 4.3_01: Esquema visual del rendimiento en un motor térmico</i>	47
<i>Imagen 4.3_02: Estudio de Eurofins</i>	48
<i>Imagen 4.4_01: Grupo electrógeno e inyector electrónico</i>	49
<i>Imagen 4.4_02: Válvula antirretorno de llama</i>	49
<i>Imagen 4.4.1_01: Comparativa visual de relaciones estequiométricas gasolina hidrógeno</i>	50
<i>Imagen 4.4.1_01: Grafico emisiones según dosado</i>	54

<i>Imagen 5.1_01: Reacción química en medio alcalino</i>	55
<i>Imagen 5.1.2_01: Componentes eléctricas reales de un motor y de una celda electrolítica</i>	59
<i>Imagen 5.2_01: Componentes y medidas de la celda</i>	61
<i>Imagen 5.3_01: Despiece y seccionado de la celda electrolítica</i>	62
<i>Imagen 5.3_02: Diagrama básico de flujo</i>	63
<i>Imagen 5.3_03: Vista real del sistema</i>	64
<i>Imagen 6.1_01: Regulación de la intensidad en corriente continua</i>	65
<i>Imagen 6.1_02: Forma de onda de una señal PWM a diferentes tensiones medias</i>	66
<i>Imagen 6.1_03: Respuesta comparativa de un inductor y un condensador</i>	66
<i>Imagen 6.1_04: Representación teórica del funcionamiento de las componentes de la celda</i>	67
<i>Imagen 6.1_05: Respuesta de la celda ante la tensión de alimentación</i>	67
<i>Imagen 6.1_06: Respuesta de la celda sin régimen permanente</i>	68
<i>Imagen 6.2_01: Circuito de regulación</i>	69
<i>Imagen 6.2_02: Circuito básico de funcionamiento para el IC555 de configuración astable</i>	70
<i>Imagen 7.1_01: Cálculo de la radiación solar con PVGIS</i>	72
<i>Imagen 7.1_02: Parámetros eléctricos de los paneles</i>	73
<i>Imagen 7.1_03: Especificaciones del inversor</i>	73
<i>Imagen 7.1_04: Usos del inversor</i>	74
<i>Imagen 7.2_01: Diagrama simbólico del sistema de compresión y almacenamiento</i>	75
<i>Imagen 7.2.7_01: Factor de compresibilidad AEH</i>	78
<i>Imagen 7.2.7_02: Apariencia botellas de hidrógeno</i>	79
<i>Imagen 7.2.7_03: Especificaciones de las botellas</i>	79
<i>Imagen 7.3_01: Esquema unifilar instalación</i>	80
<i>Imagen 7.4_01: Esquema visual atmosfera explosiva y símbolo ATEX</i>	81
<i>Imagen 7.4_02: Clasificación por zonas ATEX</i>	82
<i>Imagen 7.4_03: Marcado de los equipos ATEX</i>	83
<i>Imagen 7.4_04: Marcado de los equipos ATEX</i>	83
<i>Imagen 7.4_05: EPIS ATEX</i>	84
<i>Imagen 7.4_06: Reglamentación de sistemas de almacenamiento y aplicaciones del hidrógeno</i>	84



# 1.Introducción

En este apartado introductorio se desarrollan los hechos decisorios para la realización del trabajo, los objetivos, y las habilidades adquiridas en el trabajo.

## 1.1 Motivaciones y justificación

El problema energético es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad, el sistema energético actual es insostenible desde el punto de vista económico y medioambiental, el petróleo es una reserva cada vez más limitada y su dependencia y la contaminación dañan la salud de las personas y los ecosistemas [1].

La extracción de petróleo empieza a reducirse en 2010, y empiezan a ascender las renovables, pero desde entonces la población también se ha incrementado, y con ella la demanda energética, que según Naciones Unidas, seguirá en ascenso exponencial [2].

Las políticas de nuestros gobernantes han ralentizado un gran desarrollo para una infraestructura fotovoltaica [3], que aunque ha crecido estos últimos años, ya se hubiera podido evitar la importación y los elevados precios de la energía.

La construcción de los automóviles convencionales y electrodomésticos son las industrias más contaminantes que existen, aun así fabricar un coche eléctrico contamina 70% más que uno de gasolina [4], y esto se podría tolerar si las garantías de uso y vida útil fueran las mismas que hace unos años, pero el mercado permite la obsolescencia programada [5,6] con unos ciclos de vida de 5 años en dispositivos que antaño duraban 20 años, con tan solo doblar los años de garantía se evitaría el derroche de millones de gigavatios hora de energía cada año.

Los tratados de libre comercio permiten la importación innecesaria de alimentos y otros productos de disponibilidad nacional [7], consumiendo toneladas de combustible desde Canadá, Marruecos y demás países, generando gran conflicto para los agricultores nacionales, la degradación paulatina de nuestra soberanía alimentaria y la desindustrialización.

Por todas estas y más razones, es de extrema necesidad un sistema con infraestructuras competitivas, limpias y cada vez menos dependientes de los combustibles fósiles, que genere una nueva economía circular, con sistemas modulares para actualizar solo los componentes inservibles, en electrodomésticos, automóviles, plantas de generación eléctrica, etc.

El presente trabajo de final de carrera pretende que cualquier persona con unos mínimos conocimientos pueda entender y reproducir el diseño de una celda electrolítica de forma individual, en su domicilio o empresa que se adapte a las necesidades energéticas de sus infraestructuras, y sembrar ideas para nueva investigación.

Este trabajo, aunque tenga un enfoque práctico, es un estudio teórico sobre las posibilidades del hidrógeno en el ámbito cotidiano, en una situación real, siempre se tomarán en cuenta las medidas de seguridad y la comprobación de la normativa, por parte de personas competentes u organismos autorizados.

## 1.2 Objetivos

Este apartado se divide en tres partes, describiendo los objetivos de este TFG, numerados a continuación:

### 1.2.1 Objetivo global

El objetivo global de este trabajo es la implementación de un sistema de producción y almacenaje de hidrógeno verde de mayor eficiencia y fácil uso, que pueda ser utilizado tanto en el ámbito doméstico como en pequeñas empresas, de materiales accesibles y de fácil entendimiento por personas con unos mínimos conocimientos en electricidad y mecánica.

### 1.2.2 Objetivos parciales

1. Determinar las demandas de caudal en hidrógeno de los aparatos de mayor uso común, como son: estufas de gas, calentadores de agua, fogones de cocina, motores térmicos, y pilas de combustible.
2. El diseño de una celda electrolítica que logre abastecer las demandas requeridas.
3. Calcular la instalación fotovoltaica destinada a su producción.
4. Diseñar el sistema de almacenamiento y su funcionamiento.
5. Realización de un presupuesto.

### 1.2.3 Objetivos personales

El presente TFG ha requerido los siguientes objetivos personales para su realización.

1. Un trabajo de investigación sobre las posibilidades del hidrógeno.
2. Entender la química tras los procesos electroquímicos y cuantificarla.
3. Utilizar los conocimientos en electricidad en un nuevo ámbito.
4. Recordar conceptos de física, termodinámica.
5. Aprender nuevos conceptos de electrónica.
6. Asentar el conocimiento sobre el cálculo de una instalación solar.
7. Conocer los aspectos de seguridad y las normativas.

## 1.3 Asignaturas de la carrera aplicadas

Gracias a las siguientes asignaturas ha sido posible la realización de este trabajo, su influencia se dispone de mayor a menor por cada curso, especialmente por sus competencias y competencias transversales. A continuación, cada asignatura se describe en una tabla con su información principal, y sus competencias que existan. Los códigos de las asignaturas en las tablas tienen su enlace correspondiente de la escuela para más información.

La asignatura de Matemáticas I contempla el estudio de álgebra lineal, diagonalización, geometría, cálculo diferencial en una y varias variables, cálculo integral en una y varias variables.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12065</a>	Matemáticas I	Formación Básica	1	T	9

*Tabla 1.3\_01: Matemáticas I*

Materia	Competencia
Matemáticas I	Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.

*Tabla 1.3\_02: Competencias Matemáticas I*

La asignatura de Física trata sobre Campos escalares y vectoriales, cinemática, dinámica de la partícula y de los sistemas de partículas, dinámica de rotación, movimiento armónico simple, movimiento ondulatorio ondas mecánicas, propiedades comunes de las ondas e introducción a la óptica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12068</a>	Física	Formación Básica	1	T	9

*Tabla 1.3\_03: Física*

Materia	Competencia
Física	Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos, ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Física	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

*Tabla 1.3\_04: Competencias Física*

Materia	Competencia Transversal
Física	(09) Pensamiento crítico

*Tabla 1.3\_05: Competencias Transversales Física*

La asignatura de Electricidad ocupa los temas del estudio de la electrostática y campos magnéticos tales como el campo eléctrico y potencial, capacidad, corriente eléctrica, ley de Ohm, el campo magnético, flujo e inducción magnética, Leyes de Maxwell, Acoplamientos y circuitos magnéticos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12069</a>	Electricidad	Formación Básica	1	A	6

*Tabla 1.3\_06: Electricidad*

Materia	Competencia
Física	Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos, ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Física	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Física	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.

*Tabla 1.3\_07: Competencias Electricidad*

Materia	Competencia Transversal
Física	(13) Instrumental específica

*Tabla 1.3\_08: Competencias Transversales Electricidad*

La asignatura de Expresión Gráfica se ciñe a las técnicas de representación, concepción espacial, normalización, geometría, diseño asistido por ordenador y sistemas de representación.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12070</a>	Expresión gráfica	Formación Básica	1	A	6

*Tabla 1.3\_09: Expresión Gráfica*

Materia	Competencia
Expresión Gráfica	Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
Expresión Gráfica	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Expresión Gráfica	Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador.
Expresión Gráfica	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

*Tabla 1.3\_10: Competencias Expresión Gráfica*

Materia	Competencia Transversal
Física	(02) Aplicación y pensamiento práctico.

*Tabla 1.3\_11: Competencias Transversales Expresión Gráfica*

La asignatura de Química persigue dos grandes metas: por un lado, proporcionar las bases atómico-moleculares para interpretar las propiedades de interés (propiedades eléctricas y magnéticas) en los materiales de uso habitual en ingeniería eléctrica (conductores, semiconductores, aislantes y materiales dieléctricos); por otro dotar de las herramientas y conceptos indispensables para comprender los principios básicos de la electroquímica y su aplicación al estudio de dispositivos de conversión electroquímica de energía y de los fenómenos de corrosión metálica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12073</a>	Química	Formación Básica	1	A	6

*Tabla 1.3\_12: Química*

Materia	Competencia
Química	Capacidad para comprender y aplicar los principios de conocimientos básicos de la química general, química orgánica e inorgánica y sus aplicaciones en la ingeniería.
Química	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Química	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

*Tabla 1.3\_13: Competencias Química*

Materia	Competencia Transversal
Química	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional.
Química	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos

*Tabla 1.3\_14: Competencias Transversales Química*

La asignatura de Informática se centra en los conocimientos básicos sobre la estructura física y lógica del PC, conocer los sistemas operativos actuales, conocimientos teóricos y prácticos geometría de la programación, conocimientos teóricos y prácticos de las bases de datos y manejo de programas directamente relacionados con el título.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12072</a>	Informática	Formación Básica	1	B	6

*Tabla 1.3\_15: Informática*

Materia	Competencia
Informática	Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
Informática	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

*Tabla 1.3\_16: Competencias Informática*

Materia	Competencia Transversal
Informática	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Informática	(08) Comunicación efectiva

*Tabla 1.3\_17: Competencias Transversales Informática*

La asignatura de Circuitos Eléctricos está compuesta por el análisis de circuitos en corriente continua y en alterna en régimen permanente para sistemas monofásicos.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12079</a>	Circuitos Eléctricos	Obligatorio	1	B	4.5

*Tabla 1.3\_18: Circuitos Eléctricos*

Materia	Competencia
Tecnología Eléctrica	Conocimiento y utilización de los principios de la teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
Tecnología Eléctrica	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Tecnología Eléctrica	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería industrial.

*Tabla 1.3\_19: Competencias Circuitos Eléctricos*

Materia	Competencia Transversal
Tecnología Eléctrica	(13) Instrumental específica.

*Tabla 1.3\_20: Competencias Transversales Circuitos Eléctricos*

La asignatura de Máquinas y Mecanismos persigue dotar al alumno de los conceptos de cinemática y dinámica de máquinas. Profundizar en el estudio de distintos tipos de sistemas de transmisión, de mecanismos de levas y de las diferentes tipologías de mecanismos planos.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12076</a>	Máquinas y Mecanismos (IT2)	Obligatorio	1	B	4.5

*Tabla 1.3\_21: Máquinas y Mecanismos*

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.
Mecánica y Materiales	Conocimiento de los principios de teoría de máquinas y mecanismos.

*Tabla 1.3\_22: Competencias Máquinas y Mecanismos*

Materia	Competencia Transversal
Mecánica y Materiales	(04) Innovación, creatividad y emprendimiento.

*Tabla 1.3\_23: Competencias Transversales Máquinas y Mecanismos*

La asignatura Ciencia de Materiales tiene como objetivo dar a conocer el conjunto de materiales que tiene a su disposición el ingeniero Eléctrico para desarrollar su actividad profesional. La asignatura presenta un planteamiento dirigido a conocer la relación entre la estructura de los materiales y las prestaciones finales de los mismos.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12074</a>	Ciencia de Materiales	Obligatorio	1	B	4.5

*Tabla 1.3\_24: Ciencia de Materiales*

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales.
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales.

*Tabla 1.3\_25: Competencias Ciencia de Materiales*

La asignatura Matemáticas II es una ampliación de la materia de Matemáticas I del curso anterior. Sus objetivos incluyen la capacidad para resolver problemas que pueden plantearse en el campo de la ingeniería industrial, aplicando los conocimientos que se adquieren en el cálculo de ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales, mediante su resolución analítica y por métodos numéricos; el uso de la transformada de Laplace y su inversa, así como de técnicas de optimización.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12066</a>	Matemáticas II	Formación Básica	2	A	6

*Tabla 1.3\_26: Matemáticas II*

Materia	Competencia
Matemáticas	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Matemáticas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.
Matemáticas	Capacidad para la resolución de problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre, algebra lineal, geometría, geometría diferencial, cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales, métodos numéricos, algorítmica numérica, estadística y optimización.

*Tabla 1.3\_27: Competencias Matemáticas II*

Materia	Competencia Transversal
Matemáticas	(03) Análisis y resolución de problemas

*Tabla 1.3\_28: Competencias Transversales Matemáticas II*

La asignatura de Mecánica de Fluidos pretende introducir a los diferentes aspectos relacionados con la física de los fluidos y su flujo: propiedades de los fluidos, estática cinemática y dinámica de los mismos, flujos externos, etc. Se estudiará también algunas aplicaciones importantes de la mecánica de fluidos como pueden ser los sistemas hidráulicos a presión y el transporte en lamina libre. Por último, se estudian los aspectos básicos de las maquinas hidráulicas: topologías, funcionamiento, selección, instalación, etc.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12077</a>	Mecánica de Fluidos	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.3\_29: Mecánica de Fluidos

Materia	Competencia
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de los principios básicos de la mecánica de fluidos y su aplicación a la resolución de problemas en el campo de la ingeniería. Cálculo de tuberías, canales y sistemas de fluidos.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Tabla 1.3\_30: Competencias Mecánica de Fluidos

Materia	Competencia Transversal
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(03) Análisis y resolución de problemas
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(04) Innovación, creatividad y emprendimiento
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(06) Diseño y proyecto

Tabla 1.3\_31: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos

La asignatura de Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio tiene como objetivos: dar a conocer las herramientas y métodos de análisis de los circuitos eléctricos para poder abordar cualquier planteamiento eléctrico en la vida real; conocer los sistemas trifásicos que permitan al alumno abordar el problema de dimensionado de instalaciones eléctricas; capacitar al alumno para el análisis de la solución completa de todo tipo de circuitos excitados con fuentes cualesquiera: Manejo de los métodos clásicos, de las transformaciones de Laplace y de la frecuencia compleja; capacitar al alumno en el manejo del programa informático Pspice para la simulación del comportamiento eléctrico de sistemas reales en régimen transitorio y permanente.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12087</a>	Mecánica de Fluidos	Obligatorio	2	A	6

*Tabla 1.3\_32: Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio*

Materia	Competencia
Diseño y cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y maquinas eléctricas.
Diseño y cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.

*Tabla 1.3\_33: Competencias Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio*

Materia	Competencia Transversal
Diseño y cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(01) Compresión e integración

*Tabla 1.3\_34: Competencias Transversales Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio*

La asignatura de Estadística brinda al alumno las herramientas estadísticas para realizar cualquier investigación, plantear, organizar, presentar la información recogida, técnicas de Inferencia Estadística, modelos de investigación y manejo de las herramientas del programa informático Excel.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12067</a>	Estadística	Formación básica	2	A	6

*Tabla 1.3\_35: Estadística*

Materia	Competencia
Matemáticas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.
Matemáticas	Capacidad para la resolución de problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre, algebra lineal, geometría, geometría diferencial, cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales, métodos numéricos, algorítmica numérica, estadística y optimización.

*Tabla 1.3\_36: Competencias Estadística*

Materia	Competencia Transversal
Matemáticas	(09) Pensamiento crítico

*Tabla 1.3\_37: Competencias Transversales Estadística*

La asignatura de Termodinámica y Transmisión de calor se basa en el entendimiento de las máquinas térmicas donde se desarrollan los conceptos de calor, energía, trabajo y entropía. En la segunda parte de la asignatura se tratan los conceptos de radiación, conducción y convección térmica.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12078</a>	Termodinámica y Transmisión de calor	Obligatorio	2	B	4.5

*Tabla 1.3\_38: Termodinámica y Transmisión de calor*

Materia	Competencia
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

*Tabla 1.3\_39: Competencias Termodinámica y Transmisión de calor*

Materia	Competencia Transversal
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(03) Análisis y resolución de problemas
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional

*Tabla 1.3\_40: Competencias Transversales Termodinámica y Transmisión de calor*

La asignatura de Máquinas Eléctricas establece las bases de los circuitos magnéticos y de la conversión de energía en sistemas magnéticos dotados de movimiento, y se realiza un estudio riguroso de los transformadores monofásicos y trifásicos.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12080</a>	Máquinas Eléctricas	Obligatorio	2	B	4.5

*Tabla 1.3\_41: Máquinas Eléctricas*

Materia	Competencia
Tecnología Eléctrica	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.

*Tabla 1.3\_42: Competencias Máquinas Eléctricas*

Materia	Competencia Transversal
Tecnología Eléctrica	(11) Aprendizaje permanente

*Tabla 1.3\_43: Competencias Transversales Máquinas Eléctricas*

La asignatura de Electrónica relaciona al alumno con las bases de los circuitos electrónicos analógicos y digitales como son: conocer el funcionamiento de los componentes semiconductores como el diodo y el transistor bipolar; conocer el funcionamiento de amplificadores de señal, así como sus tipos y limitaciones; y conocer los sistemas digitales combinacionales.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12081</a>	Electrónica	Obligatorio	2	A	4.5

*Tabla 1.3\_44: Electrónica*

Materia	Competencia
Automática y Electrónica	Conocimientos de los fundamentos de la electrónica.
Automática y Electrónica	Conocimientos sobre los fundamentos de los automatismos y métodos de control.
Automática y Electrónica	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Automática y Electrónica	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.

*Tabla 1.3\_45: Competencias Electrónica*

Materia	Competencia Transversal
Automática y Electrónica	(03) Análisis y resolución de problemas

*Tabla 1.3\_46: Competencias Transversales Electrónica*

La asignatura de Sistemas de Producción Industrial se centra en proporcionar los conocimientos teóricos y prácticos sobre los distintos procesos industriales de fabricación, profundizando en los aspectos tecnológicos fundamentales de cada uno de ellos y en los requisitos necesarios para su uso e implementación.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12084</a>	Sistemas de Producción Industrial	Obligatorio	2	B	4.5

*Tabla 1.3\_47: Sistemas de Producción Industrial*

Materia	Competencia
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos básicos de los sistemas de producción y fabricación.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

*Tabla 1.3\_48: Competencias Sistemas de Producción Industrial*

Materia	Competencia Transversal
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(12) Planificación y gestión del tiempo

*Tabla 1.3\_49: Competencias Transversales Sistemas de Producción Industrial*

La asignatura de Resistencia de Materiales analiza los elementos estructurales sometidos a esfuerzos de tracción compresión, cortadura, torsión y flexión, solicitaciones combinadas y el análisis de los sistemas isostáticos e hiperestáticos.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12075</a>	Resistencia de materiales (IT2)	Obligatorio	2	B	4.5

*Tabla 1.3\_50: Resistencia de Materiales*

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales.
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales.

*Tabla 1.3\_51: Competencias Resistencia de Materiales*

Materia	Competencia Transversal
Mecánica y Materiales	(11) Aprendizaje permanente

*Tabla 1.3\_52: Competencias Transversales Resistencia de Materiales*

La asignatura de Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas trata el funcionamiento y estudio de turbinas de vapor, turbina de gas, turbinas hidráulicas, eólicas, compresores, ventiladores, bombas, etc. Además, se aborda el funcionamiento de los motores térmicos empleados también empleados para la distribución de energía eléctrica, motor turbina de vapor, de gas, ciclos combinados, y el motor de combustión interna alternativo, para ello se aborda el análisis del ciclo termodinámico que describe su funcionamiento con el fin de determinar las prestaciones en términos de potencia y rendimiento, aplicando posibles mejoras.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12092</a>	Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas	Obligatorio	3	B	4.5

*Tabla 1.3\_53: Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas*

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento sobre control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad para el diseño de centrales eléctricas.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento aplicado sobre energías renovables.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería Industrial.

*Tabla 1.3\_54: Competencias Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas*

Materia	Competencia Transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(05) Diseño y proyecto
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional

*Tabla 1.3\_55: Competencias Transversales Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas*

La asignatura Ampliación de Maquinas Eléctricas se establecen los principios generales de las maquinas eléctricas rotativas. También se realiza el estudio de las maquinas síncronas trifásicas.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12088</a>	Ampliación de Maquinas Eléctricas	Obligatorio	3	A	6

*Tabla 1.3\_56: Ampliación de Maquinas Eléctricas*

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de máquinas eléctricas.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la ingeniería industrial.

*Tabla 1.3\_57: Competencias Ampliación de Maquinas Eléctricas*

Materia	Competencia Transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(13) Instrumental específica

*Tabla 1.3\_58: Competencias Transversales Ampliación de Maquinas Eléctricas*

La asignatura de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión contempla el diseño e implantación de instalaciones eléctricas de todo tipo con suministro en baja tensión, principalmente en referencia al cálculo de líneas eléctricas, diseño de protecciones y topologías de instalación.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12090</a>	Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión	Obligatorio	4	A	7.5

*Tabla 1.3\_59: Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión*

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para aplicar el conocimiento sobre la seguridad y salud laboral, prevención de riesgos laborales y seguridad en máquinas, según la normativa vigente en protección activa y pasiva sobre incendios y aspectos de contaminación acústica.

*Tabla 1.3\_60: Competencias Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión*

Materia	Competencia Transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(01) Comprensión e integración
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(02) Aplicación y pensamiento práctico

*Tabla 1.3\_61: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión*

La asignatura de Energías Renovables ocupa los fundamentos de los diferentes métodos de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables. También se presenta la problemática del almacenamiento y control de la energía generada, que de agrava con el aumento de la producción ya que depende de factores no controlables, como el viento o la radiación solar.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12094</a>	Energías Renovables	Obligatorio	4	A	4.5

*Tabla 1.3\_62: Energías Renovables*

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento aplicado sobre energías renovables
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de ingeniero Técnico Industrial.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad de manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Poseer una cultura histórico-social y sensibilidad estética.

*Tabla 1.3\_63: Competencias Energías Renovables*

Materia	Competencia Transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(09) Pensamiento crítico
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos

*Tabla 1.3\_64: Competencias Transversales Energías Renovables*

La asignatura de Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables aborda el diseño e implantación de instalaciones eléctricas renovables en el campo de la energía solar y eólica.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12100</a>	Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables	Optativo	4	B	4.5

*Tabla 1.3\_65: Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables*

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Conocimiento aplicado sobre energías renovables.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Capacidad para la redacción forma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto: la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones en plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Capacidad de manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

*Tabla 1.3\_66: Competencias Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables*

La asignatura de Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos estudia las máquinas eléctricas rotativas, en ella se estudian las máquinas de continua y las asíncronas y se establecen las estrategias y métodos más utilizados en el control de las máquinas de continua y de las máquinas asíncronas.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12093</a>	Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos	Obligatorio	4	A	6

Tabla 1.3\_67: Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimientos sobre control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimientos sobre sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.

Tabla 1.3\_68: Competencias Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos

Materia	Competencia Transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(03) Análisis y resolución de problemas
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(11) Aprendizaje permanente
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(13) Instrumental específica

Tabla 1.3\_69: Competencias Transversales Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos

La asignatura Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas analiza los riesgos de una utilización indebida de la energía eléctrica y de la necesidad de adoptar sistemas de protección atendiendo a la naturaleza de las actividades a desarrollar, prevención de riesgos, primeros auxilios en accidentes de naturaleza eléctrica y los instrumentos de medida, tanto analógicos como digitales.

Código	Asignatura	Carácter	Curso	Sem	ECTS
<a href="#">12098</a>	Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas	Optativo	4	B	4.5

Tabla 1.3\_70: Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas.	Capacidad de manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.3\_71: Competencias Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas

## 1.4. Competencias transversales del trabajo final de grado

Las competencias transversales son habilidades que normalmente se desarrollan de forma personal y que en el campo de trabajo se convierten en poderosas herramientas laborales, estas, no dependen del ámbito de trabajo o estudio, sino que aparece a partir de la actuación profesional o académica.

En la *Tabla 1.4\_01* aparecen dichas competencias transversales y su respectivo código.

En la tabla *1.4\_02* se indica la competencia transversal y su asignatura correspondiente, siendo las asignaturas escritas de mayor a menor peso.

<b>Competencias transversales</b>	
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
(01)	Comprensión e integración
(02)	Aplicación y pensamiento práctico
(03)	Análisis y resolución de problemas
(04)	Innovación, creatividad y emprendimiento
(05)	Diseño y proyecto
(06)	Trabajo en equipo y liderazgo
(07)	Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
(08)	Comunicación efectiva
(09)	Pensamiento crítico
(10)	Conocimiento de problemas contemporáneos
(11)	Aprendizaje permanente
(12)	Planificación y gestión del tiempo
(13)	Instrumental específica

*Tabla 1.4\_01: Competencias Transversales.*

<b>Competencias transversales</b>	
<b>Código</b>	<b>Asignaturas</b>
(01)	Sistemas Eléctricos trifásicos y Régimen transitorio. Ampliación de Maquinas Eléctricas.
(02)	Electricidad Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión Ampliación de Máquinas Eléctricas
(03)	Matemáticas II Mecánica de Fluidos Termodinámica y transmisión de calor Control de Máquinas y accionamientos eléctricos Electrónica
(04)	Mecánica de Fluidos Máquinas y Mecanismos
(05)	Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas Mecánica de Fluidos
(06)	Informática Sistemas de Producción Industrial
(07)	Química Termodinámica y Transmisión de calor Motores Térmicos y Maquinas Hidráulicas Energías Renovables
(08)	Informática
(09)	Física Estadística Energías Renovables
(10)	Química Energías Renovables Ampliación de Maquinas Eléctricas
(11)	Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos Resistencia de Materiales Máquinas Eléctricas
(12)	Sistemas de Producción Industrial
(13)	Circuitos Eléctricos Electricidad Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos Ampliación de Maquinas Eléctricas

*Tabla 1.4\_02: Competencias Transversales de las asignaturas.*

## 2. El hidrógeno como alternativa

Una alternativa prometedora para la transición energética es el hidrógeno verde, se trata de una de las grandes apuestas de Europa en sus objetivos de descarbonización y agenda 2030, es un vector energético de gran versatilidad, limpio y renovable, ya que tan solo necesita agua con electricidad para su producción por electrólisis y sus únicos residuos son el vapor de agua.

Su aplicación más reconocida es la pila de combustible, pero en realidad, ya en 1807 uno de los inventores del motor térmico, Isaac de Rivaz, patentó el primer motor propulsado con hidrógeno [8], y desde entonces han habido muchos avances al respecto.

Hoy en día, muchas empresas y marcas de vehículos, creen estar ante la clave para un gran progreso en el campo de la automoción, y sus intentos en conseguir la viabilidad no han cesado, tanto en pila de combustible, como en el motor térmico convencional.

La marca Hyundai, ha puesto en fase de pruebas innovadores camiones de pila de combustible, para alcanzar sus metas en 2025. Vehículos como el Hyundai Nexa, Toyota Mirai, Honda Clarity, son movidos por pila de combustible y ya están en el mercado con unas características competitivas.

Por otro lado, también se han hecho intentos en vehículos de combustión interna, y se continúa buscando su viabilidad como combustible térmico. En 2008, BMW presentó un coche que utilizaba el hidrógeno en un gran motor térmico de 12 cilindros [9]. En 2021 Toyota participó en una competición de coches en Japón, con un vehículo propulsado por un motor térmico con hidrógeno [10,11]. La marca de camiones MAN, aseguran estar trabajando en tecnologías de movilidad con hidrógeno, como combustible térmico para corto plazo, [12] buscando comprobar la viabilidad de la tecnología.

Sea como sea su consumo, España tiene el mayor potencial de generación de energía renovable de toda Europa. Y se están llevando a cabo muchos proyectos en este ámbito. Como el de Almería, Mallorca, Puertollano, Vizcaya, etc [13-16].

Según Jaime Martín Juez, director corporativo de tecnología de Repsol, se van a poner en práctica grandes superficies de paneles fotovoltaicos para producir hidrógeno sin necesidad de red. Este gas también se podría utilizar para fabricar combustibles sintéticos, y cerrar el ciclo [17]. Un estudio de BloombergNEF estima que para 2050 el hidrógeno resuelva la cuarta parte de las necesidades eléctricas del mundo. Otro estudio del consejo mundial del hidrógeno asegura que en esta década todas las aplicaciones de este combustible serán rentables.

Para conseguir en 2050 cero emisiones de carbono, pero sobre todo dejar de depender de los combustibles fósiles, la idea principal de la economía del hidrógeno, es que todos los sistemas productores sean con energías renovables, para vivir en una sociedad sostenible y bajo nuestra propia soberanía, definido en 1987 Our Common Future [18].

## 2.1 Características del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, es un gas ligero, de una gran densidad energética por peso, y un excelente combustible limpio, ya que tan solo necesita agua con electricidad para su producción por electrólisis.

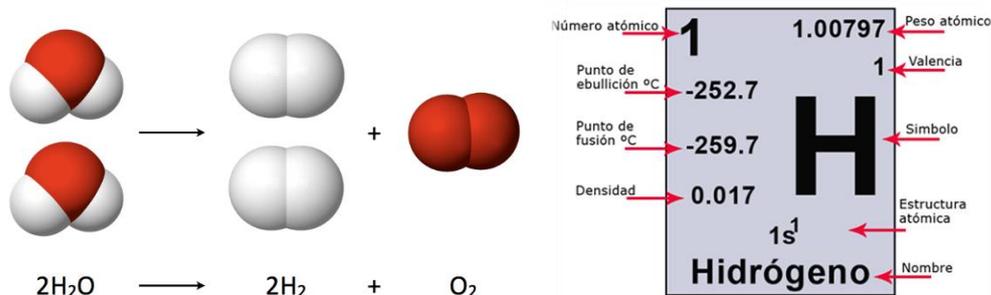


Imagen 2.1\_01: Descomposición de la molécula del agua en sus componentes.

Es el primer elemento de la tabla periódica, tan solo tiene un protón y un electrón, en su forma pura es un gas incoloro, inodoro, insípido y no es tóxico.

Tiene una gran versatilidad y simplicidad, sin embargo, este gas no se encuentra de forma natural en la tierra, sino que debe de producirse y para ello es necesario aplicar energía, por esta razón no se considera como una fuente de energía sino como un vector energético.

A partir de aquí, para expresar la unidad de volumen del hidrógeno, se nombra en normales metros cúbicos [ $\text{Nm}^3$ ], ya que es una unidad de volumen de gas no condensable a  $0^\circ\text{C}$  y a 1atm o 1,013 bar de presión, al ser puro y no disponer de agua su densidad relativa es del 0%, por esta razón se incluye una "N" en la unidad expresando su condición de normal.

	HIDRÓGENO	GASOLINA	PROPANO
<b>FÓRMULA MOLECULAR</b>	$\text{H}_2$	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\text{C}_3\text{H}_8$
<b>Poder calorífico Inferior [kJ/gr] [MJ/kg]</b>	120	50	46
<b>Densidad gas a 25°C; 1 atm [kg/m<sup>3</sup>]</b>	0.09	-	1.83
<b>Densidad gas a 25°C; 200 bar [kg/m<sup>3</sup>]</b>	15	-	-
<b>Densidad Líquido [kg/m<sup>3</sup>]</b>	71	720	493
<b>Densidad Energética [MJ/Nm<sup>3</sup>]</b>	10.5	36000	92.5
<b>Coefficiente de difusión en el aire</b>	0.61	0.05	0.16
<b>Límites de explosión (conc. en el aire) [%]</b>	4 -75	1 -7.6	2.1 - 9.5
<b>Límites de inflamabilidad [% vol ]</b>	4 – 74.5	1 - 7.6	3.1 - 15
<b>Energía mínima de ignición [mJ]</b>	0.017	0.24	0.26
<b>T. de Combustión Espontanea [K]</b>	858	501 - 744	760
<b>Temperatura de Ignición [K]</b>	773	729	766 - 876
<b>Velocidad de llama laminar [cm/s]</b>	250	37 - 43	25
<b>Emisiones [mg CO<sub>2</sub>/kJ]</b>	0	80	65
<b>Visibilidad de la llama</b>	No (UV)	Si	Si
<b>Toxicidad [combustible/emisiones]</b>	No/No	Si/Si	Si/Si

Tabla 2.1\_01: Tabla de propiedades del hidrógeno y carburantes. AIREMA y AEH

En la tabla se aprecia que el hidrógeno tiene un poder calorífico 2,4 veces superior a los demás combustibles en masa, pero su baja densidad gaseosa significa una menor cantidad de energía por unidad de volumen, en cambio con el hidrógeno licuado se consigue una mayor densidad.

El rendimiento de su extracción por electrólisis a partir del agua es del 85% según la Asociación Española del Hidrógeno. Su coeficiente de difusión del  $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ , esto significa que tiene una alta capacidad de mezclarse con el aire o con otros gases o elementos.

Tiene una gran velocidad de combustión, su velocidad de llama laminar es de hasta  $250 \text{ cm/s}$  dependiendo de su concentración de oxígeno [19], alcanzando aproximadamente 10 veces la velocidad de combustión de la gasolina o gas natural.

Además, tiene una amplia gama de inflamabilidad, lo que significa que su combustión es posible a muchas concentraciones distintas, con un porcentaje o relación de combustible menor a la estequiométrica necesaria para una combustión teórica, es decir, que puede funcionar con mezcla pobre.

Necesita una baja energía de ignición, por lo que se pueden utilizar bugías con chispa de menor consumo.

Su llama es incolora, la reacción producida por su combustión se puede observar en el espectro de la radiación ultravioleta.

Dependiendo de la concentración de oxígeno la temperatura adiabática de su llama puede variar entre 2045 y 2400, con el aire como comburente (de un 21% de oxígeno), pero en oxígeno puro puede alcanzar los 3200 grados centígrados [20,21].

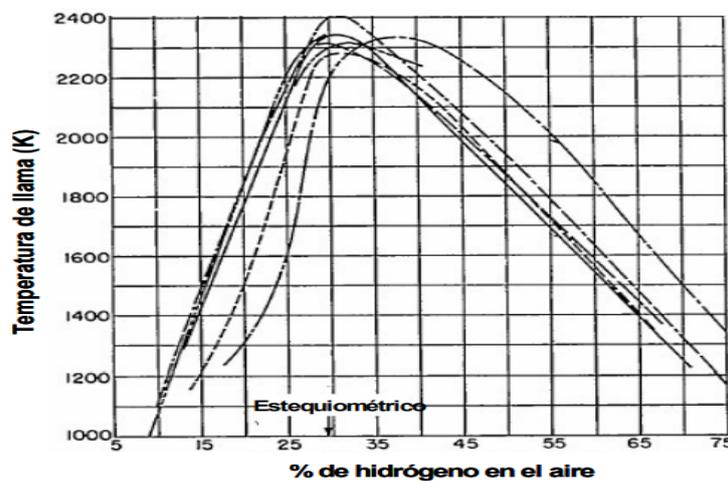


Imagen 2.1\_02: Gráfico de las temperaturas según la concentración de hidrógeno en el aire [19].

## 2.2. Colores del hidrógeno

Según la procedencia de la energía, el hidrógeno producido se denomina de un color:

**El hidrógeno gris:** es el método más utilizado por su bajo precio, se produce con el uso de carbón, o combustibles fósiles, por medio de un proceso químico llamado gasificación del carbón, por reformado con vapor, pirólisis, y otros. Produciendo grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y contaminación.

**El hidrógeno azul:** Es producido mediante el reformado de gas natural en el que se separa el hidrógeno del CO<sub>2</sub>, con un reformado con vapor de agua en el que se aplican hidrocarburos y alcoholes, aprovechando el metano del gas para obtener el hidrógeno, con una menor huella de carbono.

**El hidrógeno verde:** es el producido con energía de origen renovable como son eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, geotérmica, fotovoltaica, por lo que es más costoso de producir, aun así, en mayo de 2022 su precio oscila entre 3 y 10 euros el kilo.

También se puede obtener mediante procesos biológicos como fermentación, bioreactores de algas, termólisis o fotobiológicos, menos desarrollados pero creciendo, por las grandes ventajas en la reducción del CO<sub>2</sub>.



Imagen 2.2\_01: Metodologías de producción del hidrógeno en el mundo [22-24].

### 2.3. Almacenamiento, transporte y seguridad

En este apartado se describen las distintas formas que existen de almacenar el hidrógeno, sus formas de distribución, logística y por último sus aspectos de seguridad más importantes.

#### 2.3.1. Tipos de almacenamiento

El almacenamiento es uno de los grandes retos para la viabilidad del hidrógeno como combustible, la siguiente imagen es un diagrama con las fases en las que este gas se puede almacenar.

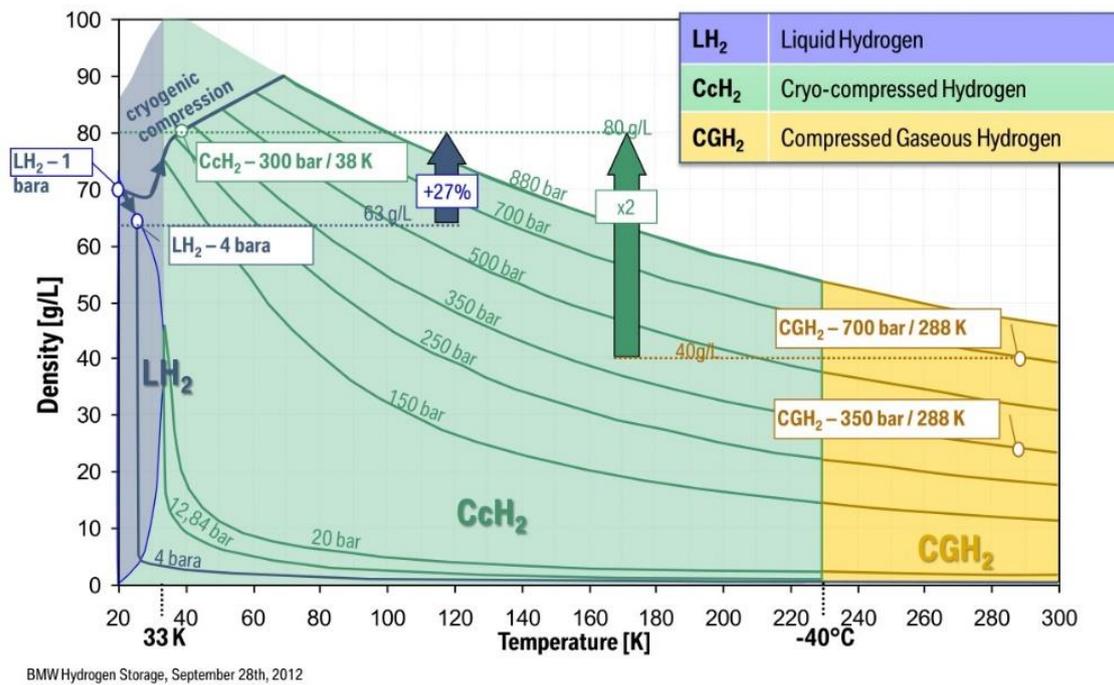


Imagen 2.3.1\_01: Gráfico de las fases del hidrógeno.

- **CGH<sub>2</sub>**: Hidrógeno gaseoso comprimido (Compressed Gaseous Hydrogen)
- **CcH<sub>2</sub>**: Hidrógeno líquido a gas comprimido.
- **LH<sub>2</sub>**: Hidrógeno líquido (Liquid Hydrogen).

Masa H2 (kg)	H2 gas (Nm3)	H2 liquido1 (litros)	Energía (MJ)	Energía (kWh)
1	11.12	14.12	120	33.33
0.0899	1	1.27	10.8	3
0.0708	0.788	1	8.495	2.359
0.00833	0.0926	0.1177	1	0.278
0.03	0.333	0.424	3.6	1

Tabla 2.3.1\_01: Equivalencias Asociación Española del Hidrógeno [25].

### 2.3.1.1. Estado Gaseoso

Debido a el tamaño tan pequeño de su molécula en estado gaseoso tiene una gran difusividad, filtrándose entre las porosidades del material del que este fabricado su recipiente, lo que implica unas medidas especiales.

La forma más simple de almacenar el hidrógeno es comprimirlo en fase gaseosa, proceso en el que se consume aproximadamente un 15% de la energía. Las presiones normalizadas son de 200, 350 y 700 bares.

En los ficheros anexos se muestra un documento Excel destinado al grupo electrógeno, pero si se modifica su cilindrada a 2000 cm<sup>3</sup>, y de tratarse de un vehículo con un depósito de 100L a 350 bar, permitiría alcanzar una autonomía de 73 km.

Los tanques de acero son muy pesados y generan considerables problemas, se lleva unos años ensayando con materiales tipo composite poliméricos para sustituir el acero, con su misma seguridad. Se han desarrollado tanques ligeros a base de 3 capas, una polimérica de nylon, intermedia de resina epoxy con fibra de carbono para mayor rigidez, y al exterior de fibra de vidrio. Así se reduce el peso en el Toyota MIRAI.

Según sus características, los cilindros, tanques o botellas, balas o bombonas, para su almacenaje se clasifican en tipos: I, II, III, IV.

Los de tipo I son de acero o aluminio, que admiten una presión máxima de 200 bar acero y 175 aluminio.

Los de tipo II son más ligeros, tienen el metal reforzado con filamentos de fibra de carbono o de vidrio y trabajan hasta presiones de 263 bar los de aluminio y fibra de vidrio, mientras los de acero y carbono soportan hasta 299 bar.

Los de tipo III son aún más ligeros, fabricados de carbono, fibra de vidrio kevlar, y una fina capa de aluminio, soportando hasta 350 bar los de fibra de vidrio y 450 bar los de kevlar.

Los de tipo IV son los más ligeros, también fabricado de materiales compuestos, y aun así tiene inconvenientes por la elevada difusividad del hidrógeno.

### 2.3.1.2. Estado Líquido

El hidrógeno líquido debe mantenerse a una temperatura de -253 °C, en un almacenamiento criogénico, lo que requiere una gran cantidad de energía mayor que en estado gaseoso, y los recipientes deben tener un aislamiento térmico muy elevado y costoso. El hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de los 20.39 K, que son -252.76 °C. De esta forma se consigue una densidad de 71 kg/m<sup>3</sup>.

Según el ciclo de Carnot el proceso de licuefacción es de entre 3.3 y 10 kWh/kg de H<sub>2</sub>, las perdidas en el almacenamiento en el peor caso serían el 30% del contenido energético del hidrógeno, por lo que es un proceso poco versátil y costoso.

También en estado líquido, aunque con una mayor energía de extracción, se encuentra el almacenamiento en forma de agua, esta supera tanto en masa como en volumen la densidad energética de los combustibles fósiles, a una presión y temperatura normales. Este método no se utiliza por la elevada potencia que actualmente es necesaria para igualar la extracción con un consumo inmediato, aun así, en el apartado 4.4.2 se determina la relación entre potencia y caudal, ya que podría ser una alternativa para centrales térmicas con una gran superficie de radiación solar. Esta relación es de  $134 \frac{W}{mg/s}$  y podría ser expresado como potencia entre caudal o como energía entre masa.

### 2.3.1.3. Estado Sólido

Esta tercera opción, también poco utilizada, está el método de los hidruros metálicos. Consiste en la utilización de diversos metales y aleaciones que forman redes cristalinas y sirven como estructura para empaquetar las moléculas de hidrógeno con las que se consiguen unas densidades de almacenamiento mayores que el gas comprimido, aunque sus aplicaciones siguen siendo limitadas por su elevado peso y coste. Para liberar el hidrógeno de la estructura metálica se requiere calor, que sería suficiente con el residual generado por la pila de combustible o del motor. También se está empezando a estudiar, aunque no tiene ni la fiabilidad ni la garantía del anterior, el carbón activado, los nanotubos de carbono, lechos de carbón molecular, grafito, nano fibras, fulerenos, etc. En forma de compuestos químicos (NH<sub>3</sub>, tolueno, etc.) en microesferas de vidrio, y en zeolitas. [26]

CARACTERÍSTICAS	DIESEL	H2 GAS	H2 LÍQUIDO	AGUA
Energía almacenada [MWh]	10	1.4	2.3	22.2
Presión tanque [bar]	1 atm	700	1 atm	1 atm
Temperatura tanque [°C]	25	25	-252.76	25
Volumen tanque [m <sup>3</sup> ]	1	1	1	1
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	850.8	0.09	71	1000
Densidad energética por masa [MJ/kg]	42.6	120	120	80
Densidad energética por volumen [MJ/m <sup>3</sup> ]	36210	5047	8520	80000

Tabla comparativa de combustibles a distintos estados, cálculo propio [19].

1m<sup>3</sup> de Diesel contiene una energía de:

$$1m^3 \cdot \frac{850 \text{ kg}}{m^3} \cdot \frac{42.6 \text{ MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{\text{J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 10 \text{ MWh}$$

1m<sup>3</sup> de hidrógeno gaseoso a 700 bar contiene una energía de [25] (factor de compresibilidad):

$$1Nm^3 \cdot \frac{700 \text{ bar}}{1.498} \cdot \frac{0.09 \text{ kg}}{Nm^3} \cdot \frac{120 \text{ MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{\text{J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1.4 \text{ MWh}$$

1m<sup>3</sup> de hidrógeno líquido.

$$1m^3 \cdot \frac{71 \text{ kg}}{m^3} \cdot \frac{120 \text{ MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{\text{J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2.3 \text{ MWh}$$

1m<sup>3</sup> de agua líquida.

$$1m^3 \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} \cdot \frac{2 \text{ H}_2}{3 \text{ H}_2\text{O}} \cdot \frac{120 \text{ MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{\text{MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{\text{J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 22 \text{ MWh}$$

### 2.3.2 Transporte y distribución

En forma gaseosa, el transporte estaría limitado no solo por el peso de las botellas, sino por el volumen, y la inversión en seguridad lo hace un negocio menos rentable que la gasolina, aunque el tiempo de repostaje es similar al de gasolina los sistemas de seguridad deben ser muy elevados, para reducir costes también se podría cambiar la botella como en automoción a GLP o en los domicilios.

A gran escala su transporte más aceptado es el hidrógeno líquido en barcos, y por gaseoductos, pero este último puede generar problemas por su posible mezcla con el oxígeno del aire, en todo su recorrido y por su difusividad ante posibles fugas.

### 2.3.3 Seguridad

Debido a su baja densidad el gas aislado  $H_2$  es mucho más liviano y cualquier fuga tiende a subir y escapar rápidamente a la atmósfera, cualidad que lo hace ser más seguro frente al gas natural en espacios abiertos, y en espacios cerrados debidamente ventilados.

No solo no es tóxico, sino que incluso tiene un gran poder antioxidante y se está investigando para tratamientos de salud [27], en la salud humana su único riesgo está limitado a la asfixia por el desplazamiento del oxígeno.

Sus altos límites de inflamabilidad y mayor temperatura de combustión espontánea hacen más difícil que se produzca una explosión en ambientes con bajas concentraciones.

El efecto Joule-Thomson de este gas, es un caso especial, la mayoría de los gases se calientan al comprimirse, pero el hidrógeno hace lo contrario, al comprimirse se enfría y al expandirse se calienta.

Para comprimir el gas debe ser en ausencia de oxígeno, de lo contrario puede producirse una deflagración y producir graves daños.

En caso de una fuga o fractura de un cilindro, al igual que el gas natural, podría generar una gran fuerza con la expansión de este, de no estar sujeto podría propulsarse y provocar daños, también podría provocar una autoignición por el cambio brusco de presión en contacto con el oxígeno del aire produciendo una reacción exotérmica muy caliente y casi invisible, que duraría hasta vaciarse por completo, sin embargo, este método es ampliamente utilizado de forma segura y siguiendo las medidas de precaución, especialmente en aquellos asociados a la alta presión, pueden evitarse estos problemas [28].

### 3. Electrólisis

En este apartado se intenta explicar al lector el proceso químico para su comprensión, a continuación, se da paso a las tecnologías existentes, y por último la configuración de los electrodos en las celdas.

#### 3.1 Concepto

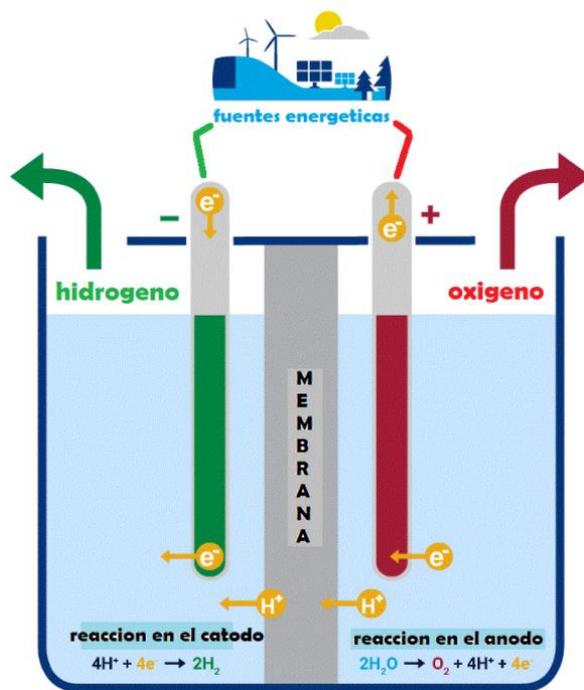


Imagen 3.1\_01: Proceso de Electrólisis Alcalina

La electrólisis es la descomposición del agua en sus moléculas elementales formando gas de hidrógeno y oxígeno mediante una corriente eléctrica [29].

Es una reacción química no espontánea, es decir, forzada, porque se necesita una energía eléctrica externa añadida, formando hidrógeno ( $H_2$ ) en el cátodo (electrodo negativo) y oxígeno ( $O_2$ ) en el ánodo (electrodo positivo)

Los electrodos sumergidos en el agua tienen distintas reacciones, reduciéndose el cátodo y oxidándose el ánodo. La disociación de los gases se produce cuando los electrodos atraen para sí los iones de carga opuesta.

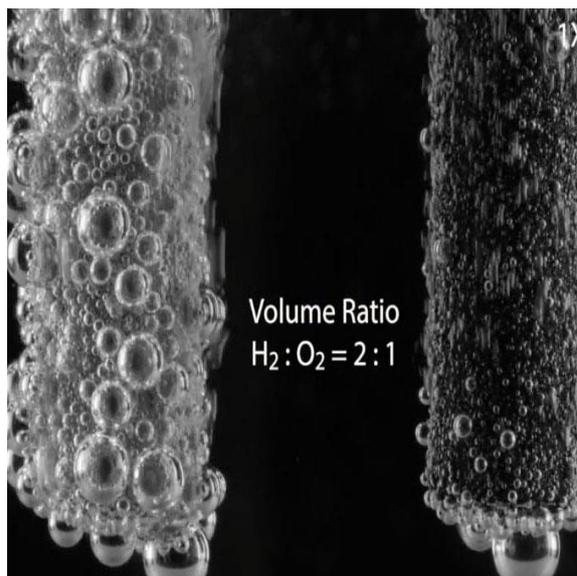


Imagen 3.1\_02: Cátodo y ánodo con su producción de gas.

En el cátodo, un electrón se une a un hidrógeno del agua liberándolo, y dos hidrógenos atómicos se unen para formar una molécula de  $H_2$  más estable que sube a la superficie en forma de gas, y quedan iones  $OH^-$  de carácter básico.

En el ánodo, saltan dos electrones del oxígeno del agua a dicho electrodo, liberando oxígeno, dos iones  $H^+$  de carácter ácido, y dos oxígenos monoatómicos que se juntan para formar la molécula de  $O_2$  que sube en forma de gas.

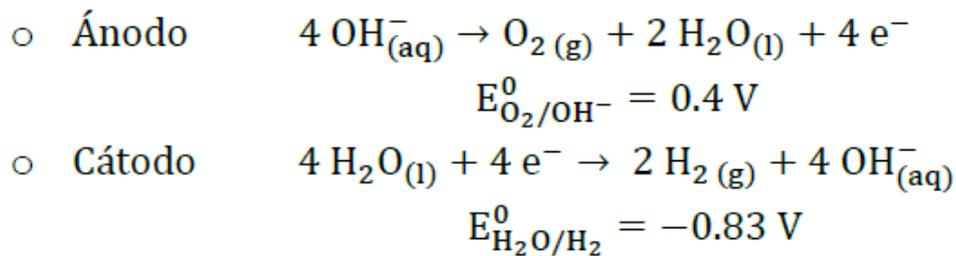
Los iones  $OH^-$  se dirigen al ánodo y los  $H^+$  se dirigen al cátodo, al encontrarse se combinan formando agua.

Para llevar a cabo la electrólisis del agua se utilizan dispositivos diseñados especialmente para ello llamadas celdas electrolíticas, o celdas de hidrógeno. Estos dispositivos constan, en su construcción más simple, de láminas metálicas de polaridades opuestas enfrentadas a una distancia y separadas por un electrolito donde se produce la reacción.

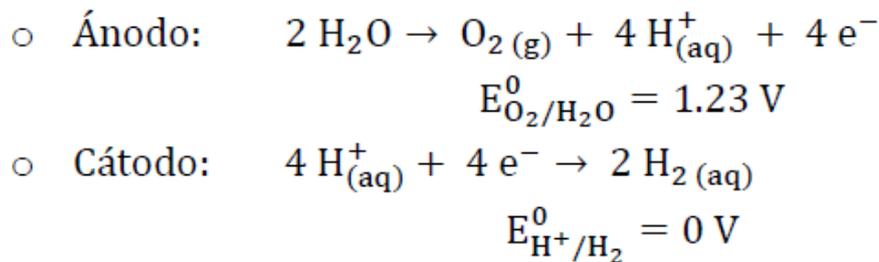
Este proceso se comprende en las siguientes fases:

- Ionización: Formación de especies químicas con carga eléctrica en los átomos, debido a la extracción de electrones.
- Orientación: Por medio de la corriente eléctrica, los iones negativos (aniones) y los positivos (cationes) se dirigen al electrodo correspondiente (ánodo y cátodo respectivamente).
- Descarga: Los aniones situados en el ánodo ceden electrones mientras que los cationes del cátodo los adquieren.

Este proceso se puede ejecutar con dos reacciones distintas:

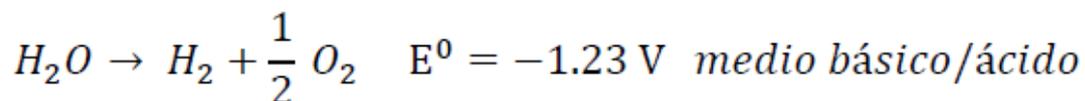


*Imagen 3.1\_03: Reacción en medio alcalino*



*Imagen 3.1\_04: Reacción en medio básico*

Pero la reacción global en ambos casos es la suma de las semireacciones:



*Imagen 3.1\_05: Reacción global*

## 3.2 Tecnologías existentes

Para describir las tecnologías de producción de hidrógeno, es necesario entender los componentes básicos que tienen en común todas ellas:

El stack es el compartimento donde se deposita el agua para la reacción electroquímica.

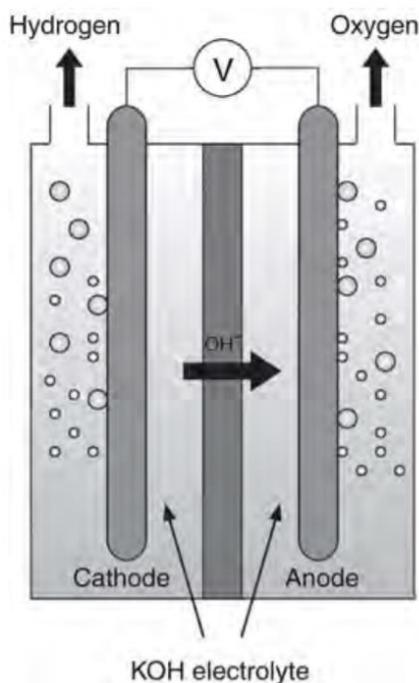
Los electrodos son las placas metálicas que se sumergen en el electrolito, transfieren los electrones al agua desde la alimentación, son el ánodo y cátodo, los fabrican de materiales con características muy determinadas, entre las que debe estar su conductividad y la resistencia a la corrosión.

El electrolito es la solución producto del agua con un compuesto para hacerla conductora de los iones, cuya función será transportar las cargas de un electrodo al otro, es común utilizar hidróxido de sodio NaOH o hidróxido de potasio KOH para aumentar la conductividad del agua, reduciendo la resistencia, la tensión de la celda y elevar la corriente.

La membrana separadora aísla los gases producidos a ambos lados de la reacción, permitiendo el paso de los iones.

Conocidos los componentes básicos se describen las tecnologías actuales:

### 3.2.1 Electrolizador alcalino (AWE)



Es la más utilizada, la reacción se produce en una solución electrolítica líquida como el hidróxido de sodio (NaOH) o de potasio (KOH) que se disuelven en el agua.

Sus electrodos no necesitan metales nobles y son normalmente de Níquel, por lo que su precio es relativamente económico, utiliza un aislante cerámico que se utiliza para separar los gases permitiendo la transferencia de los iones, sin embargo, se produce el cruce de gases y el grado de pureza del hidrógeno es menor. Permite la producción a gran escala y tiene una considerable durabilidad. opera con densidades de corriente de 0.2 – 0.4 A/cm<sup>2</sup>. La densidad de potencia que permite es inferior a 1 mW/cm<sup>2</sup>, la tensión de la celda varía entre 1.8 y 2.4 V.

Imagen 3.2.1\_01: Electrolizador alcalino [30].

### 3.2.2 Electrolizadores de Membrana Polimérica (PEM)

La electrolisis PEM cuyas siglas corresponden a Proton Exchange Membrane se basa en la conducción de los protones a través de la membrana, fabricada con un polímero, la membrana, al estar tratada con un ionómero ácido, o con fluor y sulfuros, obliga a que los electrodos sean metales de transición, de un comportamiento más estable, como rodio, rutenio, platino, iridio, y sus óxidos

Los electrodos suelen usar platino en el cátodo e iridio en el ánodo, y las GDL (gas difusión layer) que entre sus cometidos está proporcionar camino a los gases entre los electrodos, disipar el calor durante la operación, y proporcionar una solidez mecánica al conjunto.

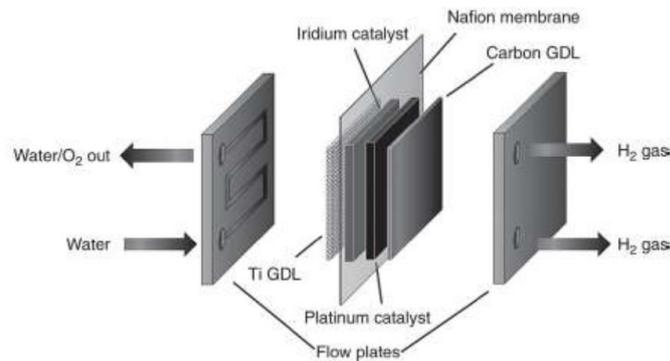
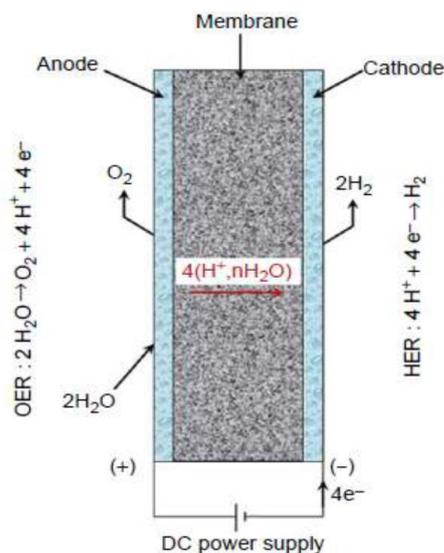


Imagen 3.2.2\_01: Electrolizador PEM [30].

Las membranas permiten el paso de los iones entre cátodo y ánodo al mismo tiempo que separan los gases producidos en cada electrodo evitando su mezcla.

El agua que se divide en el ánodo forma oxígeno y se generan protones que se transfieren al cátodo para, con cuatro electrones, formar la molécula de hidrógeno, considerado este proceso como electroósmosis.



Los protones solvatados con moléculas de agua formados en el ánodo atraviesan la membrana hasta el cátodo por efecto del campo eléctrico, una vez llega cesa la solvatación y se reducen a hidrógeno molecular.

Sus ventajas son unas mayores densidades de corriente por la mayor conductividad de sus electrodos, altas eficiencias de voltaje, y la alta pureza de los gases.

Desventajas son el alto coste de los materiales electrocatalizadores como son el platino, el rodio, el iridio en un medio ácido corrosivo, por lo que tiene una baja durabilidad y reducida potencia de trabajo.

Imagen 3.2.2\_02: Sección transversal de una celda PEM [30].

El voltaje de la celda ronda los 1.8-2.2V con densidades de corriente de hasta 2A/cm<sup>2</sup>

	Alkaline electrolyzer	Proton exchange (PEM) electrolyzer
Cell temperature/(°C)	60–80	50–80
Cell pressure/(10 <sup>5</sup> Pa) (bar)	<30	<30
Current density/(mA cm <sup>-2</sup> )	0.2–0.4	0.6–2.0
Cell voltage/V	1.8–2.4	1.8–2.2
Power density/(mW cm <sup>-2</sup> )	<1	<4.4
Efficiency (HHV)/(%)	62–82	67–82
Specific energy consumption stack/(kW h) (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> H <sub>2</sub>	4.2–5.9	4.2–5.6
Specific energy consumption system/(kW h) (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> H <sub>2</sub>	4.5–7.0	4.5–7.5
Partial load range/(%)	20–40	5–10
Cell area/(m <sup>2</sup> )	>4	<0.03
H <sub>2</sub> production rate/(Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	<760	<10
Lifetime stack/h	<90 000	<20 000
Lifetime system/a (years)	20–30	10–20
Degradation rate/(μV h <sup>-1</sup> )	<3	<14

Imagen 3.2.2\_03: Comparativa electrolisis alcalina y PEM [30].

### 3.2.3 Electrolizador de membrana de intercambio aniónico (AEM)

La electrolisis AEM junta los principios de la electrolisis alcalina y la PEM para obtener un nuevo sistema con más ventajas.

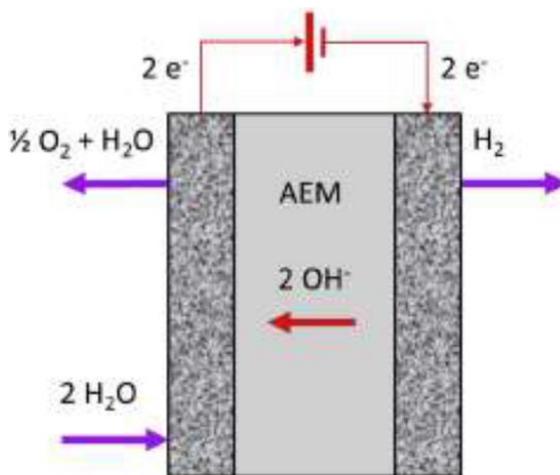


Imagen 3.2.3\_01: Electrolizador AEM

Su funcionamiento es similar a la PEM, tan solo cambia el ion implicado en el proceso, en este caso el anión. La membrana consta de un esqueleto carbonatado que permite el intercambio de los aniones.

La primera reacción es en el cátodo, que se reduce formando hidrógeno y iones hidróxido, estos iones al tener carga negativa son atraídos al ánodo de carga positiva, cruzando la membrana para poder llegar, donde se recombinan con los electrones formando agua y oxígeno.

La membrana comercial más usada es la A-201 de Tokuyama Corporation.

Al trabajar en un medio alcalino, estos electrolizadores tienen una menor corrosión y una mayor movilidad de los electrones. Su voltaje normal es de 1.9V para una densidad de corriente de 0.5 A/cm<sup>2</sup> a 40°C.

El principal problema es la formación de iones de carbonato que reducen su vida útil, pero se sigue trabajando en reducir estos efectos.

### 3.2.4 Electrolizador de óxido sólido (SOEC)

En este sistema el electrolizador se alimenta con vapor de agua, por lo que este alcanza una temperatura de entre los 800 y 1000°C, y altas presiones. A mayor temperatura menor es la energía eléctrica utilizada para la separación de la molécula del agua.

Utiliza una membrana de óxido cerámico, y el vapor, al contacto con el cátodo se reduce produciendo hidrógeno y aniones de oxígeno. Los óxidos sólidos actúan como electrolito, separadores de las semiceldas y además conducen los iones. Estos iones de oxígeno migran al ánodo donde se produce oxígeno y electrones que se aprovechan en la reacción del cátodo.

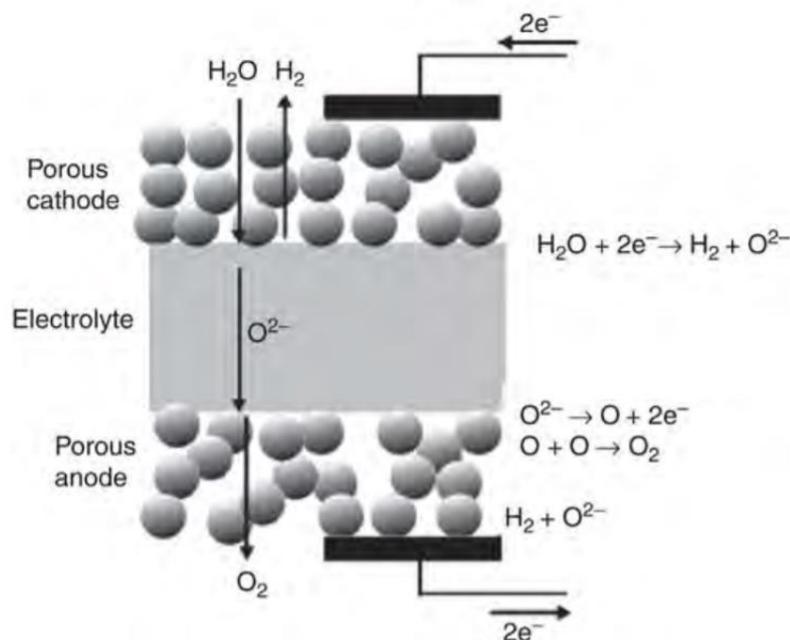


Imagen 3.2.4\_01: Electrolizador SOE [30].

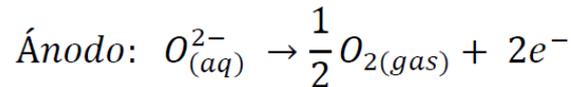
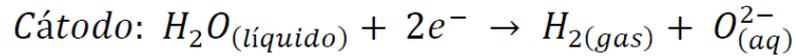
En este sistema utiliza como electrolito zirconio  $ZrO_2$  estabilizada con ytrio y óxidos de escandio. Este material permite una buena conductividad iónica a altas temperaturas.

Principalmente se usan placas bipolares el acero inoxidable 316L y manganita recubierta del electrolito de zirconio. Las altas temperaturas no permiten usar electrocatalizadores, aunque sigue usándose platino para asegurar un buen contacto eléctrico entre celdas.

En el cátodo se usa cermet (aleación metal-cerámica) con níquel y circonio, y en el ánodo se usa platino dopado con manganita de lantano.

El sistema no requiere un agua de gran pureza, aunque si influye en la velocidad de la reacción degradación, tampoco necesita electrodos de metales nobles.

Es posible operar a elevadas densidades de corriente obteniendo eficiencias cercanas al 100% (3,6A/cm<sup>2</sup> a 1,48V y 950°C).



*Imagen 3.2.4\_02: Reacción celda SOE [30]*

Todos estos electrolizadores tienen en común que separan los gases resultantes para obtener el hidrógeno de la mayor pureza dentro de las posibilidades, y aquí, la principal importancia la tienen las membranas separadoras.

Si no existieran estas membranas los gases se mezclarían formando gas oxhídrico (HHO), que tiene sus aplicaciones como sopletes y soldadores y en la industria metalúrgica, pero tiene una elevada volatilidad y no se puede almacenar.

### 3.2.5 Membranas separadoras

Esta lámina separa el anolito del catolito, usa como materiales asbestos, titanato de potasio, polipropileno.

Esta lamina polimérica de una porosidad micrométrica permite que no se mezclen los gases producidos en los electrodos enfrentados, mientras permite la electroneutralidad del sistema al permitir el paso de los iones.

Pueden distinguirse dos tipos de membranas separadoras.

#### 3.2.5.1 Membranas de intercambio protónico o catiónico:

Utilizadas principalmente en los equipos PEM, está formada por grupos cargados negativamente como: -SO<sub>3</sub>, -COO, PO<sub>3</sub>H, fijos en el esqueleto de la membrana, el más común es nafión. Un tetrafluoretileno sulfonado basado en un polímero fluorado.

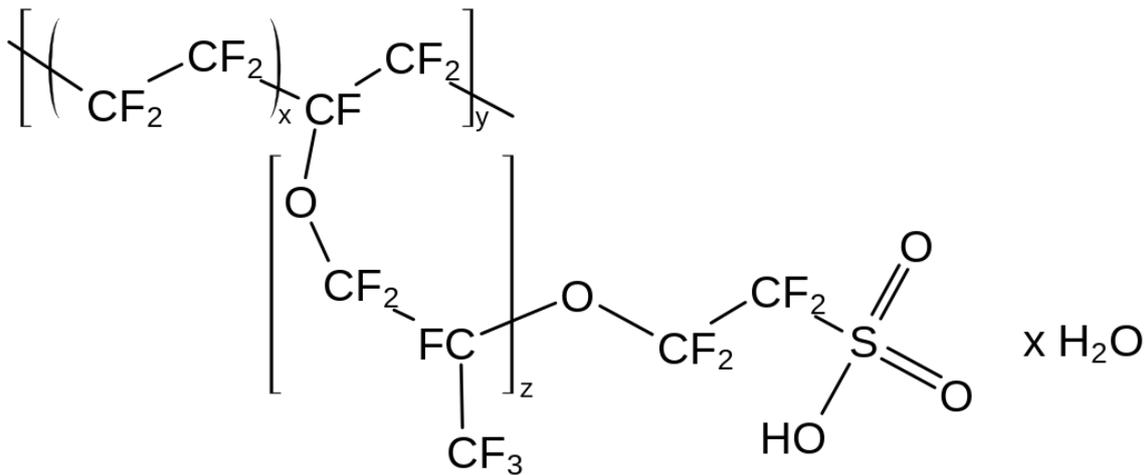


Imagen 3.3\_02: Estructura Nafión

Sus propiedades son la alta conductividad de cationes, su resistencia química, muy selectiva y su estabilidad térmica y mecánica, lo que la hace adecuada para electrolizadores y pilas de combustible.

### 3.2.5.2 Membranas de intercambio aniónico

Utilizadas principalmente en electrolisis AEM, están compuestas por grupos de carga positiva como  $-NH_3$ ,  $PR_3$ ,  $SR_2$ , que permiten el paso de los grupos de carga negativa. Están basadas en grupos de amonio cuaternarios, ácido sulfónico perfluorado y en polímeros de politetrafluoroetileno (PTFE o en castellano Teflón).

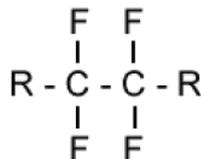


Imagen 3.3\_02: Estructura monómero PTFE o teflón.

Sus propiedades son una alta conductividad iónica, una gran estabilidad química, y resistencia en medios alcalinos, resistencia a la oxidación, altamente selectiva para el agua, y su alta eficiencia.

A la hora de elegir una membrana se estudian factores como:

-Eficacia a distintas intensidades de corriente: En un estudio de Vincent Kruger and Bessarabov en 2017 en el que se comparan varias membranas comerciales, la A201, FAA-3 y FAA-3-PP-75, comprobando que a bajas densidades de corriente la FAA-3 es más eficaz, pero a mayores densidades de corriente de  $0.6 \text{ A/cm}^2$ , la A201 tiene una eficacia mayor.

-Estabilidad; que mantenga a distintas corrientes y temperaturas con una tensión constante.

-Permeo selectividad, capacidad de discriminar entre iones de carga opuesta.

### 3.3 Configuración de los electrodos

Tras esta información se puede entender que todas las celdas tienen el común su construcción eléctrica, tan solo cambia la naturaleza química de la reacción por los compuestos del electrolito, los electrodos utilizados y la membrana. Para reproducir y mejorar su capacidad de funcionamiento en todas ellas se tiene la opción de una construcción más sencilla mediante los electrodos bipolares.

Los electrodos monopolares tan solo tienen la polaridad de ánodo o cátodo ya que sus conexiones eléctricas son directas con la fuente de alimentación:

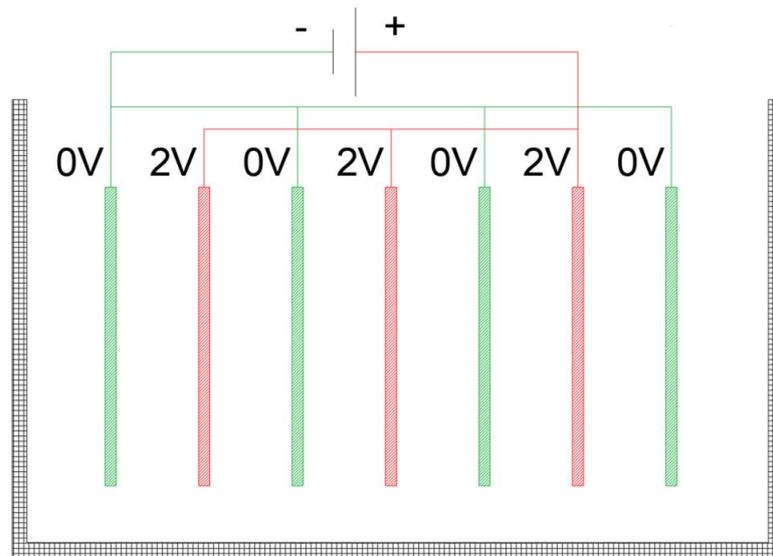


Imagen 3.4\_01: Configuración monopolar, ilustración propia.

Los electrodos bipolares son placas intermedias, sin conexión eléctrica, en las que se induce una polaridad en cada cara por efecto de la tensión externa, esta configuración reduce espacio entre electrodos ya que no es necesario una conexión directa con la alimentación, permite facilitar el montaje, la compactación, y es más económico.

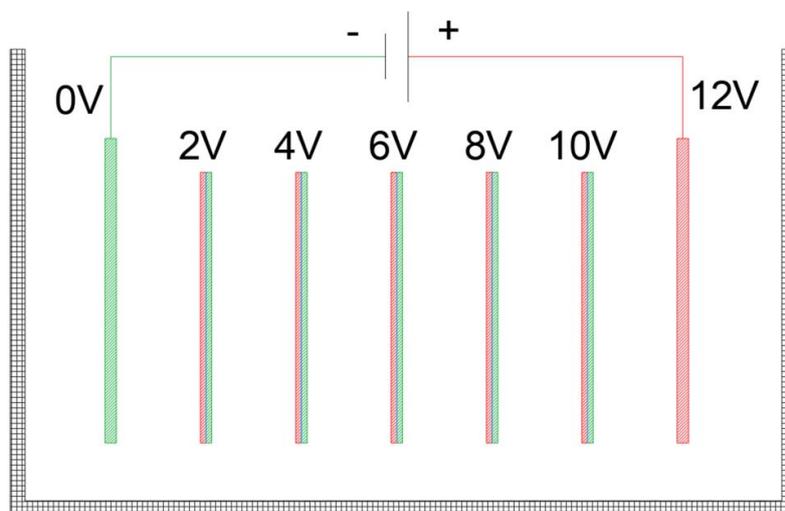
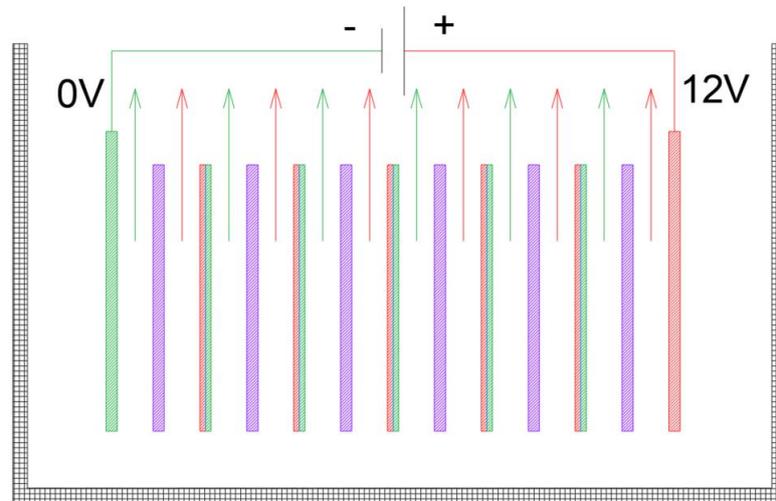


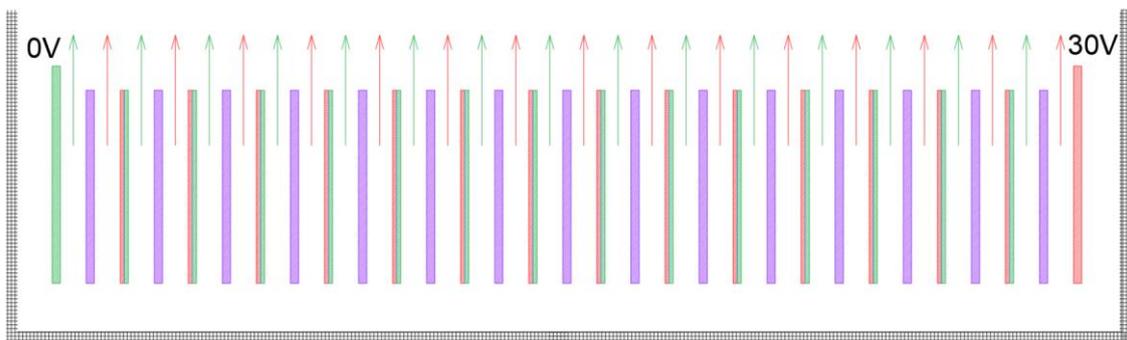
Imagen 3.4\_02: Configuración bipolar, ilustración propia.

Se añade entre electrodos la membrana separadora y se puede ver de la siguiente forma:



*Imagen 3.4\_03: Configuración bipolar con membranas, ilustración propia.*

Por último, este concepto se reproduce tantas veces cuanto sea necesario para aumentar la capacidad de producción de gas, y el número de electrodos, aumentando la superficie.



*Imagen 3.4\_04: Configuración bipolar con membranas a mayor tensión, ilustración propia.*

De esta forma, se incrementa la superficie activa, con la mayoría de los electrodos bipolares, que funcionan con una tensión inducida con los mismos electrodos externos monopolares. Con las mismas dos conexiones eléctricas se puede construir cualquier tamaño de celda.

## 4. Aplicaciones y demandas

El hidrógeno tiene muchas aplicaciones, en este apartado se describen varias aplicaciones básicas, algunas incluidas el ámbito doméstico como son; pilas de combustible, calefacción, estufas de gas, de agua sanitaria, o fogones de cocina. Otras de un ámbito más industrial y de automoción como son la mejora en motores térmicos e incluso un grupo electrógeno de emergencia.

En este apartado se determina el caudal necesario para cada una de las aplicaciones, y el volumen necesario para un uso diario regular, con un sistema de almacenamiento por compresión.

### 4.1. Pila de combustible

La pila de combustible transforma directamente la energía química en eléctrica, de la reacción provocada por los caudales de hidrógeno y el oxígeno, formando electricidad, agua y calor.

Inversamente a la electrolisis, se trata de una pila convencional pero recargable en minutos con hidrógeno, lo que permite obtener electricidad en corriente continua, repostando hidrógeno como si se tratara de gasolina.

Las ventajas son, además de reducir la contaminación ambiental, la reducción de la contaminación acústica.

Se da una reacción en la que las moléculas de hidrógeno son separadas en protón y electrón en presencia de un catalizador como el platino. Los protones (H<sup>+</sup>) se mueven a través del electrolito hasta el lado opuesto, generando una corriente en los electrodos por las reacciones electroquímicas.

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones se ven forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo las moléculas de oxígeno reaccionan con los electrones (conducidos a través del circuito externo) y protones para formar el agua. Por esta razón el único residuo es el vapor de agua o agua líquida.

Las reacciones que se dan son las siguientes:

- Ánodo (oxidación):  $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- Cátodo (reducción):  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow H_2O$
- Total:  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{Electricidad} + \text{Calor}$

*Imagen 4.1\_01: Principio de operación de una celda PEMFC [30].*

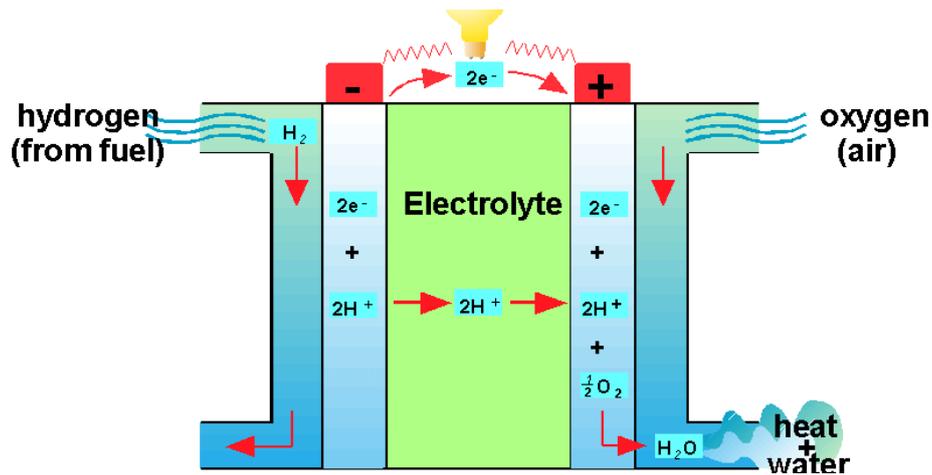


Imagen 4.1\_02: Principio de operación de una celda PEMFC

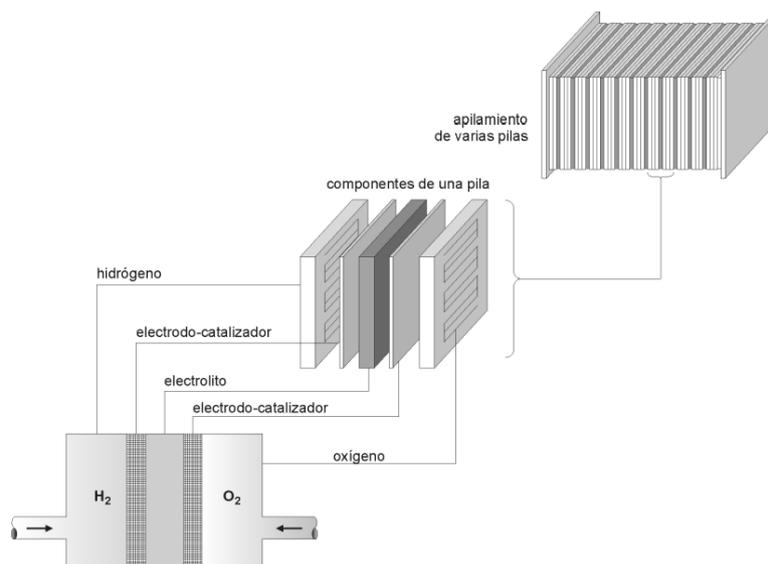


Imagen 4.1\_03: Componentes de una pila de combustible [31].

La más utilizada es la PEM, que trabaja a una temperatura media de 80°C con unas potencias de entre 1 a 100kW y tiene un rendimiento máximo del 60%.

Para empezar el cálculo en este apartado se suponen unas necesidades energéticas de 1.5 kW, durante una media diaria de 4 horas.

Con la siguiente expresión, se calcula el caudal ideal equivalente necesario en hidrógeno.

$$1.5 \text{ kW} \cdot \frac{10^3 \text{ W}}{1 \text{ kW}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ W} \cdot \text{s}} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{120 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \cdot 10^6 \text{ mg}}{1 \text{ kg}} = 12.5 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

Añadiendo el rendimiento de la pila y el inversor se obtiene el caudal real.

$$\frac{\left(12.5 \frac{\text{mg}}{\text{s}}\right)}{0.7 \cdot 0.9} = 19.8 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

Por tanto, la energía media diaria en volumen normal de hidrógeno sería:

$$19.8 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \cdot 4 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1 \cdot 10^6} \cdot \frac{1 \text{ Nm}^3}{0.09 \text{ kg}} = 3.2 \text{ Nm}^3$$

La siguiente tabla muestra una clasificación de los distintos tipos de pilas de combustible.

	AFC	PEM	SOFC	DMFC	MCFC	PAFC
Nombre	Alcalina	Membrana de intercambio Protónico	Óxidos Sólidos	Metanol Directo	Carbonatos Fundidos	Acido Fosfórico
Carga	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>
Temperaturas	90-100°C	50-120 °C	700-1000°C	50-100 °C	600-700°C	150-200°C
Eficiencias	60-70%	60%	60%	40%	45-50%	40%
Electrolito	KOH disuelto en Agua	Membrana de polimeros	Óxidos Sólidos	Membrana de polimeros	Carbonatos fundidos	Acido Fosfórico
Combustible	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	Metanol	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>

*Tabla 4.1\_01: Tipos de pila de combustible AIREMA [32].*

En esta tabla comparativa se pueden ver las características de las infraestructuras y pilas de combustible actuales.

Medio	Potencia [MW]	Vida útil [años]	Rendimiento [%]
Membrana de intercambio protónico (PEM)	0.01-0.2	-	45-60
Óxido sólido (SO)	1-100	5	50-60
De carbonato fundido (MC)	1-100	5	50-55
De Metanol (DM) con membrana	0.02-0.03	-	50
Ácido fosfórico (PA)	0.2-10	5	40-45
Central térmica sin regeneración	1000	>30	25-35
Central térmica con regeneración	1000	>30	75-80
Motor Diesel	-	>70	30-35
Motor Gasolina	-	>70	25-30
Turbina de gas	100-1000	>20	25-60
Hidroelectricidad	0.1-1000	>40	65
Central nuclear	1000	>40	35
Energía eólica	0.1-1	>10	75
Fotovoltaica	0.1-1	>10	10

*Tabla 4.1\_02: Pilas de combustible y otros medios de generación eléctrica*

En la comparativa de la tabla 4.1\_02, se pueden observar los rendimientos de las pilas de combustible y las infraestructuras convencionales.

Estos dispositivos a pila de combustible alcanzan rendimientos mayores que las máquinas térmicas, limitadas por el ciclo de Carnot, sin embargo, las aplicaciones térmicas del hidrógeno también ofrecen ventajas significativas.

## 4.2. Calefacción, estufas, agua sanitaria y fogones de cocina

Esta aplicación consiste en el aprovechamiento de la temperatura de una llama, al igual como una estufa de gas butano, la llama de hidrógeno propaga a un radiador su temperatura y este a el ambiente por convección térmica, esta aplicación puede desarrollarse tanto para estufas de gas, fogones de cocina, así como para calentadores de agua sanitaria, incluso como soldador si esta inicialmente mezclado con oxígeno, en lo que se denomina gas oxhídrico. A continuación, se muestra una tabla con las temperaturas adiabáticas máximas de la llama de cada mezcla.

COMBUSTIBLE	COMBURENTE	TEMPERATURA (°C)
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	Aire	1970
Gasolina (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	Aire	2138
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	Aire	2045
Gas oxhídrico (HHO)	Oxígeno	3200

Tabla 4.2\_01: Comparativa de temperatura adiabática de la llama de varios combustibles [20].

En primer lugar, se calcula el volumen de hidrógeno diario, equivalente al consumo medio de la población en gas butano, el cual se almacenará para mantener un uso diario.

Luego se obtiene el caudal máximo para un uso inmediato tras la producción.

### 4.2.1. Volumen de hidrógeno diario.

Una botella de gas butano contiene unos 12.5 kg de gas, obtenemos su energía contenida y el consumo diario:

$$12.5 \text{ kg} \cdot \frac{49.6 \text{ MJ}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 172222 \text{ Wh} = 172 \text{ kWh}$$

Su tiempo de uso promedio para una familia de 4 personas es de 18 días, y a partir de aquí se obtiene la energía diaria:

$$\frac{172 \text{ kWh}}{18 \text{ dias}} = 9.5 \text{ kWh cada dia.}$$

A partir de la energía diaria, se determina el volumen necesario en hidrógeno.

$$9567.9 \text{ Wh} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ W} \cdot \text{s}} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{120 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \text{ Nm}^3}{0.09 \text{ kg}} = 0.29 \text{ kg} = 3.2 \text{ Nm}^3 \text{ al dia.}$$

### 4.2.2. Caudal de hidrógeno para consumo inmediato.

Una estufa de gas convencional es una aplicación bastante general y tiene un caudal máximo aproximado de 140 g/h [33], por ello se parte de su caudal de trabajo y de su densidad energética 49.6 MJ/kg para obtener la potencia máxima equivalente:

$$140 \frac{\text{g}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \cdot \frac{49.6 \text{ MJ}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1929 \text{ W}$$

Y su caudal equivalente en hidrógeno.

$$1929 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ W} \cdot \text{s}} \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{120 \text{ MJ}} \cdot \frac{10^6 \text{ mg}}{1 \text{ kg}} = 16 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

Por tanto, se determina que las necesidades básicas aproximadas para estas aplicaciones deben tener estas características:

Un almacenamiento y consumo diario de:

$$9.6 \text{ kWh} = 3.2 \text{ Nm}^3$$

Un caudal máximo de:

$$1930 \text{ W} = 16 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

### 4.3. Mejora de los motores térmicos

En este apartado se explica cómo trabaja el hidrógeno y sus ventajas en un motor térmico, tanto en los ciclos Otto de gasolina como en los ciclos Diesel, para mejorar sus prestaciones.

El rendimiento del combustible en un motor térmico ronda el 25% y es debido a las elevadas pérdidas que se representan en la siguiente imagen.

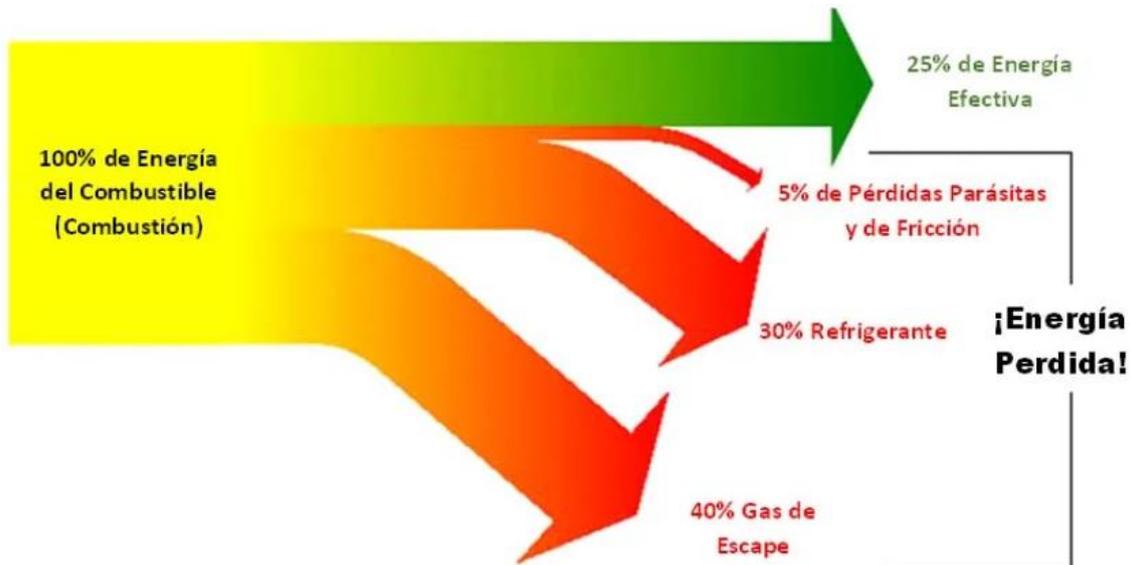


Imagen 4.3\_01: Esquema visual del rendimiento en un motor térmico.

Tanto en carburación como en inyección, la energía química útil del combustible que es aprovechada es baja, principalmente porque la velocidad de combustión es baja respecto al reducido tiempo del ciclo del motor, por lo que las grandes moléculas de combustible no son quemadas por completo dentro del cilindro y se pierden en el escape.

Este problema se empieza a resolver incorporando varias bugías en los vehículos modernos de inyección, pero los motores antiguos siguen sin una mejora al respecto.

El hidrógeno tiene 10 veces mayor rapidez de quemado, su difusividad llena la cámara de combustión más rápidamente, y mezclado con el combustible convencional, actúa como catalizador, produciendo una combustión global más limpia y completa.

La ciencia tras este proceso de combustión (HFI) ha mostrado resultados desde hace más de 30 años en los que se consigue una mayor potencia, al transferir mecánicamente al motor energía que antes no se aprovechaba, lo que permite acercarse a el ciclo ideal del motor y posibilita usar mayores relaciones de compresión que en los motores alimentados solamente por combustibles fósiles.

Esto tiene un impacto positivo no solo en la potencia, sino también en el ahorro de combustible, con la combustión más completa, se reducen las emisiones de hidrocarburos no quemados (HC), los dióxidos (CO<sub>2</sub>) y monóxidos de carbono (CO), además al disminuir la temperatura del motor, se reducen los óxidos de nitrógeno (NOx) causantes de la lluvia acida.

El carbono se adhiere químicamente al hidrógeno con su flujo, limpiando los depósitos de carbonilla en las válvulas y las superficies internas de la cámara de combustión, manteniendo el aceite más limpio. Se han hecho numerosos artículos, análisis de la sociedad de ingenieros automotrices (SAE), informes de prueba de Eurofins, y incluso investigaciones de la NASA.

Cummins KTA-38

Eurofins test results onboard Hydrogen on demand generation.

Measurement	Without HHO		With HHO		Delta	Avoided emissions at 2500 running h
	% Vol mg/Nm <sup>3</sup>	g/h	% Vol mg/Nm <sup>3</sup>	g/h		
O <sub>2</sub> (% Vol)	14.7	~	16.9	~	+14,97	~
CO <sub>2</sub> (% Vol)	4,6		2,3		- 50,00	159 ton/year
CO (mg/ Nm <sup>3</sup> )	679	784	504	453	- 25,77	828
NOx (mg/ Nm <sup>3</sup> )	1645	1898	1332	1189	- 19,03	1773
PM (mg/ Nm <sup>3</sup> )	187	215,8	41,2	37,1	- 77,97	446,75

Imagen 4.3\_02: Estudio de Eurofins en un motor Diesel

En ellas se muestra, entre otras investigaciones, [34-41] que la generación de hidrógeno a bordo, fue seleccionada como manera factible de usar el hidrógeno en una aplicación móvil, y para funcionamientos del motor con un dosado pobre en gasolina, debido a que la energía de ignición el hidrógeno es menor que para la gasolina, utilizando las partes calientes del cilindro como posibles fuentes de ignición, pero esto conlleva modificaciones, las bujías deben ser frías sin punta de platino que es un catalizador, y el aceite debe ser sintético para evitar pirolisis en pequeñas zonas calientes de la cámara de combustión.

Para conseguir estas características, por ejemplo, con un motor de camión con 10L de cilindrada, si la relación de caudales máxicos de aire: combustible: hidrógeno debe ser aproximadamente de 60000: 4000: 1 [42] sería necesaria una celda de 661W que produzca un caudal de 4.9 mg/s, dentro del rango de la celda diseñada en el apartado 5, suficiente para ayudar en la mejora de los motores más grandes, incluyendo camiones autobuses y barcos.

#### 4.4. Grupo electrógeno de emergencia

En este apartado se calcula el caudal necesario para propulsar totalmente con hidrógeno el motor térmico de un grupo electrógeno.

En una situación de emergencia en la que no se disponga de energía de red, ni solar, ni almacenada en baterías, el grupo electrógeno puede ser utilizado con hidrógeno previamente almacenado para disponer de suministro, y cargar las baterías, durante un periodo de tiempo proporcional a la cantidad de gas disponible.

El motor del grupo elegido es un honda GX 390 de gasolina mono cilíndrico de 389cc a 4T con una potencia de 8.6 CV a las 3000 rpm, un índice de relación de compresión de 8:1 y su consumo es de 3.5L/h [43].

Se le añadirá un inyector electrónico para introducir el hidrógeno según su demanda, y el carburador se deja disponible para poder ser utilizado en otras situaciones con gasolina.

Como modificaciones de seguridad se le añade una válvula antirretorno de llama, y otra en el conducto de admisión siendo las condiciones de presión de 2 o 3 bares al igual que con gasolina.



Imagen 4.4\_01: Grupo electrógeno e inyector electrónico



Imagen 4.4\_02: Válvula antirretorno de llama.

### 4.4.1 Estequiometría hidrógeno-aire

Para determinar la mezcla estequiométrica aire-combustible para el hidrógeno, se debe antes entender la mezcla para los combustibles fósiles. En la siguiente ilustración, se puede observar una comparativa visual entre las proporciones de la mezcla de las dos opciones.

#### ESTEQUIOMETRIA Y COMPARATIVOS GASOLINA VS HIDROGENO

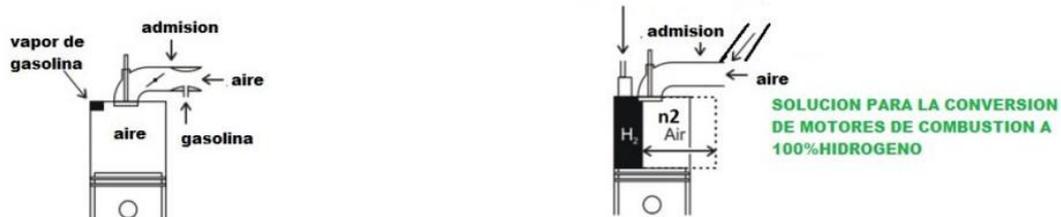


Imagen 4.4.1\_01: Comparativa visual de relaciones estequiométricas gasolina hidrógeno.

En primer lugar, se halla la mezcla estequiométrica de la gasolina ( $C_8H_{18}$ ).

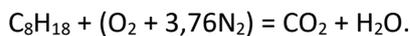
Se sabe que el aire está formado por 79% nitrógeno ( $N_2$ ) y 21% oxígeno ( $O_2$ )

$$\frac{0.79}{0.21} = 3.76 \text{ moles de nitrógeno por cada mol de oxígeno.}$$

Teniendo en cuenta los siguientes pesos atómicos:

Carbono: 12    Oxígeno: 16    Hidrógeno: 1    Nitrógeno: 14

Y partiendo de la reacción producida en la combustión:



Se ajusta la ecuación:



Y se obtiene del dosado:

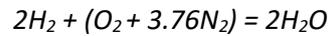
$$\frac{N^{\circ} \text{ de moles de la reacción del aire atmosférico} \cdot \text{peso atómico}}{N^{\circ} \text{ de moles del combustible} \cdot \text{peso atómico}} = \frac{\text{masa aire}}{\text{masa combustible}}$$

$$\text{Dosado (AFR)} = \frac{12.5(16 \cdot 2) + (12.5 \cdot (3.76) \cdot (14) \cdot (2))}{8(12) + 1(18)} = \frac{1716}{114} = 15$$

De este modo se determina que el dosado de la mezcla para este hidrocarburo es de 15:1 es decir se necesitan 15 kg de aire por cada 1 kg de gasolina  $C_8H_{18}$ .

A continuación, se hace el mismo cálculo para el hidrógeno.

La reacción la combustión se explica con la siguiente ecuación, igual a la equilibrada:



$$\frac{\text{peso atómico} \cdot N^{\circ} \text{ de moles de la reacción del aire atmosférico}}{\text{peso atómico} \cdot N^{\circ} \text{ de moles del combustible}} = \frac{\text{masa aire}}{\text{masa hidrógeno}}$$

$$\text{Dosado (AFR)} = \frac{2(16) + ((3.76) \cdot (14) \cdot (2))}{2(2)} = \frac{137.28}{4} = 34.32$$

Se obtiene así que el dosado de la mezcla es 34:1 es decir, que se requieren 34 kg de aire por cada kg de hidrógeno, para una mezcla estequiométrica.

#### 4.4.2 Cálculo del caudal de hidrógeno necesario para propulsar el motor

En este apartado se determinan las necesidades de hidrógeno para hacer funcionar el motor del grupo electrógeno elegido.

El motor con gasolina va a trabajar en condiciones estequiométricas, para ello se hace el cálculo con gasolina con tal de determinar la potencia térmica que va a liberar, y ya con este dato, se invierte el cálculo para definir el caudal de hidrógeno que aporte esa misma potencia que necesita el motor para funcionar en las mismas condiciones.

Se parte de un régimen de giro de 3000 revoluciones por minuto, que es el régimen de trabajo del motor para alcanzar la frecuencia de 50 Hz en el generador eléctrico.

Conociendo que un motor de 4 tiempos llena los cilindros cada 2 revoluciones, su volumen, el número de cilindros, y las revoluciones por minuto, se obtiene el volumen trasegado por segundo:

$$1 \text{ cilindro} \cdot \frac{1 \text{ llenado}}{2 \text{ rev}} \cdot \frac{389 \text{ cm}^3}{1 \text{ llenado}} \cdot \frac{3000 \text{ rev}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 9725 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Con la expresión de los gases ideales, se obtiene la densidad del aire en las condiciones normales de presión y temperatura:

$$D(\text{aire}) = \frac{P \cdot n}{R \cdot T} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 28 \text{ g/mol}}{0.082123456 \cdot 293.15 \text{ K}} = 1.184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El caudal se traslada a kg/s con la densidad del aire:

$$9725 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \cdot \frac{1.184 \text{ kg aire}}{\text{m}^3 \text{ aire}} = 0.0115 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

De esta cantidad se toma una quincena parte correspondiente a la gasolina, su relación estequiométrica para saber su caudal:

$$0.0115 \frac{kg}{s} \cdot \frac{1kg \text{ de gasolina}}{15kg \text{ de aire}} = 767 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s} = 767 \frac{mg}{s}$$

Conociendo el poder calorífico de la gasolina, 47.75 MJ/kg se obtiene la potencia térmica del caudal.

$$767 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s} \cdot \frac{47.75MJ}{kg} \cdot \frac{10^3KJ}{MJ} = 36.65 \frac{kJ}{s} \text{ a plena carga}$$

Y la potencia en caballos:

$$36.65 \frac{KJ}{s} \cdot \frac{1 CV}{0.736 KJ} = 49.8 CV$$

Según el fabricante la potencia real que entrega es de 8.6 CV (6,4 kW). Con esto, se determina el rendimiento:

$$\eta = \frac{8.6 CV \text{ reales}}{49.8 CV \text{ consumidos}} \cdot 100 = 17.3 \%$$

Observando que el rendimiento es normal se puede garantizar un buen cálculo.

Partiendo de la energía térmica a generar en el motor, se revierte el cálculo para obtener el caudal de hidrógeno necesario, conociendo su densidad (0.09 kg/m<sup>3</sup>) y poder calorífico en condiciones normales (120 MJ/kg).

Por lo tanto, para alcanzar la misma potencia con hidrógeno puro se necesita un caudal de:

$$36.65 \frac{KJ}{s} \cdot \frac{1MJ}{10^3KJ} \cdot \frac{1kg}{120 MJ} = 305 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{s} = 305 \frac{mg}{s}$$

Conocido que se debe introducir  $305 \frac{mg}{s}$  de hidrógeno para obtener la misma energía calorífica, y que el caudal de aire inicialmente calculado de  $11500 \frac{mg}{s}$  es el necesario para alcanzar el régimen de giro acordado, obtendremos la relación aire combustible real.

$$\frac{11500 \cdot 10^{-6} kg/s \text{ de aire}}{305 \cdot 10^{-6} kg/s \text{ de hidrogeno}} = 37.68 \approx 38$$

Se determina una relación aproximada de 38:1 para alcanzar la potencia inicial, siendo la relación estequiométrica de 34:1.

Los motores a hidrógeno trabajan con mezclas pobres de 68:1 para reducir al máximo las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y conseguir una combustión eficiente, pero su potencia se reduce casi a la mitad, por ello se usan generalmente motores más grandes y/o se equipan con turbocompresores o sobrealimentadores [44].

Teniendo en cuenta que el motor no funcionará a plena carga podremos bajar la potencia de este.

Por lo tanto, la relación aire: hidrógeno que se utilizará será el doble del aire de la relación estequiométrica: 68:1.

Para esta relación, manteniendo el régimen de giro inicial, el caudal másico de hidrógeno será:

$$\frac{11500 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s de aire}}{68} = 169 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 169 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \text{ de hidrógeno}$$

Y teniendo en cuenta que el poder calorífico del hidrógeno (120 MJ/kg), se obtiene su potencia térmica:

$$169 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{120 \text{ MJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{10^3 \text{ KJ}}{\text{MJ}} = 20.32 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \text{ a plena carga}$$

Y la potencia teórica en caballos:

$$20.32 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ CV}}{0.736 \text{ KJ}} = 27.61 \text{ CV}$$

Suponiendo el mismo rendimiento térmico anterior de la gasolina se calcula la potencia real en caballos:

$$27.61 [\text{CV}] \cdot 0.17 = 3.45 \text{ CV reales}$$

Se determina que, regulando el caudal del inyector entre los  $169 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  y los  $305 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  se consigue variar la potencia de 3.45 CV a 8.6 CV para hacer frente a las variaciones de la demanda.

Para hacer funcionar el motor con el método de almacenamiento en forma de agua que se describe en el apartado 2.3.1.2, produciendo el hidrógeno para su consumo inmediato a partir del agua y partiendo de  $169 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$  se debería disponer de una potencia de 22.7 kW [Excel anexo].

Con la celda de 16mg/s que se diseña en el apartado siguiente se podría alimentar un motor de 35cc, y la relación entre potencia y caudal sería la siguiente:

$$\frac{2145 \text{ W}}{16 \text{ mg/s}} = \frac{22700 \text{ W}}{169 \text{ mg/s}} = 134 \frac{\text{W}}{\text{mg/s}} = 134 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{mg}}$$

Esta relación respecto a la cilindrada de un motor térmico sería de:

$$\frac{2145 \text{ W}}{35 \text{ cm}^3} = \frac{22700 \text{ W}}{389 \text{ cm}^3} = 58 \text{ W/cm}^3$$

Este método aún no es factible, para la movilidad de los vehículos por la necesidad de dispositivo externo que aporte esta elevada potencia eléctrica, pero en centrales térmicas y de ciclos combinados podría ser posible con una extensión de placas solares, como se está haciendo en distintas localidades en España [13-16].

En el apartado 7 se opta por almacenar el hidrógeno gaseoso en botellas, en una cantidad de  $3.2 \text{ Nm}^3$

Para este volumen, el tiempo de funcionamiento del grupo electrógeno sería de:

$$3.2 \text{ Nm}^3 \cdot \frac{0.09 \text{ kg}}{1 \text{ Nm}^3} \cdot \frac{10^6 \text{ mg}}{1 \text{ kg}} = 288000 \text{ mg}$$

$$\frac{288000 \text{ mg}}{169 \frac{\text{mg}}{\text{s}}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 28 \text{ min}$$

Como producto de la combustión del aire, se producen unas mínimas emisiones de NO y NO<sub>2</sub>, estas dependen de la temperatura de combustión, y en ella influye directamente el dosado como se muestra en el siguiente gráfico, aun así, estas emisiones es posible reducirlas por E.G.R. (Exhaust Gas Recirculation).

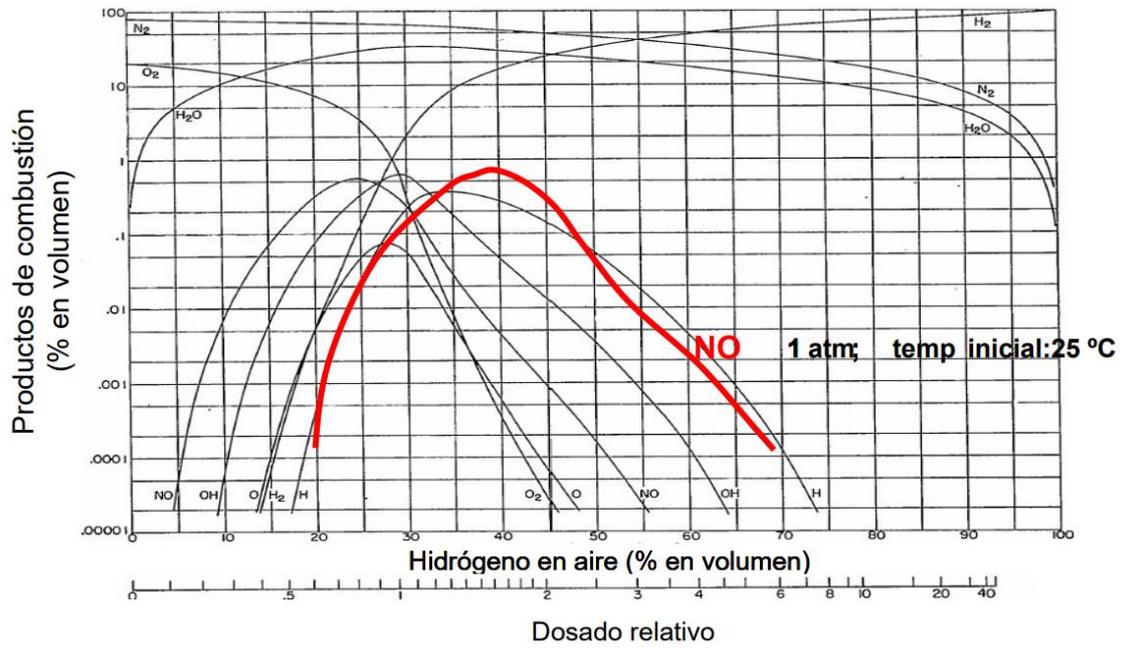


Imagen 4.4.1\_01: Grafico emisiones según dosado [19]

## 5. Diseño de la celda electrolítica

En este apartado se muestran los cálculos para dimensionar la celda de hidrógeno que entregará el rango de caudales necesario.

Por sus ventajas de compactación y de conexiones eléctricas, el diseño de la celda, tendrá una configuración bipolar. Para los cálculos eléctricos, y dotar de conductividad a el agua, se utiliza un electrolito alcalino de KOH, y se elige una membrana de nafi6n, por su mayor resistencia química y mayor pureza.

El cálculo se hace para una corriente máxima de funcionamiento, y en su uso práctico, se podrá regular mediante un circuito PWM desarrollado en el apartado 6 siendo su caudal directamente proporcional a la potencia que se le proporcione.

### 5.1 Dimensionado eléctrico

La demanda de caudal son 16 mg/s de hidrógeno correspondientes a las aplicaciones que se desarrollan en el apartado 4 con el que se parte en el siguiente cálculo para dimensionar todos los componentes de la celda:

$$16 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \cdot \frac{1\text{kg}}{10^6\text{mg}} \cdot \frac{1\text{Nm}^3}{0.09\text{kg}} \cdot \frac{10^3\text{dm}^3}{1\text{Nm}^3} \cdot \frac{1\text{L}}{1\text{dm}^3} = 0.18 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Recurrimos a la ecuación de los gases ideales en condiciones normalizadas de presión y temperatura para obtener el caudal en moles de hidrógeno.

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1[\text{atm}] \cdot 0.18 \left[ \frac{\text{L}}{\text{s}} \right]}{0.08206 \left[ \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \cdot 298.15[\text{K}]} = 7.26 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{mol H}_2}{\text{s}} \right]$$

Donde:

*n*: moles de hidrógeno. [mol H<sub>2</sub>]

*P*: Presión en atmosferas [atm].

*V*: Volumen en litros [L].

*R*: Constante de los gases ideales: 0.08206 [atm·L/mol·K].

*T*: Temperatura en grados kelvin [K].

Se observa en ambas reacciones químicas que se necesitan cuatro electrones por cada dos moléculas de hidrógeno producido:

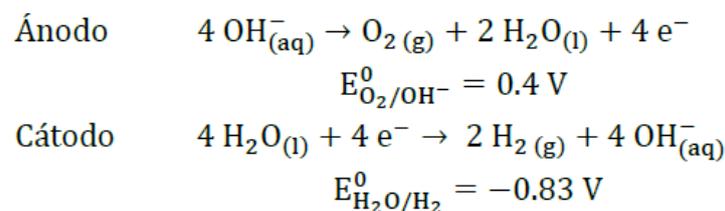


Imagen 5.1\_01: Reacción química en un medio alcalino.

Se determina que se necesitan 2 electrones para liberar 1 molécula de hidrógeno gas.

Por tanto, si se introduce este caudal en la ecuación, acompañada de la constante de Faraday (96485 Culombios por cada mol de electrones), obtenemos la corriente necesaria:

$$\frac{7.26 \cdot 10^{-3} \text{ mol H}_2}{s} \cdot \frac{2 \text{ mol e}^-}{\text{mol H}_2} \cdot \frac{96485 \text{ C}}{\text{mol e}^-} = 1402 \text{ A}$$

La ecuación de Nernst proporciona el potencial de equilibrio, 1.23 V, esta es la tensión para iniciar la reacción, para los experimentos mas comunes en química.

A esta tensión es necesario sumarle los sobrepotenciales de transferencia y activación, que suelen ser de 300 mV.

Teniendo en cuenta una conductividad ideal del electrolito y una distancia entre electrodos igual o inferior a la normalizada, se obtiene una tensión mínima de:

$$1.23 + 0.3 = 1.53 \text{ V}$$

Ya sabida la tensión de trabajo entre electrodos y la corriente, se obtiene el consumo de potencia, en una hipotética celda de una superficie.

$$P = V \cdot I = 1.53 \text{ V} \cdot 1402 \text{ A} = 2145 \text{ W}$$

Si se calcula la potencia producida a partir del poder calorífico del hidrógeno (120 MJ/kg) se puede obtener el rendimiento ideal de la celda:

$$16 \frac{\text{mg}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}} \cdot \frac{120 \text{ MJ}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}} \cdot \frac{1 \text{ W} \cdot \text{s}}{1 \text{ J}} = 1920 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{\text{potencia útil}}{\text{potencia consumida}} \cdot 100 = \frac{1920 \text{ W}}{2145 \text{ W}} \cdot 100 = 89\%$$

Para saber la superficie total de la celda, se debe tener en cuenta el concepto de densidad de corriente que determinó Michel Faraday, conociendo que en electrolisis alcalina con níquel o acero se trabaja cercano 0.3 A/cm<sup>2</sup> y intentando reducir la temperatura y el mantenimiento de la celda, se elige para este cálculo una densidad de corriente de 0.1 A/cm<sup>2</sup>

$$\frac{1402 \text{ A}}{0.1 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}} = 14022 \text{ cm}^2$$

Esta superficie total obtenida se debe dividir entre la superficie activa de la membrana de intercambio protónico, de las mismas medidas que la superficie activa entre electrodos, para así obtener el número de superficies o “condensadores” que se van a necesitar.

Como superficie, se elige una membrana de intercambio protónico y se corta a 15 x 30 centímetros para mejorar el flujo vertical, buscando un mayor paralelismo entre placas. Para saber la superficie activa se le debe restar la superficie ocupada por las juntas.

En el cálculo en primer lugar se observa la superficie total, se restan las dos áreas de junta horizontales, superior e inferior, luego las dos áreas verticales, el triángulo para la separación de los gases, y por ultimo los 3 orificios restantes del electrodo, imagen 5.2\_01.

$$(15 \cdot 30) - (2 \cdot 15 \cdot 1) - (2 \cdot 30 \cdot 1) - \left(\frac{6.5^2}{2}\right) - (3 \cdot \pi \cdot 0.5^2) = 336 \text{ cm}^2$$

Conocida la superficie activa, y la superficie total que debe tener la celda, obtenemos el número de superficies:

$$\frac{14022 \text{ cm}^2}{336 \text{ cm}^2} = 41.6 \text{ superficies mínimas}$$

Redondeando a un número entero superior:

$$42 \text{ superficies opuestas o condensadores}$$

Elevando así la superficie activa de la celda a un total de:

$$42 \text{ superficies} \cdot 336 \text{ cm}^2 = 14133.8 \text{ cm}^2 \text{ totales}$$

Para saber la tensión de trabajo de la celda se multiplica la tensión entre placas por el número de condensadores:

$$V = 1.53 \text{ V} \cdot 42 = 64 \text{ V}$$

Por tanto, para la misma potencia eléctrica de la celda en vatios, el amperaje de la celda sería:

$$A = \frac{P}{V} = \frac{2145 \text{ W}}{64 \text{ V}} = 33 \text{ A}$$

### 5.1.1 Cálculo de la componente pasiva

Sabido el amperaje y la tensión necesaria, se calcula la resistencia de la celda para determinar la conductividad del electrolito:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{64 \text{ V}}{33 \text{ A}} = 1.92 \text{ } [\Omega]$$

Cada condensador tendrá una resistencia de:

$$\frac{1.92 \text{ } [\Omega]}{42 \text{ superf}} = 0.046 \text{ } [\Omega]$$

Se calcula la resistividad del agua, tomando la expresión de la resistencia eléctrica de un conductor.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Donde:

R es la resistencia resultante en ohmios  $[\Omega]$ .

$\rho$  es la resistividad del material [ $\Omega \cdot m$ ].

$L$  es la longitud del conductor en metros [m].

$S$  es el área de la sección transversal del mismo, este caso la superficie del condensador [ $m^2$ ].

Para el siguiente cálculo no se toma en cuenta la resistividad de las membranas separadoras.

Con la resistencia por superficie obtenida de 0.046 [ $\Omega$ ]

Conocida la longitud o distancia entre las placas a partir de los espesores de dos juntas y una membrana ( $3mm = 3 \cdot 10^{-3} [m]$ )

Conociendo que una superficie efectiva es de  $336 cm^2$ .

Se introduce de esta manera se determina la resistividad del agua:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} = \frac{0.046 [\Omega] \cdot 0.0336 [m^2]}{3 \cdot 10^{-3} [m]} = 0.51 [\Omega \cdot m]$$

Y su conductividad será su inversa:

$$\frac{1}{0.51 [\Omega \cdot m]} = 1.95 [S/m].$$

	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Conductividad (S/m)
Desionizada ultrapura	$1.8 \cdot 10^5$	$5.5 \cdot 10^{-6}$
Destilada	$2 \cdot 10^3$	$0.5 \cdot 10^{-3}$
De montaña	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-3}$
Potable	$2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-2}$
De mar	$2.1 \cdot 10^{-1}$	4.8

Tabla 5.1\_01: Tabla de las distintas características eléctricas del agua.

Se puede observar de la tabla que las características deseadas se encuentran entre la potable y el agua de mar, pero estas aguas no deben ser utilizadas ya que el cloro del agua potable y el agua de mar son corrosivas para los electrodos.

En su lugar se utiliza agua destilada con la cantidad requerida de electrolito sólido como el KOH al 28% o NaOH al 20% aproximadamente para conseguir la conductividad deseada.

### 5.1.2 Cálculo de la componente reactiva

Al igual que un motor eléctrico tiene una componente resistiva y una inductiva, una celda electrolítica tiene una componente resistiva, pasiva determinada en el apartado anterior, y una componente reactiva, por su naturaleza de condensador, la reactancia capacitiva.

Similar a los cálculos eléctricos de un motor, al final del apartado se determina la impedancia real, producto de ambas componentes, que, si en el motor se encuentran en serie, en la celda electrolítica se disponen en paralelo.

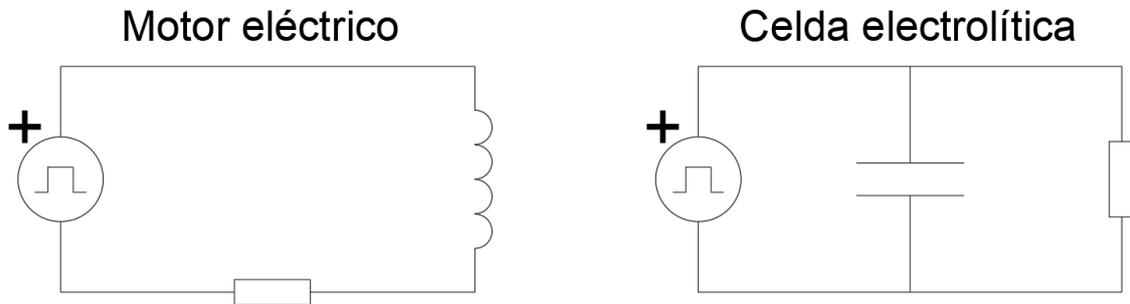


Imagen 5.1.2\_01: Componentes eléctricas reales de un motor y de una celda electrolítica.

Ya conocida la componente resistiva, en el cálculo de la componente capacitiva se supone un condensador ideal a partir de la permitividad dieléctrica del agua destilada [45].

La Capacidad Eléctrica o Capacitancia [46], es la cantidad de carga eléctrica que puede almacenar un condensador para una determinada tensión, es la capacidad del condensador de oponerse a toda variación de la tensión en un circuito eléctrico. Esta capacidad depende de la geometría del condensador y su magnitud se obtiene con las siguientes fórmulas:

$$C = \epsilon_o \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

donde:

C es la capacidad del condensador en Faradios [F].

$\epsilon_o$  es la permitividad dieléctrica del vacío [F/m].

$\epsilon$  es la permitividad o constante dieléctrica [adimensional] siendo 80 la del agua destilada.

S es la superficie activa entre electrodos opuestos del condensador en metros cuadrados [m<sup>2</sup>].

d es la distancia entre los electrodos en metros [m].

La capacidad de un condensador sería la siguiente:

$$C = \epsilon_o \cdot \epsilon \cdot \frac{S}{d} = 8.8541310^{-12} \cdot 80 \cdot \frac{336 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-3}} = 7.9 \text{ nF}$$

La celda se compone de 42 condensadores en serie, por tanto, su capacidad se reducirá a:

$$\frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots} = \frac{1}{\left(\frac{1}{7.9 \text{ nF}}\right) \cdot 42} = 0.189 \text{ nF}$$

Se determina la reactancia capacitiva.

$$X_c [\Omega] = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Siendo:

f = Frecuencia de la señal eléctrica en Hercios [Hz].

C = Capacidad eléctrica del condensador en unidades de Faradios [F]

La frecuencia del circuito variará entre los 716 y 96180 [Hz] según el ancho de pulso deseado como se detalla en el apartado 6.2. Por esta razón la reactancia capacitiva tendrá el siguiente rango de valores:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 716 [Hz] \cdot 0.189 \cdot 10^{-9} [F]} = 1174977.6 [\Omega]$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 96180 [Hz] \cdot 0.189 \cdot 10^{-9} [F]} = 8746.97 [\Omega]$$

Conociendo que en un condensador la corriente de fase se adelanta 90 grados respecto a la tensión, se escriben de forma fasorial los resultados:

$$X_c (\text{máxima}) = 1174977.6 \angle -90^\circ [\Omega]$$

$$X_c (\text{mínima}) = 8746.97 \angle -90^\circ [\Omega]$$

Por último, se suman a la componente resistiva, teniendo en cuenta que están en paralelo se obtiene un rango de impedancias total de:

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{X_c}} = \frac{1}{\frac{1}{1.92[\Omega]} + \frac{1}{1174977.6 \angle -90^\circ [\Omega]}} = 1.92 - j 3.14 \cdot 10^{-6} [\Omega]$$

$$Z_c = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{X_c}} = \frac{1}{\frac{1}{1.92[\Omega]} + \frac{1}{8746.97 \angle -90^\circ [\Omega]}} = 1.92 - j 0.42 \cdot 10^{-3} [\Omega]$$

La componente capacitiva produce que la corriente esté adelantada a la tensión en el caso más desfavorable unos 0.01 grados, por lo que en este caso se considera despreciable.

Debido a que la corriente pulsada no es una señal equilibrada, ni que el ángulo de desfase es muy elevado, no se corrige el factor de potencia que debería ser con una inductancia, también variable según la frecuencia o el ancho de pulso deseado.

## 5.2. Componentes y medidas

### Electrodos:

El material utilizado para los electrodos es el acero inoxidable 316L por su alta resistencia a la corrosión, de 15 x 30 cm y un espesor de 0.5mm.

Para esta celda los electrodos serán 43 unidades de las cuales 2 serán monopolares, con una pestaña saliente para la conexión eléctrica y 41 serán bipolares.

### Membranas:

Por su construcción, no hay diferencia de presiones a través de la membrana, y ya que queremos una mayor eficiencia, se eligen un total de 42 membranas de Nafión TM 211 de un espesor de 1mm [47].

### Juntas:

Las juntas permiten una correcta separación entre las placas, la separación de los gases por su geometría y al mismo tiempo la estanquidad de la celda. Serán de caucho EPDM como el de las cámaras de bicicleta de 1mm de espesor, formando un total de 86 juntas, de las mismas dimensiones exteriores que las membranas y los electrodos.

### Tapas:

Las tapas cierran ambos lados de la celda, con una mayor superficie para introducir las varillas roscadas, como soporte para prensar todo el contenido de la celda

Tiene unos cuatro orificios con racores para los conductos de flujo, permitiendo la entrada del agua por sus orificios inferiores y la salida de los gases por los superiores.

En la siguiente imagen se muestran los componentes mencionados y sus medidas en centímetros:

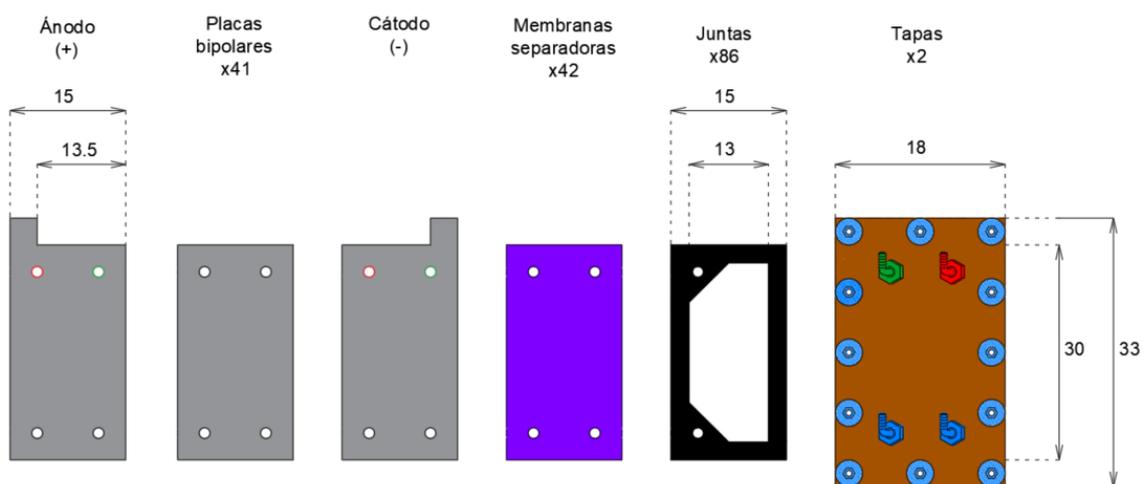


Imagen 5.2\_01: Componentes y medidas de la celda, ilustración propia [planos anexos].

A continuación, se hace el último cálculo para las dimensiones de la celda.

Conociendo que las placas tienen un espesor de 0.5mm las membranas son de 1mm, las juntas de 1mm y las tapas de 10mm, se calcula una longitud total sin compactar:

$$\text{Longitud } (z) = 43 \cdot 0.05 + 42 \cdot 0.1 + 86 \cdot 0.1 + 2 \cdot 1 = 16.95 \text{ cm}$$

Por lo tanto, las dimensiones totales de la celda tras el montaje (x, y, z) serán de:

$$18 \cdot 33 \cdot 16 \text{ cm}$$

### 5.3. Descripción del sistema

A continuación se muestra el despiece de la celda simplificada, en la ilustración se ve la parte correspondiente a una placa bipolar de las 41 totales que estarían cerradas entre los electrodos exteriores, se puede ver además el corte transversal en el perfil de la celda y de cada componente en sus dos conductos de flujo del oxígeno a la izquierda e hidrógeno a la derecha.

La ilustración muestra su flujo interior y los componentes en orden de la parte orientativa. En la totalidad de la celda, y de izquierda a derecha, el ánodo se sustituiría por otra placa bipolar y seguiría el orden; junta, membrana, junta y de nuevo una placa bipolar, orden que se repetiría un total de 42 veces hasta terminar con el ánodo, la junta, y la tapa.

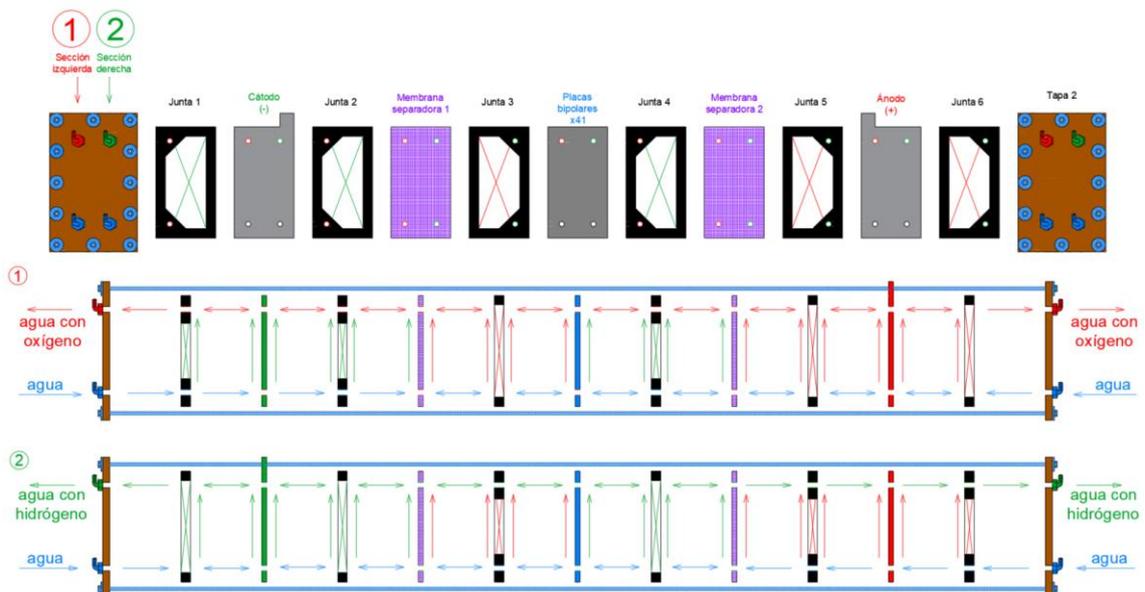


Imagen 5.3\_01: Despiece y seccionado de la celda electrolítica, ilustración propia [planos anexos]

Electrolito:

Para permitir la conductividad eléctrica entre los electrodos y con ella el paso de los iones, el soluto utilizado será NaOH al 20% en agua o KOH al 28% en peso, con tal de que el agua alcance la resistividad de  $0.51 [\Omega \cdot m]$ , una vez comprobada se introduce en el sistema.

Depósitos burbujeadores:

Se añade un depósito para cada gas, que canaliza el agua entrante y saliente de la celda, y retienen el gas producido en su parte superior con la seguridad de que una posible ignición no se propague por el conducto a la celda y la destruya.

Mini bombas de flujo:

Estas pequeñas bombas de 12V a la entrada de la celda fuerzan a el agua a circular para que las burbujas producidas no cubran los electrodos y se mantenga efectiva toda la superficie de la celda. Además, mantiene que la temperatura de la celda y los depósitos uniforme, refrigerando el sistema.

Puente de equilibrio:

La diferente producción de gas en los electrodos o un cambio de nivel en su funcionamiento puede generar una diferencia de presiones en la membrana y causar una mezcla de gases, en caso de una contención en los depósitos, se podría mezclar a través de la membrana, el catolito con el anolito, perdiendo hidrógeno que se mezclaría con el oxígeno.

Para evitar esto, se conecta un conducto las dos entradas a la celda donde el agua está limpia de gases, para equilibrar sus presiones.

En el siguiente diagrama se puede observar simplificación del sistema con los flujos de hidrógeno y oxígeno para su mejor entendimiento.

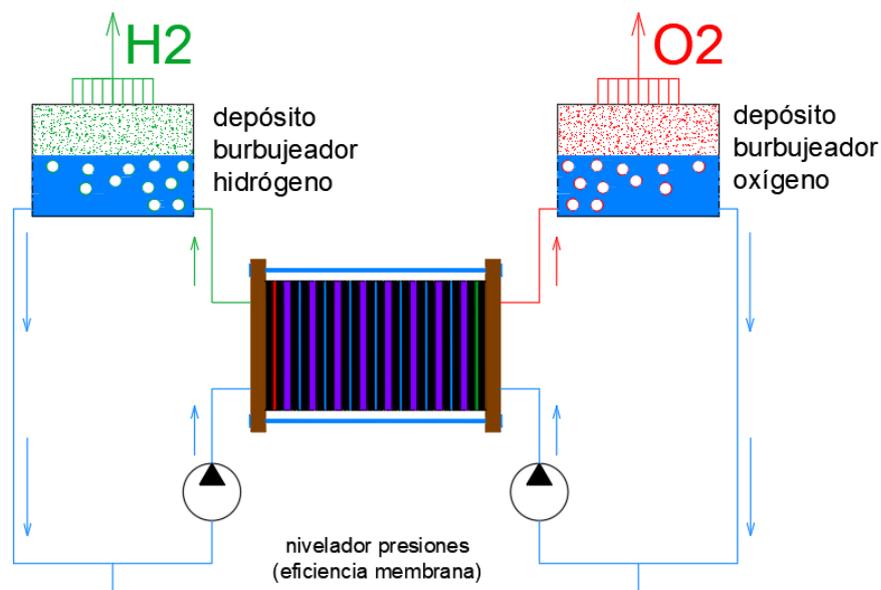
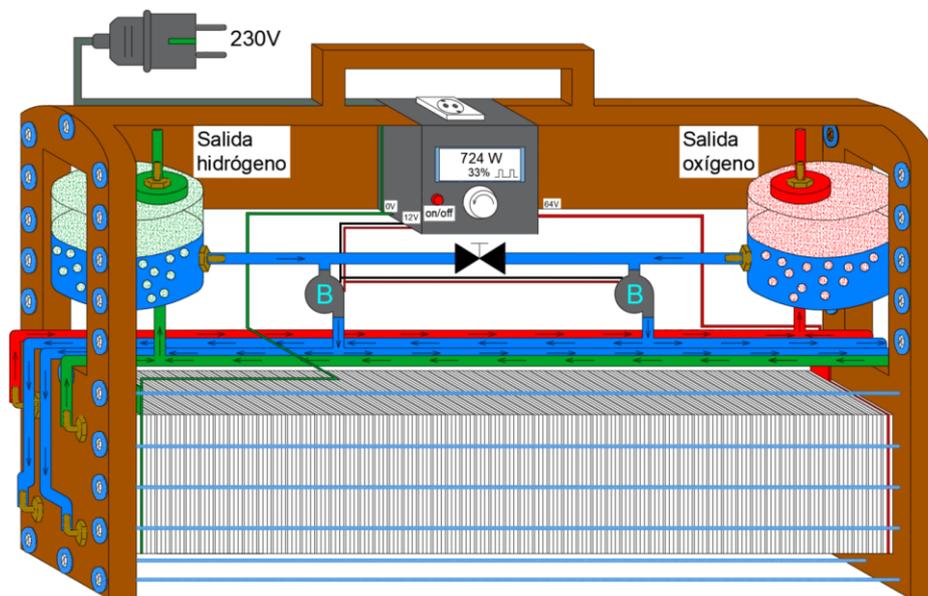


Imagen 5.3\_02: Diagrama simplificado de flujo, ilustración propia [planos anexos]

Como se puede observar en el diagrama, cada depósito tiene un flujo y una bomba individual, con tal de evitar el sobrecalentamiento y la adhesión superficial de los gases en los electrodos. Los depósitos permiten contener el agua, son una reserva de gas previa a su utilización, y dan la seguridad de que un retorno de la llama no pueda generar daños en la celda, pero si el gas hidrógeno no se mezcla con oxígeno no hay peligro de que eso ocurra.

El puente de equilibrio no tiene un flujo elevado, sino que solo permite un mínimo caudal de agua limpia, del depósito derecho al izquierdo, para evitar que no se mezclen los gases en la celda debido a la diferencia de presiones que se puede generar en la membrana de intercambio protónico.

Por último, se muestra la vista real del sistema, con un diseño ergonómico como electrodoméstico para su fácil transporte:



*Imagen 5.3\_03: Vista real del sistema, ilustración propia [planos anexos]*

El sistema se alimenta de una toma de corriente de baja tensión, y gracias a un transformador se genera un sistema flotante para mayor seguridad, además del encendido tiene un sistema de regulación desarrollado en el apartado siguiente, que alimenta también a las bombas.

El agua de los depósitos se desplaza hacia las bombas, entre ellas hay una llave limitadora del flujo que tiene como finalidad equilibrar las presiones a ambos lados de la celda, interfiriendo lo mínimo posible en los flujos de las bombas.

El agua entraría por ambos lados de la celda en sus dos secciones de cada gas, desde la parte inferior, y conforme se van produciendo los gases son desplazados para salir por la parte superior, los conductos de cada sección se juntan en un enlace en T y suben a su correspondiente depósito burbujeador.

El sistema tendrá la opción de conectarle el compresor para su almacenamiento, y aunque en este trabajo no se diseña el circuito de compresión, sí se calcula su funcionamiento.

## 6. Electrónica de control

En el siguiente apartado se describe la justificación y las características del circuito electrónico diseñado para regulación y eficiencia de la celda electrolítica.

### 6.1. Concepto

El sistema de control de potencia para la celda electrolítica tiene la finalidad principal de regular su potencia de trabajo, su equivalente caudal generado, y mejorar su eficiencia.

Si se intenta regular la intensidad de la celda en corriente continua, su tensión varía también, a razón de la ley de Ohm, variando la eficiencia de la reacción.

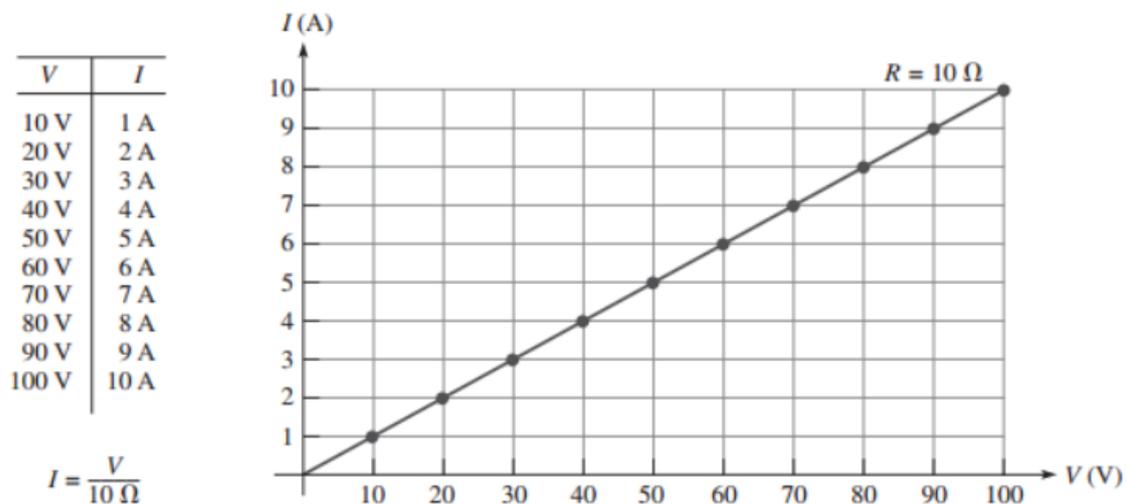


Imagen 6.1\_01: Regulación de la intensidad en corriente continua.

La tensión de la celda debe de ser fija para que la eficiencia de la reacción también lo sea, por tanto, el circuito de control de potencia debe de variar la corriente manteniendo fija la tensión de trabajo de la celda.

Para conseguir estas características, se elige un circuito de regulación PWM, por sus siglas en inglés, modulación de ancho de pulso, que es utilizado normalmente, para regular la velocidad de los motores de corriente continua. Este sistema entrega pulsos de corriente positiva de la misma tensión pico, por lo que su fuerza o par motor es la misma a bajas velocidades. Para la celda de hidrógeno puede servir para mantener fija la eficiencia:

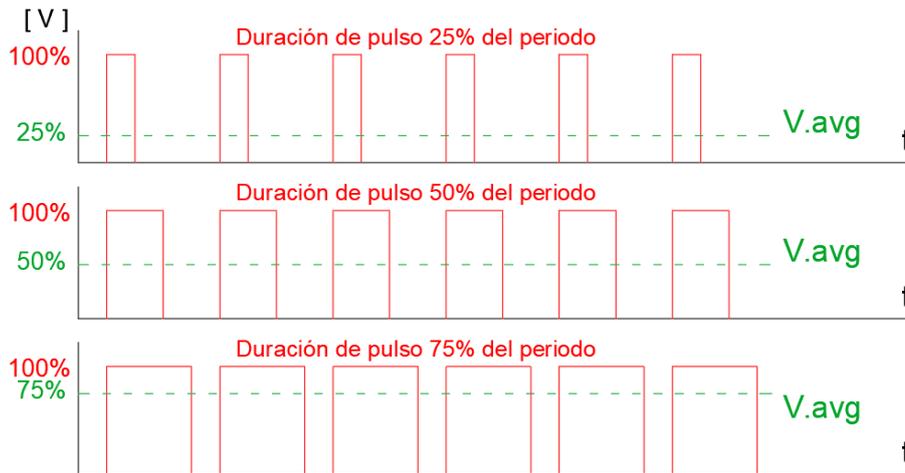


Imagen 6.1\_02: Forma de onda de una señal PWM a diferentes tensiones medias.

El circuito PWM no regula la tensión ni la corriente, sino el tiempo en paso alto en cada periodo, llamado ciclo de trabajo o duty, regulando así su tensión media ( $V_{avg}$ ).

$$V_{avg} = V_{celda} \cdot \text{porcentaje}(\text{duty})$$

$$\text{Potencia} = V_{avg} \cdot I \text{ (A)}$$

La corriente continua genera excesivas pérdidas en calor por efecto Joule, y aunque la mayor temperatura del agua puede favorecer la electrolisis, la resistividad de los conductores aumenta elevando la tensión necesaria [48], por ello se supone en este trabajo que este tipo de alimentación base de pulsos, puede ser efectivo no solo para regulación de la potencia, sino también para su uso común, reduciendo la tensión necesaria, el consumo eléctrico a temperatura ambiente y la mejora de rendimiento, basándose en algunas investigaciones al respecto [49-55].

Según estos estudios, cuando la componente capacitiva de la celda está cargada se forma una doble capa eléctrica (EDL) o capa de difusión, que dificulta la electrolisis y se manifiesta en forma de un sobrepotencial requerido en la descarga, a lo que llaman voltaje termo-neutro.

Una celda electrolítica no tiene componente inductiva como sería un motor, sino que su componente es capacitiva, y para introducir al lector a su comportamiento, se muestra una comparativa de las curvas características de ambos componentes:

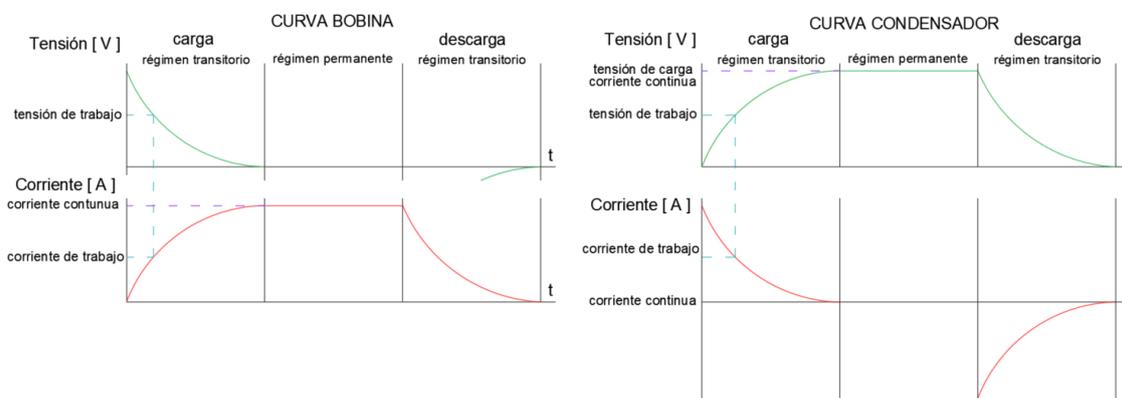


Imagen 6.1\_03: Respuesta comparativa de un inductor y un condensador.

Conocidas que las características de la celda son equivalentes a un condensador ideal en paralelo a una resistencia, se puede deducir que la carga almacenada en el condensador en el semiciclo de paso alto, se descarga por la resistencia en el semiciclo de paso bajo. La finalidad de este estudio concreto es dar pie a que más investigadores estudien este concepto para un mayor conocimiento del campo.

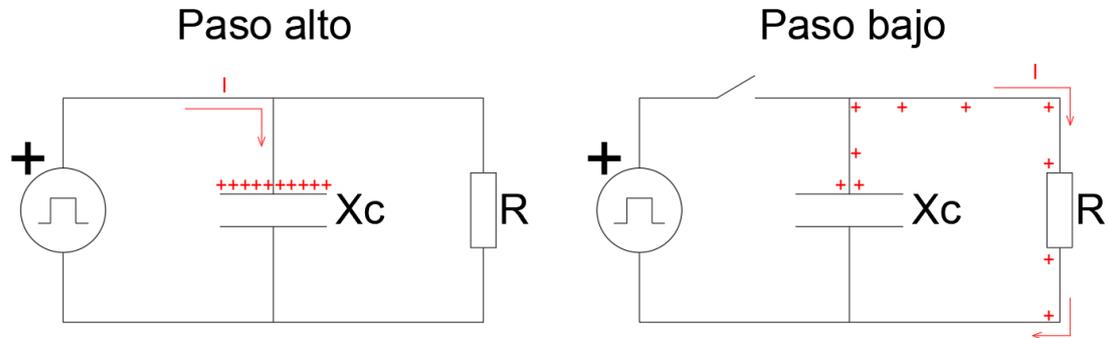


Imagen 6.1\_04: Representación teórica del funcionamiento de las componentes de la celda.

Conocido que el rango de frecuencias de alimentación, cuya media es de 48 kHz, se determina el tiempo del semiciclo en paso alto:

$$\text{Tiempo de paso alto (50\%)} = \left(\frac{1}{f}\right) \cdot \text{duty} = \left(\frac{1}{48000}\right) \cdot 0.5 = 10416 \text{ ns}$$

Después se determina el tiempo de carga del condensador a partir de la siguiente fórmula:

$$t = 5 \cdot R \cdot C = 5 \cdot 1.92 [\Omega] \cdot 0.189 \cdot 10^{-9} [F] = 1.81 \text{ ns}$$

Siendo R la resistencia propia de la celda y C la capacidad del condensador se obtiene un tiempo de carga muy inferior al semiciclo de alimentación, como se ilustra en el siguiente gráfico:

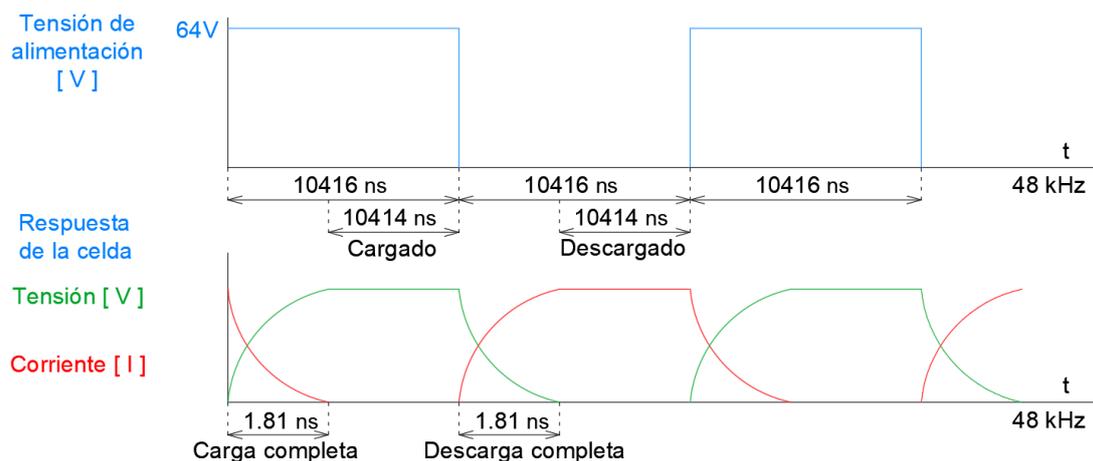


Imagen 6.1\_05: Respuesta de la celda ante la tensión de alimentación

Se observa que para la celda diseñada, el tiempo en régimen estacionario o permanente, en el que la celda se mantiene cargada o descargada es muy mayoritario, solo formando un 0.017% el tiempo en régimen transitorio.

La forma ideal de trabajo según algunos estudios sería con un mayor porcentaje de régimen transitorio, sin que el condensador se llegara a cargar completamente, manteniendo un equilibrio como en el siguiente gráfico.

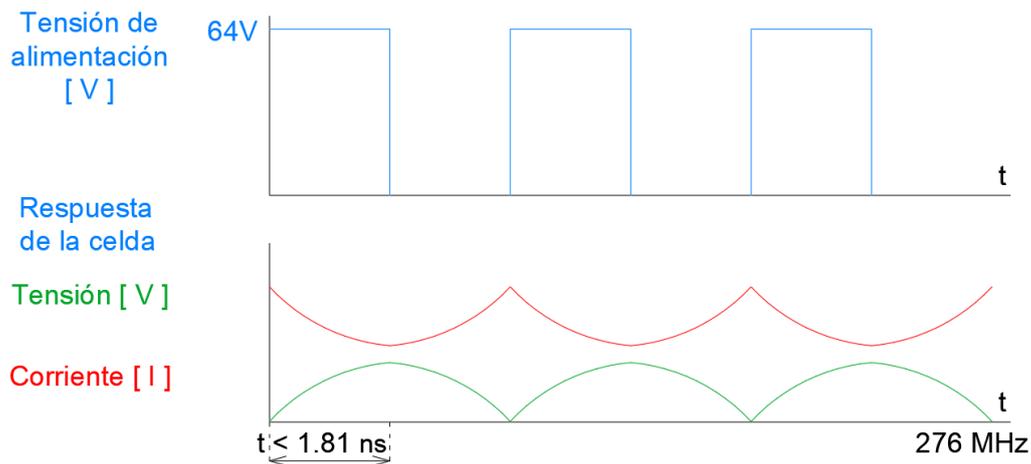


Imagen 6.1\_06: Respuesta de la celda sin régimen permanente.

Para ello debería de elevarse aún más la frecuencia o elevar la capacitancia de la celda, pero esta segunda opción elevaría el riesgo de pérdidas por EDL.

Aun así, aunque este campo de estudio no esté muy avanzado y el porcentaje de transitorio alcanzado sea muy bajo y cercano a la corriente continua del 0% en el que se mantiene continuamente cargado, los objetivos básicos por los que se diseña el circuito son para su regulación, y la disminución de la temperatura.

## 6.2 Circuito de regulación

Se propone el siguiente circuito para la modulación de ancho de pulso como alimentación para la celda electrofítica del apartado 5.

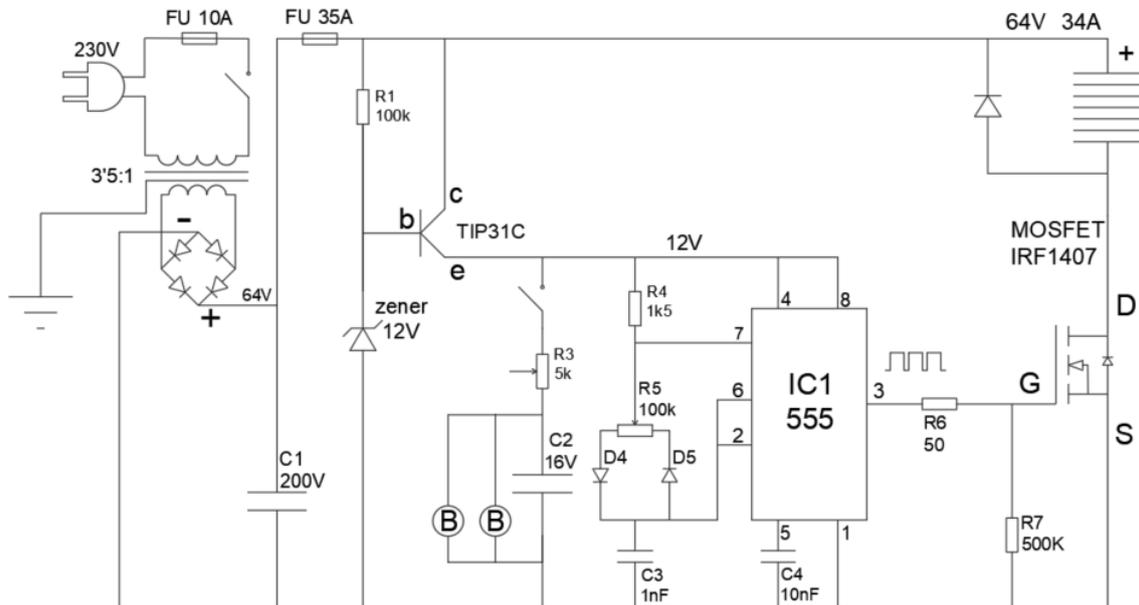


Imagen 6.2\_01: Circuito de regulación. Ilustración propia [planos anexos]

El circuito consta de cuatro secciones que se describen de izquierda a derecha y en condiciones de máxima potencia.

En la primera parte, tenemos la alimentación donde pueden utilizarse baterías desde 12V hasta un máximo de 75 voltios que es lo que soportan los transistores mosfet, con un fusible en serie limitando la intensidad. En este caso, se utiliza un transformador de relación 3.5:1 que se alimenta de la red de 230V, este otorga unos 64V eficaces en el bobinado secundario, con un puente rectificador de diodos los picos de tensión alcanzan los 90V, por esta razón se elige un condensador sobredimensionado de como mínimo el doble del máximo de la salida del transformador, que si son unos 90V debería ser de al menos 181V por lo que se elige uno de 200V para estabilizar la señal, pero su tensión media será como se ha dicho inicialmente, los 64V de paso alto que serán fijados por la celda.

En segundo lugar, se encuentra una pequeña fuente estabilizada con un diodo zener de 12V protegido con una resistencia para dar servicio a través de un transistor a un circuito integrado IC555 [56], con una configuración astable, que no puede ser alimentado a más de 16V, de lo contrario se quemaría.

En la tercera parte, alimentadas a través del emisor del transistor TIP31C, se encuentran las dos bombas de flujo con un condensador en paralelo para estabilizar el efecto de los motores y con un potenciómetro para regular su velocidad. También se encuentra a la salida del emisor el potenciómetro de 100K que controla el tiempo de funcionamiento por ciclo y los diodos 1N4148 conmutan los tiempos de paso alto y bajo por ciclo, con los que se puede variar la potencia media ( $V_{avg}$ ) de la celda. Por la patilla 3 del circuito integrado 555 se entrega la forma de pulsos deseada, protegida con una resistencia de 50 ohmios.

La frecuencia de oscilación depende de  $R_2$  y de los componentes potenciómetro y condensador según la siguiente expresión:

$$f [Hz] = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C}$$

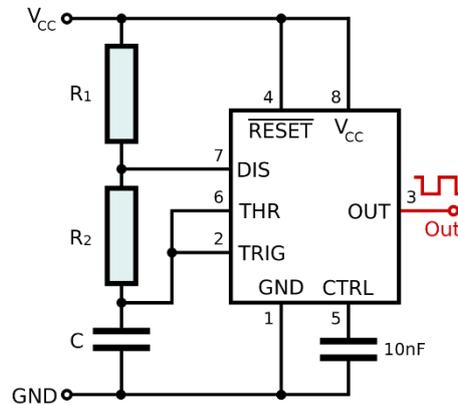


Imagen 6.2\_02: Circuito básico de funcionamiento para el IC555 de configuración astable.

En cuarto lugar, con una mayor sección del conductor, está la parte de potencia, la señal de anchura variable saliente de la patilla 3 activa los terminales puerta del mosfet que permiten el paso de la corriente, cada uno puede soportar 130A según el fabricante [57]. Para evitar que se queden activados se pone una resistencia de 500K como protección entre Gain y Source. Estará conectado térmicamente a un disipador para bajar su temperatura de funcionamiento. Para evitar la reversibilidad de la celda en pila, se pone un diodo rectificador en paralelo con la celda a modo de bypass en los paneles solares.

Conocidos los componentes, se determina el rango de frecuencias con el que va a trabajar el circuito, a partir de la resistencia máxima y mínima del potenciómetro:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C} = \frac{1}{\ln(2) \cdot (1.5 \cdot 10^3 + 2 \cdot 100 \cdot 10^3) \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 716 \text{ Hz}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C} = \frac{1}{\ln(2) \cdot (1.5 \cdot 10^3 + 2 \cdot 0) \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 96180 \text{ Hz}$$

Por último, como medida de seguridad se conecta eléctricamente la masa del transformador a la toma de tierra del conector.

## 7. Sistema fotovoltaico y de almacenamiento

En el siguiente apartado se calcula el sistema eléctrico, fotovoltaico y de almacenamiento para mantener un uso diario doméstico.

En el mismo, se calcula la potencia necesaria para la instalación, con la elección de cada componente, teniendo en cuenta la incidencia solar de Alcoy, con tal de suministrar las necesidades de hidrógeno domésticas y utilizar la energía sobrante en la producción de botellas de hidrógeno.

En este apartado se calcula en primer lugar la instalación fotovoltaica, en segundo lugar, se determina el ritmo de trabajo del sistema para su funcionamiento, luego se describe el esquema unifilar y finalmente se complementa con los aspectos de seguridad y la normativa vigente.

### 7.1. Cálculo de la instalación fotovoltaica

El siguiente cálculo se efectúa como instalación aislada de la red pública de Baja Tensión, ya que la energía sobrante no se va a verter sino que se consume en la producción de hidrógeno, aun así, se tendrá la posibilidad de conexión a la red pública de BT, para una situación de emergencia o cuando se requiera.

Para dimensionar la instalación primero se debe tener en cuenta la latitud, que tratándose de Alcoy, es de 38.705°. El lugar de posicionamiento de los paneles tendrá una superficie suficiente, estará orientado al sur, y la temperatura de la zona estará entre 0°C y 30°C.

Se adopta una DOD (rango de uso de seguridad) del 60% para alargar la vida útil y buen uso de las baterías, con una autonomía de 1 día, y una recarga de 1 semana.

Las cargas básicas que se van a alimentar son las siguientes:

Cargas	Potencia [W]	Tensión [V]	Horas/día	Energía [Wh]
Sistema de hidrógeno	2200	230	6	13200
Frigorífico	300	230	8	2400
Iluminación	200	230	4	800
Otros	2100	230	1	2100
<b>TOTAL</b>	<b>4800</b>			<b>18500</b>

Tabla 7.1\_01: Cargas básicas de la instalación.

A continuación, se dimensionan las baterías de acuerdo con el cálculo de la energía diaria que deben aportar, siendo 0.93 el rendimiento del cargador inversor y 0.98 el rendimiento teniendo en cuenta las pérdidas de los cables:

$$(18500 \text{ Wh/día})/0.93/0.98 = 20298 \text{ Wh/día}$$

Con la profundidad máxima de descarga DOD = 60% la energía diaria de la batería deberá ser:

$$(20298 \text{ Wh/día})/0.6 = 33831 \text{ Wh/día}$$

Además, si la autonomía debe ser de 1 día, la energía total que deben almacenar las baterías es:

$$33831 \text{ Wh/día} \cdot 1 \text{ día} = 33831 \text{ Wh}$$

Optando en esta instalación por trabajar a 48V las baterías tendrán una capacidad de:

$$(33831 \text{ Wh})/48\text{V} = 705 \text{ Ah}$$

Se elige una batería [58] de 24 vasos con una capacidad de:

$$812 \text{ Ah}$$

Para dimensionar la potencia total de los paneles se tiene en cuenta el consumo de las cargas, 0.95 del rendimiento del inversor, 0.98 de las pérdidas de los cables, con 1 día de autonomía y 7 son los días necesarios para la recarga.

$$((18500 \text{ Wh})/0.95/0.98) \cdot 1)/7 = 2839 \text{ Wh}$$

Por tanto:

$$18500 \text{ Wh} + 2839 \text{ Wh} = 21339 \text{ Wh/día}$$

Se estudia con el programa PVGIS [59] la incidencia solar en la ciudad de Alcoy, y de la inclinación de latitud  $38.075+15=53^\circ$ , se toman  $50^\circ$  para mejorar la producción en los meses de invierno, suponiendo una orientación sur de  $0^\circ$  y tomando como referencia una potencia instalada de 1kW.

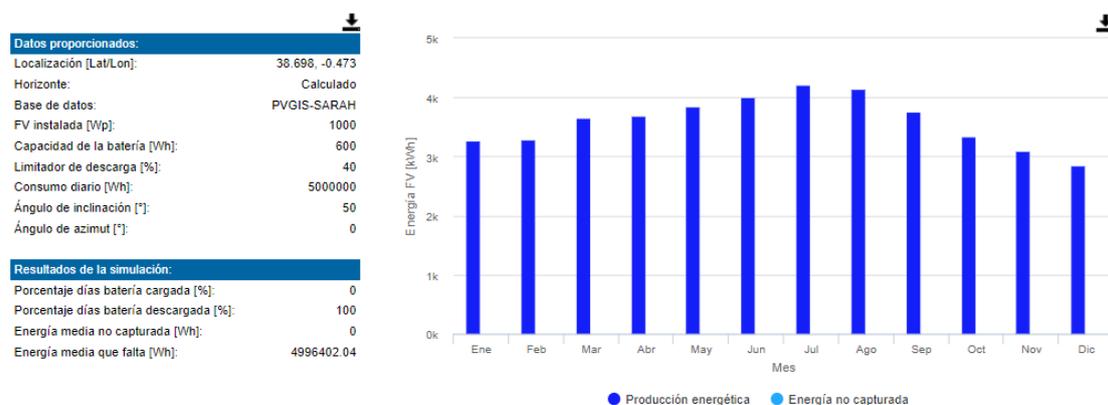


Imagen 7.1\_01: Cálculo de la radiación solar con PVGIS

Se obtienen 2856 Wh en el mes más desfavorable, por lo que la potencia a instalar será:

$$21339/2856 = 7.47 \text{ kW}$$

De esta manera se cubre la demanda más desfavorable, por lo que en los demás meses del año se dispondrá una energía sobrante.

Se eligen los paneles Deep blue de 405W [60], conocidos sus valores característicos con un rango de temperaturas de trabajo de 0°C a 70°C, las tensiones de trabajo máximas y mínimas serán:

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC						
TYPE	JAM54S30 -390/MR	JAM54S30 -395/MR	JAM54S30 -400/MR	JAM54S30 -405/MR	JAM54S30 -410/MR	JAM54S30 -415/MR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	390	395	400	405	410	415
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	36.85	36.98	37.07	37.23	37.32	37.45
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	30.64	30.84	31.01	31.21	31.45	31.61
Short Circuit Current(Isc) [A]	13.61	13.70	13.79	13.87	13.95	14.02
Maximum Power Current(Imp) [A]	12.73	12.81	12.90	12.98	13.04	13.13
Module Efficiency [%]	20.0	20.2	20.5	20.7	21.0	21.3
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc( $\alpha_{Isc}$ )	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of Voc( $\beta_{Voc}$ )	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax( $\gamma_{Pmp}$ )	-0.350%/°C					
STC	Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> , cell temperature 25°C, AM1.5G					

Imagen 7.1\_02: Parámetros eléctricos de los paneles

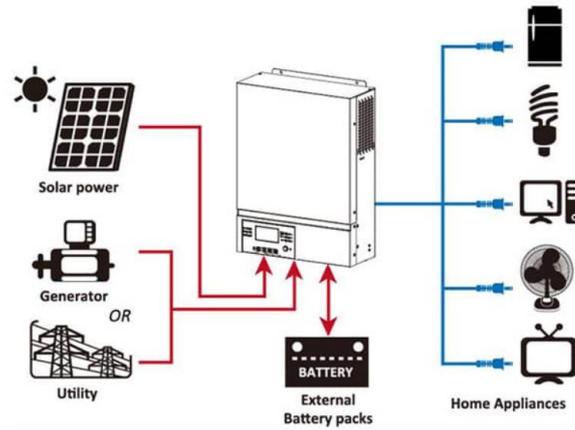
$$Voc(max) = Voc(25^{\circ}C) \cdot \left[ 1 + (Tmin - 25^{\circ}) \cdot \frac{\Delta Voc}{\Delta T} \right] = 37.23 \cdot \left[ 1 + (0^{\circ} - 25^{\circ}) \cdot \frac{-0.275}{100} \right] = 39.79 V$$

$$Vm(min) = Vm(25^{\circ}C) \cdot \left[ 1 + (Tmin - 25^{\circ}) \cdot \frac{\Delta Voc}{\Delta T} \right] = 31.21 \cdot \left[ 1 + (70^{\circ} - 25^{\circ}) \cdot \frac{-0.275}{100} \right] = 28.22 V$$

Se elige un inversor híbrido Voltronic AXpert VMIII de 5000W [61], potencia superior a los 4800W totales de la instalación, este elemento integra en el mismo las funciones de regulador para las baterías y la de inversor, además de la aplicación de conexión a red o a un grupo electrógeno, cuyas características importantes son las siguientes:

BATTERY			
Battery Voltage	24 VDC		48 VDC
Floating Charge Voltage	27 VDC		54 VDC
Overcharge Protection	33 VDC		63 VDC
SOLAR CHARGER & AC CHARGER			
Solar Charger type	MPPT		
Maximum PV Array Power	2000W	4000W	5000W
MPP Range @ Operating Voltage	120 ~ 380 VDC		120 ~ 450 VDC
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	400 VDC	500 VDC	
Maximum Solar Charge Current	60A	80A	
Maximum AC Charge Current	40A	60A	
Maximum Charge Current	60A	80A	

Imagen 7.1\_03: Especificaciones del inversor



*Imagen 7.1\_04: Usos del inversor*

El número máximo de paneles a instalar en serie (por cadena) será:

$$\frac{500V}{39.78V} = 12.57 \text{ paneles}$$

Dado que se necesita instalar una potencia de 7.4 kW y los paneles son de 405W, se necesitan:

$$\frac{7471 W}{405 W} = 18.44 \neq 20 \text{ paneles en total}$$

Por tanto, la configuración elegida será de 2 cadenas de 10 paneles

Conformando una potencia y una tensión máxima de:

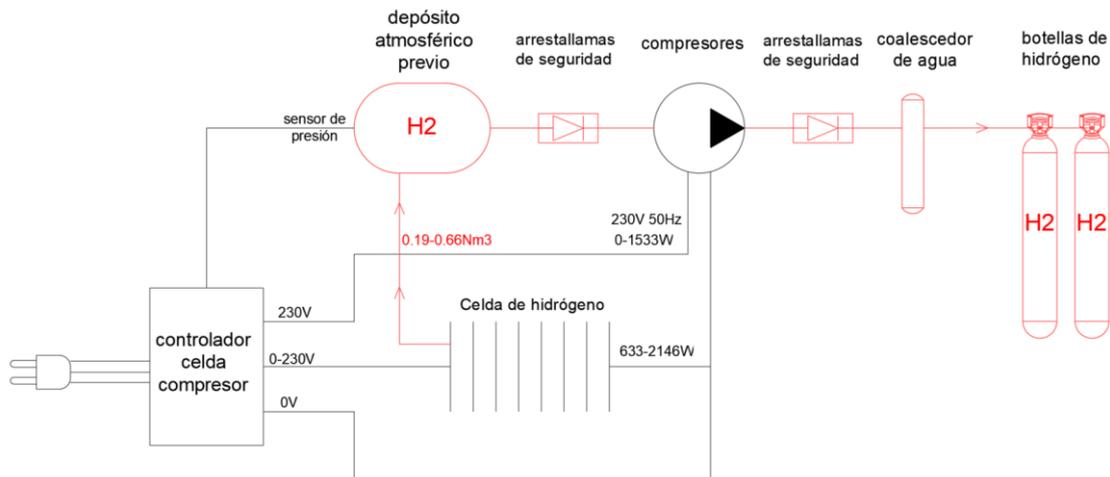
$$405 W \cdot 20 = 8100 W$$

$$39.78 V \cdot 10 = 397.8 V$$

## 7.2. Sistema de compresión y almacenamiento

El siguiente sistema explica las fases de producción y manipulación del gas bajo demanda para ser almacenado.

Después del diagrama se describen todos los componentes del sistema, en rojo el flujo de hidrógeno y en negro los componentes eléctricos.



*Imagen 7.2\_01: Diagrama simbólico del sistema de compresión y almacenamiento  
ilustración propia [planos anexos]*

### 7.2.1. Celda separadora

La celda produce hidrógeno separándolo del oxígeno para una compresión segura, esta celda, diseñada en el apartado 5, trabaja a una potencia máxima de 2166W, y a 633W cuando funciona el compresor. Su regulación es posible mediante un circuito PWM que se describe en el apartado 6.

### 7.2.2. Depósito previo

Este depósito, de un volumen máximo de 0.3 m<sup>3</sup>, tiene características similares a la cámara de un balón de fútbol o un neumático, con una válvula adicional, donde se produce el llenado a una presión ligeramente superior a la atmosférica desde la celda, y por la otra válvula es vaciado con la succión que proporciona el compresor.

### 7.2.3. Válvula antirretorno de llama

Este componente de seguridad impide que se propague la llama a través del conducto, en caso de existir una concentración de oxígeno en la mezcla, protegiendo los componentes.

De producirse una ignición en el compresor, la llama se extingue en el mismo y protege tanto la celda como las botellas, aunque en ausencia de oxígeno no puede producirse ninguna deflagración peligrosa.

Su uso más común es en sopletes con mezcla de gas oxhídrico en el que sí se puede producir un retorno de la llama.

### 7.2.4. Compresor

El compresor, fuerza el gas a entrar en las botellas, comprimiéndolo hasta una presión de 50 bar. Debido a que los compresores industriales no son económicos, ni se desea una elevada presión, se utilizan cinco compresores de nevera comunes de 10 bar para alcanzar la presión de 50 bar con el mismo caudal que la unidad, de  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  debido a que estarán en serie [62].

La conexión eléctrica de los mismos será en paralelo para que todos tengan la misma tensión de 230V. Estos motores monofásicos tienen un bobinado de arranque que les ayuda en el primer segundo, y un interruptor térmico de seguridad que detecta cuando el compresor se calienta demasiado cortando la corriente.

### 7.2.5. Coalescedor de agua

Su función es eliminar la humedad para la máxima pureza posible de hidrógeno. También el compresor puede soltar aceite en su funcionamiento. Mediante fuerza de atracción molecular y tensión superficial, las gotas se eliminan por gravedad cuando alcanzan un tamaño suficiente. [63].

### 7.2.6. Controlador automatizado producción-compresión

Este sistema electrónico, que no se diseña en este trabajo, regula las potencias de la celda y compresor manteniendo fija una potencia de consumo en todo momento de 2166W.

Este regulador automatizado, varía en cada ciclo la potencia de la celda entre 2166W en el llenado del depósito previo y 633W cuando funcionan los compresores a 1533 W, encendiendo y apagándolos según la presión del depósito previo.

Se parte de la energía calculada en el apartado 4, que son  $9.5 \text{ kWh}$ , equivalentes a un volumen de  $3.2 \text{ Nm}^3$ , que serían producidos y almacenados cada día.

La potencia para todo el sistema celda-compresor es de 2166W y tendrá un funcionamiento medio diario de 6 horas. Por tanto, la energía consumida y la capacidad mínima de la instalación solar debe ser de  $2166W \cdot 6h = 13000 \text{ kWh}$

Se obtiene el consumo de los compresores conociendo sus caballos ( $1/3 \text{ CV}$ ), y un rendimiento del 80%:

$$5 \text{ compresores} \cdot \frac{\frac{1}{3} \text{ CV} \cdot 736 \frac{\text{W}}{\text{CV}}}{0.8} = 1533 \text{ W}$$

Para saber el tiempo de uso del compresor debemos saber los caudales de la celda:

El caudal máximo de la celda a 2166 W es de:

$$\frac{2166 \cdot 298.15 \cdot 0.08206 \cdot 3600}{1.5 \cdot 96485 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0.66 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} = 0.155488 \frac{\text{mg}}{\text{s}}$$

Como se ha explicado, la celda y el compresor estarán automatizados para que su consumo sea fijo, restando potencia a la celda cuando funcionen los compresores, la potencia sola de la celda en ese momento es:

$$2166.6 \text{ W} - 1533 \text{ W} = 633.33 \text{ W}$$

Con lo que se obtiene un caudal de:

$$\frac{633.33 \cdot 298.15 \cdot 0.08206 \cdot 3600}{1.5 \cdot 96485 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0.19 \frac{Nm^3}{h} = 0.045 \frac{mg}{s}$$

El depósito previo a la compresión limita a periodos de tiempo el uso del compresor, con un sensor de presión que lo enciende cuando está lleno y lo apaga cuando está vacío.

Este intervalo depende del volumen del depósito previo, de  $0.3 Nm^3$ , por lo que sus tiempos de llenado y vaciado serán los siguientes:

$$Tiempo\ de\ llenado = \frac{volumen\ deposito}{caudal\ celda\ a\ 2166W} = \frac{0.3\ Nm^3}{0.66 \frac{Nm^3}{h}} = 0.45\ h$$

$$Tiempo\ de\ vaciado = \frac{volumen\ deposito}{compresor - celda\ a\ 633W} = \frac{0.3\ Nm^3}{2 \frac{Nm^3}{h} - 0.19 \frac{Nm^3}{h}} = 0.16\ h$$

Para obtener el número de ciclos en 6 horas de radiación:

$$\frac{6\ horas}{0.45\ h + 0.16\ h} = 10\ ciclos$$

Los compresores consumirán una energía de:

$$1533W \cdot 0.16\ h \cdot 10\ ciclos = 2454\ Wh$$

La celda tiene dos consumos, en el tiempo de llenado y en el de vaciado.

1. Durante el tiempo de llenado funciona a plena carga:

$$2166\ W \cdot 0.45\ h \cdot 10\ ciclos = 9552\ Wh$$

Produciendo un volumen de:

$$0.66 \frac{Nm^3}{h} \cdot 0.45\ h \cdot 10\ ciclos = 2.9\ Nm^3$$

2. Durante el tiempo de vaciado se le resta la potencia del compresor:

$$(2166 - 1533)W \cdot 0.16\ h \cdot 10\ ciclos = 993\ Wh$$

Produciendo un volumen de:

$$0.19272 \frac{Nm^3}{h} \cdot 0.16\ h \cdot 10\ ciclos = 0.31\ Nm^3$$

Por tanto, la energía diaria real consumida será la suma de producción más la compresión:

$$2454 + 9552 + 993 = 13000\ Wh$$

Y el volumen de hidrógeno producido sería:

$$2.9 + 0.31 = 3.21\ Nm^3$$

Finalmente se determina que en 6 horas se pueden almacenar más de los 3.2 Nm<sup>3</sup> necesarios calculados en el apartado 4, por lo que se cumplen las necesidades a las 6 horas de radiación solar.

Conociendo que España tiene una incidencia solar de 2500 horas de sol anuales [64], se puede considerar un excedente de almacenamiento en la mayor parte de la península.

$$\frac{2500 \text{ horas anuales}}{365.25 \text{ dias anuales}} = 6.8 \text{ horas de sol al dia}$$

### 7.2.7. Botellas de hidrógeno

Como recipiente de almacenamiento, las botellas o tanques serán el contenedor del gas bajo demanda que lo acumulan bajo presión.

Conocido el volumen diario que se debe almacenar y la siguiente tabla proporcionada por la Asociación Española del Hidrógeno, se eligen sus características.

Presión (Bar)	1	50	100	150	200	250	300	350
Factor de compresión	1	1,032	1,065	1,089	1,132	1,166	1,201	1,236
Presión (Bar)	400	500	600	700	800	900	1000	
Factor de compresión	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632	1,702	

*Ejemplo de aplicación del factor de compresibilidad: 1 botella (de las convencionales) de 50 litros a 200 bar de hidrógeno contiene a 0°C: 0,050 m<sup>3</sup> \* 200 / 1,132 = 8,834 Nm<sup>3</sup>*

*Imagen 7.2.7\_01: Factor de compresibilidad AEH [25]*

Se elige un volumen de 100L (0.1 Nm<sup>3</sup>) a 50 bares (5 compresores) que puede almacenar hasta:

$$\frac{0.1 \text{ Nm}^3 \cdot 50 \text{ bar}}{1.032} = 4,84 \text{ Nm}^3$$

Se estaría cerca de doblar la autonomía con un sistema de 10 compresores:

$$\frac{0.1 \text{ Nm}^3 \cdot 100 \text{ bar}}{1.065} = 9.4 \text{ Nm}^3$$

Hasta un máximo de 300 bares que es el límite del tanque (30 compresores).

$$\frac{0.1 \text{ Nm}^3 \cdot 300 \text{ bar}}{1.201} = 25 \text{ Nm}^3$$

La elección de las botellas recipiente, se considera teniendo en cuenta el uso que se les vaya a dar:

Para un consumo rápido, de 1 a 3 días tras su llenado se pueden utilizar tanques de aluminio, su ventaja es el bajo peso y la facilidad de su transporte, pero su mayor inconveniente es la limitada duración del hidrógeno en el recipiente, debido a su difusividad, las fugas provocan su

perdida en una semana, por lo que es mas recomendable para su uso temprano, venta o distribución de proximidad.

Para un almacenamiento sin perdidas se utilizan tanques F50L de acero inoxidable 316L [65,66], de esta manera se puede mantener el gas en el recipiente durante décadas, pero su elevado peso de 95 kg hace mas conveniente su uso en una posición fija o estacionaria.

Se eligen dos botellas F50L conformando un total de 100L para un almacenamiento total de 4,84 Nm<sup>3</sup> de los 3.2 Nm<sup>3</sup> necesarios, con lo que se consigue un almacenamiento adicional de 1.64 Nm<sup>3</sup>.



Imagen 7.2.7\_02: Apariencia botellas de hidrógeno

GASES		***BOTELLA					
	Tipo*	Dimensiones aprox.		Presión Máx. Kg./cm <sup>2</sup>	Capacidad aprox.		Peso aprox. Kg
		Largo mm.	Diámetro mm.		Gas m <sup>3</sup>	Agua Kg L	
Oxígeno	5 H	570	145	200	1	5	10
Nitrógeno				300***	1,5	5	10,5
Argón	20 H	950	207	200	4	20	36
Mezclas Soldadura				300***	6	20	38
Helio	30 H	1.240	230	300***	9	30	71
<b>Hidrógeno</b>	F50 L	1.680	230	200	10	50	85
				300***	15	50	95
Acetileno	40 L	1.345	230	18**	7	40	83
CO <sub>2</sub>	50 L	1.680	330		37,5	50	105

Imagen 7.2.7\_03: Especificaciones de las botellas

### 7.3 Descripción del esquema unifilar

A continuación, se describen los aspectos del esquema unifilar de la instalación completa, a partir de la siguiente imagen:

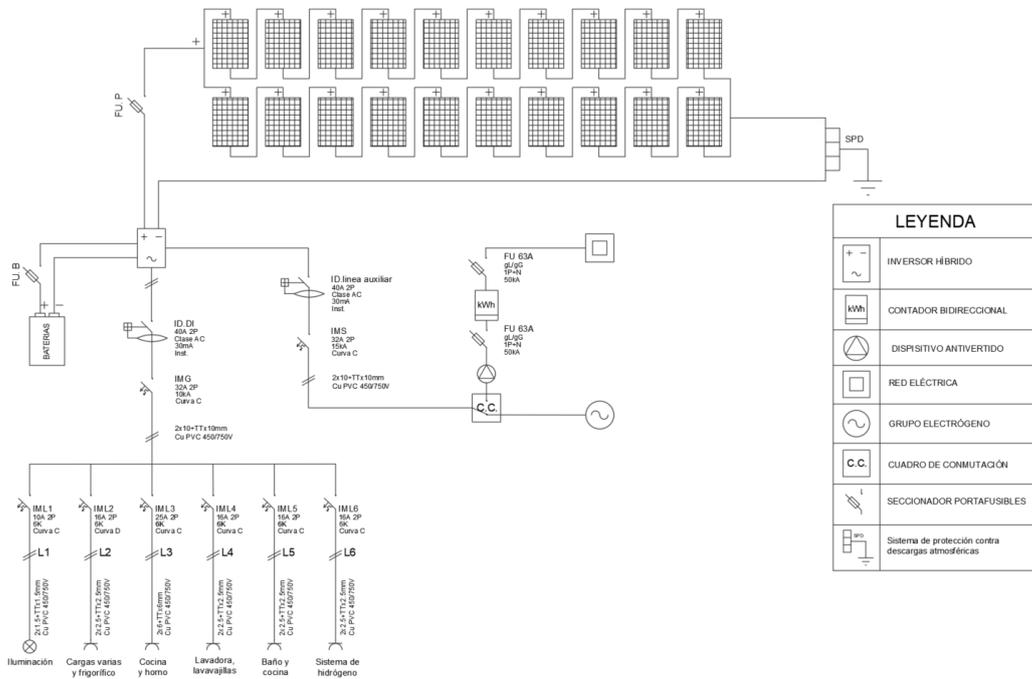


Imagen 7.3\_01: Esquema unifilar instalación [planos anexos]

La instalación solar está compuesta de un total de 20 paneles en dos cadenas de 10, formando un total de 6075 vatios, estará protegida con un SPD contra las descargas atmosféricas.

El inversor gestiona la energía proveniente de los paneles, carga las baterías, puede abastecerse de la red eléctrica en una situación que se requiera, con su contador, pero la energía sobrante se consume en la producción de botellas de hidrógeno, por ello se incorpora un dispositivo anti vertido, además, en casos de emergencia el inversor puede funcionar con el grupo electrógeno accionado desde un cuadro de conmutación.

Los circuitos interiores se rigen a la guía ITC-BT-25 en el grado de electrificación básico siendo los circuitos interiores los más comunes para las viviendas y el circuito 6 destinado el sistema de generación de hidrógeno.

## 7.4 Aspectos de seguridad y normativa

Se entiende por Atmósfera Explosiva (de ahí las siglas ATEX), a toda mezcla, de aire en condiciones normales de presión y temperatura, con sustancias inflamables en forma de gas, vapor o polvo en la que, tras una ignición, se puede propagar una explosión por la misma.

El almacenamiento y distribución de hidrógeno debe cumplir muchas regulaciones, ya que es catalogado como peligroso y debe ser verificado por las autoridades reguladoras. Es necesario normalizar:

- Las especificaciones del producto.
- La infraestructura de almacenaje o distribución para aplicaciones móviles o estacionarias, (vehículos, estaciones de servicio, instalaciones particulares).
- Las aplicaciones finales (pilas de combustible, motores de combustión interna, quemadores).
- Tecnologías de producción en pequeña escala. Reformadores de a bordo.
- Dispositivos de detección y seguridad relacionados.
- Seguridad y propiedades relevantes del hidrógeno.

La directiva europea ATEX define los siguientes aspectos.

ATEX 100 directiva 94/9/CE	Regula aparatos y sistemas de protección para su uso en atmosferas potencialmente explosivas.
ATEX 137 directiva 99/92/CE	Referente a la protección de seguridad y salud de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmosferas explosivas en el lugar de trabajo.

Tabla 7.4\_01: Directivas ATEX

La esencia de la guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmosferas explosivas en lugar de trabajo es básicamente prevenir las explosiones y proteger a los trabajadores.

Para que se dé un incendio tan solo se necesita el combustible gas o polvo, un comburente como el oxígeno del aire y una ignición, que sería el triángulo de fuego, pero para que se dé una atmósfera potencialmente explosiva se requieren dos parámetros más, que son el confinamiento; un espacio cerrado y la dispersión; el esparcimiento del combustible en el aire de la zona. Si se quita uno de estos parámetros no hay riesgo de explosión, pero sí de incendio.

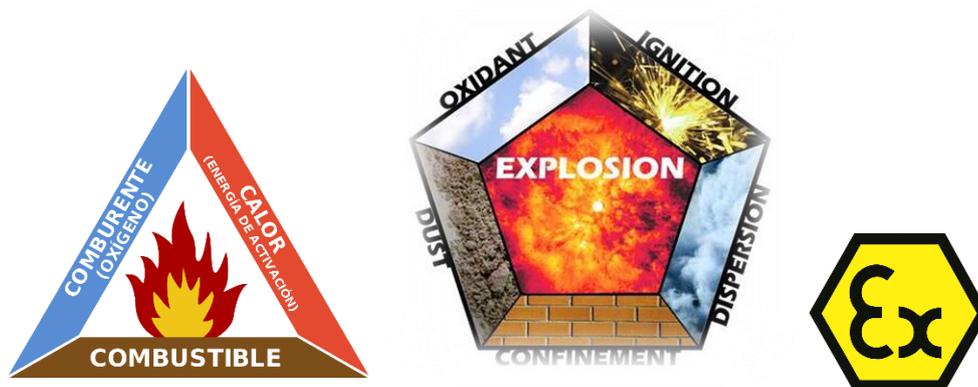


Imagen 7.4\_01: Esquema visual atmosfera explosiva y símbolo ATEX

El único parámetro evitable y más importante para evitar las explosiones son las fuentes de ignición, que son cualquier tipo de energía superior a la EMI (Energía Mínima de Ignición), que son 10 mJ en un uso general, pero para el hidrógeno puede ser muy baja, de 0.02 mJ, este tipo de energía se debe mayoritariamente a arcos eléctricos por electricidad estática, picos de tensión en interruptores, tomas de corriente, chispas por el corte de metales u otras reacciones químicas. En los motores eléctricos puede generarse todo ello, calentamientos, arcos de tensión y de electricidad estática.

Para prevenir de la formación de atmosferas ATEX, la primera alternativa son los trabajos al aire libre, y en caso de no ser posible una correcta ventilación puede ser forzada.

-Cuando sea inevitable la formación de atmosferas ATEX, evitar su ignición, y señalarlo.  
 -En caso de producirse la ignición, controlar la propagación y atenuar las consecuencias de la explosión con un escape como una campana de extracción, asegurando la supervisión, salud y seguridad de los trabajadores.

-Coordinar, Revisar y elaborar un (DPCE) Documento de protección contra explosiones periódicamente en el que se evalúan los riesgos de explosión en base a:

- Probabilidad de formarse las ATEX.
- Duración.
- Probabilidad de focos de ignición y de explosión.
- Tipo de instalación, de sustancias, de procesos, y sus posibles interacciones.
- Lugares en contacto donde se formasen atmosferas.
- Y clasificar en zonas las áreas en las que puedan formarse las ATEX.

#### 7.4.1 Clasificación en zonas según su peligrosidad.

Las zonas de la izquierda son atmosferas de gas y las de la derecha de polvo.

Las zonas 0 y 20 son las más peligrosas por cercanía y el peligro de formación de atmosferas explosivas es permanente por lo que las posibilidades de explosión en caso de existir todos los parámetros son totales, en la 1 y 21 son probables y en la 2 y 22 son poco probables por su brevedad. En una gasolinera se puede ver que la zona más peligrosa es el tanque de combustible, y los vapores en el repostaje se dan en una zona ventilada, por lo que se podría generar un incendio. En el caso de un aserradero, el serrín en polvo también puede ser combustionado y generar una explosión en un lugar cerrado como el silo.

Zona 0 (Gas)	Zona 1 (Gas)	Zona 2 (Gas)	Zona 20 (Polvo)	Zona 21 (Polvo)	Zona 22 (Polvo)
Riesgo permanente.	Riesgo probable.	Riesgo poco probable o breve.	Riesgo permanente.	Riesgo probable.	Riesgo poco probable o breve.

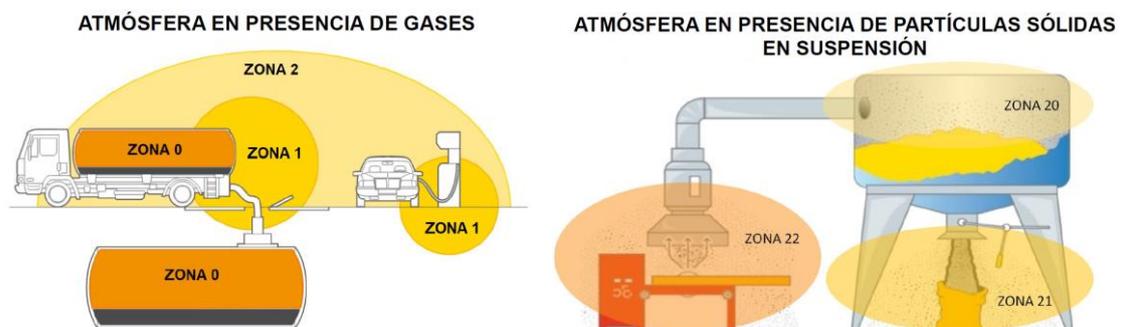


Imagen 7.4\_02: Clasificación por zonas ATEX

### 7.4.2. Marcado ATEX

Los equipos empleados en una zona ATEX, no están obligados a tener un certificado, o marcado, sino que lo determina la clasificación de áreas en la empresa.

Existen dos grupos según si son aparatos para uso en minería M1 M2 o distintos categoría 1 2 o 3 siendo el 1 la mayor protección.

En zonas de peligrosidad permanente o máxima se utilizan equipos de categoría 1 o M1 que es una protección muy alta. Y a medida que nos alejamos a zonas menos peligrosas se baja la categoría una protección menor.

Una vez realizado el análisis lugar, puede exigirse el marcado de Conformidad Europea en el equipo, que aparezcan los 4 dígitos del organismo notificado, el símbolo de ATEX, el grupo 1 o 2 según si es minería o distinto, la categoría de mayor a inferior protección, y el símbolo de uso (gas G, polvo D o mixto G/D).

ZONAS	ATMÓSFERA POTENCIAMENTE EXPLOSIVA	CATEGORÍA DE EQUIPO SEGÚN 2014/34/UE	CATEGORIA DE EQUIPO EN MINAS	PROTECCIÓN
Zona 0 Zona 20	Permanente.	Categoría 1	Categoría M1	Muy alta
Zona 1 Zona 21	Probable.	Categoría 1 o 2	Categoría M2	Alta
Zona 2 Zona 22	Poco probable o breve.	Categoría 1, 2 o 3	-	Normal

*Imagen 7.4\_03: Marcado de los equipos ATEX*

	Marca "CE"	Nº Org. Not.	Símbolo ATEX	Grupo	Categoría	Símbolo de uso
Aparatos para uso en minería		XXXX		I	M1 M2	
Aparatos para usos industriales distintos a la minería		XXXX		II	1 2 3	G D G/D

*Imagen 7.4\_04: Marcado de los equipos ATEX*

Los equipos ATEX van desde motores, interruptores, clavijas, cajas de conexiones, cuadros eléctricos estancos, reforzados ante explosiones, luminarias, pulsadores y herramientas no férricas, todo ello con tal de evitar arcos de ignición.

Los EPIS, utilizados en estos casos deben ser, al contrario que en situaciones de tensión, con un calzado no aislante, o más bien conductor, con tal de disipar y no generar el arco de electricidad estática, existe ropa y guantes de protección con propiedades electrostáticas de acuerdo con la UNE-EN 16350:2014 y UNE – EN ISO 21420:2020.

Pero la principal protección en común con los trabajos en tensión es una adecuada puesta a tierra de los equipos, de la instalación eléctrica. Los guantes solo serán efectivos si el trabajador que los lleva está conectado a tierra con una resistencia inferior a  $10^8$  ohmios.



A grandes rasgos, la reglamentación a la que debe estar sometida cualquier instalación de hidrógeno y la instalación de este trabajo es la que se resume a continuación:

ISO/TC 197 Hydrogen technologies, IEC/ TC 105 Fuel cell technologies, AEN/CTN 181 – Tecnologías del hidrógeno, NTP 50 – Almacenamiento del hidrógeno, ITC-BT-40 Instalaciones generadoras de baja tensión, grupos bajo presión.



El peligro en ocasiones no se puede evitar porque las condiciones del trabajo lo requieren, pero los accidentes siempre son evitables, con las correctas medidas de seguridad, puesta a tierra de las personas, de los equipos antiestáticos, siguiendo los reglamentos, protocolos de trabajo, y en común con trabajos en tensión, una buena puesta a tierra de la instalación eléctrica tiene una gran importancia.

En la instalación objeto de este trabajo el tanque presurizado, sistema de compresión, el electrolizador y grupo electrógeno, se instalarían al aire libre en un lugar con buena ventilación, igualmente conectados a tierra, y aunque no tendría tanta peligrosidad como en una industria cerrada, o de mayores dimensiones, la instalación seguiría toda la normativa pertinente para garantizar su seguridad.

## 8. Balance energético

A continuación, se calculan los rendimientos energéticos globales de la distintas aplicaciones estudiadas, tomando en primer lugar un rendimiento de la electrolisis del 85% entregada por la Asociación Española del Hidrógeno [18].

1. Pila de combustible con hidrógeno verde.

$$\eta = 0.85 \cdot 0.5 = 0.42 = 42 \%$$

2. Vehículos de motor eléctrico a pila de combustible [67] con hidrógeno verde, siendo el cargador de baterías de un 90%, la batería de litio del 90%, el controlador de 90%, la pila de combustible PEM de 50% y el motor eléctrico de 90% se obtiene:

$$\eta = 0.85 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot 0.9 = 0.28 = 28 \%$$

3. Vehículos de motor térmico con hidrógeno verde, suponiendo un rendimiento térmico del 25% igual a los combustibles convencionales.

$$\eta = 0.85 \cdot 0.25 = 0.21 = 21 \%$$

4. Aplicaciones de llama, estufas, calentadores, fogones, tomando el 55% de la eficiencia térmica media con gas butano.

$$\eta = 0.85 \cdot 0.55 = 0.47 = 47 \%$$

5. Centrales de generación de pila de combustible con hidrógeno verde. Tomando unos rendimientos parciales de 90% para los inversores.

$$\eta = 0.85 \cdot 0.6 \cdot 0.9 = 0.46 = 46\%$$

6. Centrales térmicas de ciclos combinados o cogeneración con hidrógeno verde.

$$\eta = 0.85 \cdot 0.7 = 0.6 = 60\%$$

A pesar de esto, sea cual sea su aplicación la importancia del hidrógeno no recae en el rendimiento de sus aplicaciones, sino en su verdadero interés como combustible limpio.

## 9. Presupuesto

En este apartado se calcula un precio estimado de la celda electrolítica y de la instalación domiciliaria.

El siguiente presupuesto corresponde a la celda de 16mg diseñada en el apartado 5.

Producto	Precio unitario	Unidades	Precio total
Laminas Metacrilato	53 eur	1	53
Laminas Acero inoxidable 316L	56 eur/ m <sup>2</sup>	1.41 [m <sup>2</sup> ]	79.2
Juntas	31 eur	1	31
Membranas de intercambio [23]	163 eur (30-30) cm	21	3423
Soluto hidróxido de potasio KOH	0.7 eur/ kg	10	7
Racores tubos, electrolito, soportes	-	-	10
<b>TOTAL</b>			<b>3603.2</b>

*Tabla 9\_01: Tabla presupuesto celda electrolítica*

El siguiente presupuesto corresponde a la instalación del sistema con unos valores aproximados.

Producto	Unidades.	Precio [€]	Total [€]
Paneles solares [38]	20	156.17	3123.4
Baterías [36]	1	5215.58	5215.58
Inversor hibrido [39]	1	686.19	686.19
Protector contra descargas atmosféricas	1	5642	5642
Grupo electrógeno	1	1699	1699
Botellas	2	100	200
Compresor	5	50	250
<b>TOTAL</b>			<b>17857.74</b>

*Tabla 9\_02: Tabla presupuesto instalación general*

## 10. Conclusión

En este trabajo se diseña una celda electrolítica con una capacidad de producción de 16 mg/s, equivalentes a 10L/min de hidrógeno verde, tras conocer los caudales de funcionamiento en las distintas aplicaciones generales del ámbito doméstico y automoción. De acuerdo con los objetivos establecidos, se diseña la instalación para su producción, manipulación, almacenamiento y consumo, terminando con un presupuesto.

Aunque el calor puede favorecer la producción, su refrigeración forzada con agua a temperatura ambiente y la alimentación a base de pulsos puede mejorar la eficiencia global de la celda, al evitar las pérdidas por el efecto Joule y la acumulación de gas en las superficies de los electrodos.

El hidrógeno es sin duda la energía del futuro, una gran alternativa a los combustibles fósiles, pero depende de cómo se promocioe a la población, será la rapidez de su implantación en el mercado, y la necesaria transición energética.

Puede que su combustión no sea tan eficiente como la reacción electroquímica reversible, pero es más competitivo. Las infraestructuras actuales de motores y centrales térmicas son más que suficientes para llevar a cabo una descarbonización a corto plazo, antes que una brusca transición a la electrificación, con el desembolso, consumo de energía y contaminación que se llevaría a cabo en la fabricación de otra nueva infraestructura.

Por el momento, los coches eléctricos empiezan a descarbonizar las ciudades, desplazando la contaminación a otros lugares donde se produce la energía, pero los vehículos de transporte a gran escala, como camiones y barcos, no alcanzan una autonomía suficiente por la gran potencia necesaria.

El hidrógeno podría ser la salvación del motor de combustión, y de una infraestructura térmica muy útil hasta el momento, por ello no podemos precipitarnos y permitir que toda la energía utilizada en la fabricación de cientos de millones de motores térmicos sea desperdiciada.

El foco de la cuestión no debe ser el máximo aprovechamiento del hidrógeno, sino reducir su precio a partir de energías renovables, la investigación, el desarrollo, y las mejoras tecnológicas de su producción y almacenamiento, tanto en grandes industrias como en autoconsumo.

## 11. Bibliografía

- [1] Datos de contaminación - Our world in data - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://ourworldindata.org/worlds-energy-problem>
- [2] Energia y población - O.M.S.- [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.who.int/es/news/item/07-06-2021-global-launch-tracking-sdg7-the-energy-progress-report>
- [3] Impuesto al sol [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.elperiodico.com/es/mas-innovacion/20181017/la-breve-historia-del-impuesto-al-sol-7093609>
- [4] Fabricación del coche eléctrico – Jesús Díaz - [ultimo acceso: 30/05/22]  
[https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-11-23/coche-electrico-co2-contaminacion-gasolina\\_3329281/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-11-23/coche-electrico-co2-contaminacion-gasolina_3329281/)
- [5] Obsolescencia programada [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.sostenibilidad.com/medio-ambiente/obsolescencia-programada-el-grave-problema-de-la-basura-electronica/>
- [6] Obsolescencia programada - Ricardo Natalichio - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.ecoportal.net/temas-especiales/basura-residuos/residuos/residuos-electronicos/>
- [7] Importación innecesaria – Ana Durá -- [ultimo acceso: 28/05/22]  
[https://www.alimente.elconfidencial.com/consumo/2019-11-06/naranjas-sudafrica-pesticidas\\_2306887/](https://www.alimente.elconfidencial.com/consumo/2019-11-06/naranjas-sudafrica-pesticidas_2306887/)
- [8] Primer motor térmico a hidrógeno - [ultimo acceso: 28/05/22]  
[https://ca.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois\\_Isaac\\_de\\_Rivaz](https://ca.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois_Isaac_de_Rivaz)
- [9] Bmw motor V12 - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.glpautogas.info/bmw-h7-hidrogeno.html>
- [10] Toyota Japón – Gabriel Jimenez - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.autobild.es/noticias/motor-combustion-interna-alimentado-hidrogeno-otras-recetas-toyota-reducir-100-emisiones-co2-974581>
- [11] Competición Toyota Japón – Brad Anderson - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.carscoops.com/2021/06/toyota-completes-24-hour-race-with-a-hydrogen-powered-corolla/>
- [12] Movilidad de camiones Man – Gonzalo Garcia - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/man-apuesta-hidrogeno-motores-combustion-futuro-pilas-combustible/20201021150405039157.html>

- [13] Planta de hidrógeno Verde en Vizcaya – Maite Martínez - [ultimo acceso: 30/05/22]  
[https://www.eleconomista.es/pais\\_vasco/noticias/10923476/12/20/La-primera-planta-de-hidrogeno-verde-estara-operativa-en-Amorebieta-en-2022.html](https://www.eleconomista.es/pais_vasco/noticias/10923476/12/20/La-primera-planta-de-hidrogeno-verde-estara-operativa-en-Amorebieta-en-2022.html)
- [14] Planta de hidrógeno Verde en Almería – Antonio Fernández - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.lavozdealmeria.com/noticia/3/provincia/208512/endsa-instalara-en-almeria-una-planta-de-produccion-de-hidrogeno-verde>
- [15] Planta de hidrógeno Verde en Mallorca – Sandra Acosta - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.eleconomista.es/energia/noticias/11665949/03/22/Mallorca-acoge-la-primera-planta-de-hidrogeno-verde-del-sur-de-Europa.html>
- [16] Planta de hidrógeno Verde en Puertollano – David Nuevo - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.tecpa.es/hidrogeno-verde/>
- [17] Fabricación de combustibles sintéticos – Victoria Fuentes - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.motorpasion.com/industria/repsol-producira-combustibles-sinteticos-a-partir-hidrogeno-nueva-planta-bilbao-lista-2024>
- [18] Our common future [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [19] Datos del hidrógeno – Jesús Casanova - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<http://www.anavam.com/docs/foroVIII-mesa2-hidrogeno.pdf>
- [20] Temperaturas de la llama - [ultimo acceso: 28/05/22]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura\\_adiab%C3%A1tica\\_de\\_llama](https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_adiab%C3%A1tica_de_llama)
- [21] Gas oxhídrico - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Oxihidr%C3%B3geno>
- [22] Producción de hidrógeno en el mundo – Manolo Nogales - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://noticias coches.com/consejos/tipos-de-hidrogeno-por-su-obtencion/421373>
- [23] Producción de hidrógeno en el mundo – Gabriela Ensinck - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://economiasustentable.com/noticias/hidrogeno-gris-azul-y-verde-cuales-son-las-diferencias-en-el-llamado-combustible-del-futuro>
- [24] Producción de hidrógeno en el mundo – Jose Luís G. Fierro - [ultimo acceso: 28/05/22]  
[https://fgcsic.es/lychnos/es\\_ES/articulos/hidrogeno\\_metodologias\\_de\\_produccion](https://fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion)
- [25] Tabla equivalencias y factor de compresibilidad – AEH - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.aeh2.org/hidrogeno/>
- [26] Almacenamiento – AIREMA - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>

- [27] Hidrógeno y salud – Xevi Verdaguer - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.xeviverdaguer.com/es/el-gas-h2-revolucionara-tu-salud/>
- [28] Seguridad - CNH - [ultimo acceso: 28/05/22]  
<https://www.cnh2.es/seguridad/>
- [29] Electrolisis [ultimo acceso: 28/05/22]  
[https://es.abcdef.wiki/wiki/Electrolysis\\_of\\_water](https://es.abcdef.wiki/wiki/Electrolysis_of_water)
- [30] Electrolisis - Greg Chisholm – [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128245101000155>
- [31] Pila de combustible - Antonio Mayandria - [ultimo acceso: 26/05/22]  
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6055#preview>
- [32] Tipos de pila de combustible – AIREMA - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<http://www.ariema.com/hidrogeno/ariema-equipos-e-instalaciones-h2/electrolizadores>
- [33] Caudal de gas butano en estufa - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://preciogas.com/instalaciones/glp/butano>
- [34] Sistema HFI, estudios y documentación  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrometano>
- [35] Sistema HFI, estudios y documentación  
[https://es.frwiki.wiki/wiki/Enrichissement\\_du\\_carburant\\_par\\_hydrog%C3%A8ne](https://es.frwiki.wiki/wiki/Enrichissement_du_carburant_par_hydrog%C3%A8ne)
- [36] Sistema HFI - Estudio Nasa - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19770016170>
- [37] Análisis sistema HFI – Jonathan Eduardo González - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/6976>
- [38] Sistema HFI – Diego Juma et al. - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10035/1/AC-ESPEL-MAI-0515.pdf>
- [39] Sistema HFI – José Sebastian Cujilema - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1574>
- [40] Artículo sistema HFI – Esteban Viso - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.xatakaciencia.com/tecnologia/camioneros-de-eeuu-adoptan-hidrogeno-como-combustible>
- [41] Moto hidrógeno Dakar – J. Bacobarelle - [ultimo acceso: 31/05/22]  
[https://www.abc.es/motor/motos/abci-moto-hidrogeno-para-correr-dakar-2021-202101010042\\_noticia.html](https://www.abc.es/motor/motos/abci-moto-hidrogeno-para-correr-dakar-2021-202101010042_noticia.html)

- [42] Proporciones hidrógeno: combustible - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://hydroenergy.mx/blog/2019/10/30/cantidad-requerida-de-hidrogeno-por-tamano-de-motor/>
- [43] Datos grupo electrógeno - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.indoostrial.com/generador-honda-ec5000>
- [44] Dosado pobre – José J. de Troya – pag 17 [ultimo acceso: 28/05/22]  
[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)
- [45] Permitividad dieléctrica agua destilada - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Permitividad>
- [46] Capacitancia - [ultimo acceso: 31/05/22]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad\\_el%C3%A9ctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_el%C3%A9ctrica)
- [47] Membranas de nafi3n - [ultimo acceso: 30/05/22]  
<https://www.fuelcellstore.com/membranes/nafion/nafion-211>
- [48] Conductividad eléctrica en función de la temperatura – UPV - [ultimo acceso: 31/05/22]  
[https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm08/fcm8\\_3.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm08/fcm8_3.html)
- [49] Electrólisis de pulsos - [ultimo acceso: 31/05/22]  
[https://es.abcdef.wiki/wiki/Pulse\\_electrolysis](https://es.abcdef.wiki/wiki/Pulse_electrolysis)
- [50] Estudio electrólisis de pulsos – Nigel Monk et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915027664>
- [51] Estudio electrólisis de pulsos – Immanuel Vincent et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319918312126>
- [52] Estudio electrólisis de pulsos – M. Vanags et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://sciendo.com/pdf/10.2478/v10047-011-0020-y>
- [53] Estudio electrólisis de pulsos – Tao Liu et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095495620307178>
- [54] Estudio electrólisis de pulsos – Daniela Hristova et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319913011051>
- [55] Estudio electrólisis de pulsos – F. Rocha et al - [ultimo acceso: 31/05/22]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001346862100342X>
- [56] Circuito integrado 555 - [ultimo acceso: 31/05/22]  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito\\_integrado\\_555](https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_integrado_555)

[57] MOSFET IRF1407 Datasheet - [ultimo acceso: 31/05/22]

<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68123/IRF/IRF1407.html>

[58] Baterías - [ultimo acceso: 12/02/22]

<https://autosolar.es/baterias-estacionarias-topzs-48v/bateria-solar-tab-48v-812ah-5-topzs-625>

[59] PVGIS - [ultimo acceso: 12/02/22]

[https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

[60] Paneles solares - [ultimo acceso: 12/02/22]

<https://autosolar.es/paneles-de-conexion-a-red/panel-solar-405w-deep-blue-30-ja-solar-mono>

[61] Inversor - [ultimo acceso: 12/02/22]

<https://autosolar.es/inversores-hibridos/inversor-hibrido-5000w-48v-voltronic-axpert-vmiii>

[62] Caudal compresores – Condor Group - [ultimo acceso: 11/03/22]

<https://condorgroup.com.ar/determinando-caudal-la-presion-los-compresores-aire/>

[63] Coalescedor de agua - [ultimo acceso: 11/03/22]

<https://spiegato.com/es/que-es-un-coalescente>

[64] Incidencia solar media en la península - [ultimo acceso: 11/03/22]

<https://selectra.es/autoconsumo/info/provincias>

[65] Botellas - [ultimo acceso: 11/03/22]

<http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>

[66] Botellas - [ultimo acceso: 11/03/22]

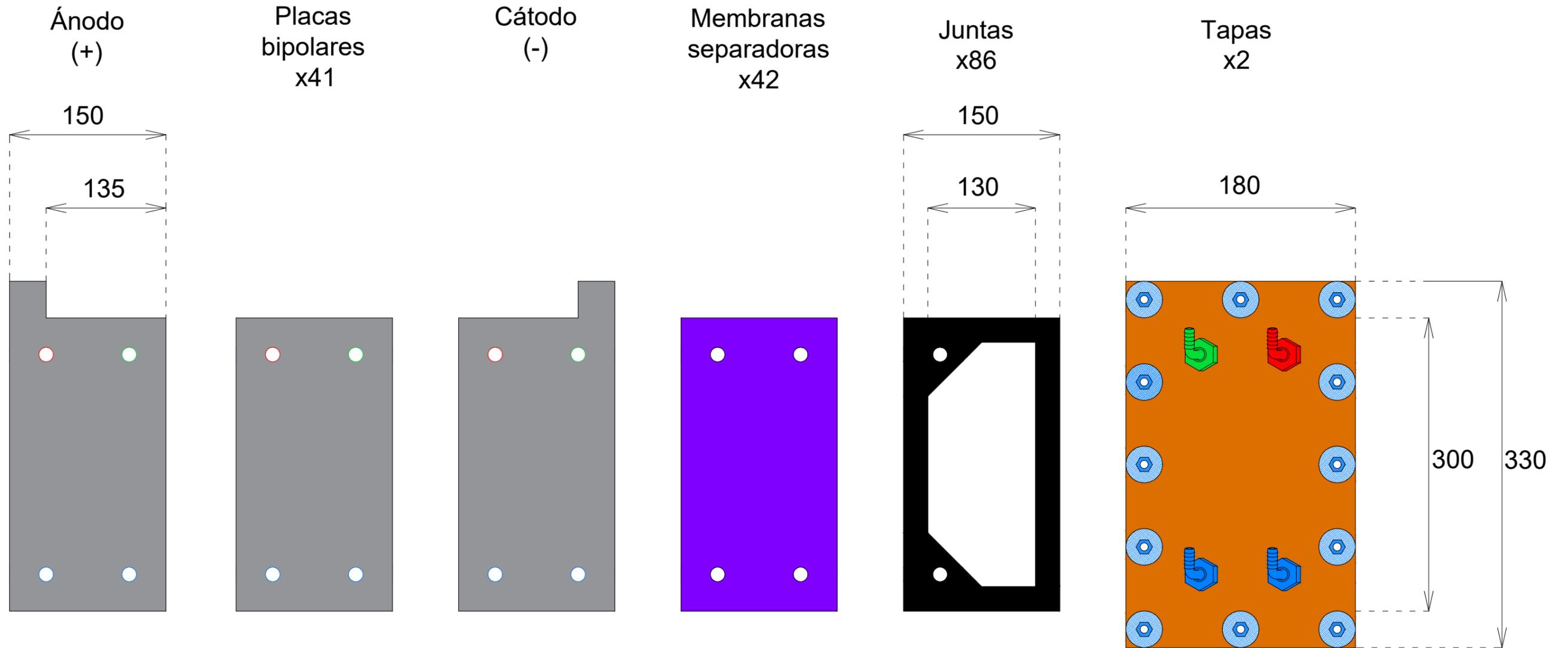
<https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2015-03-16-PRAXAIR%20ENVASES%20Y%20CONEXIONES.pdf>

[67] Rendimiento vehículo a pila de combustible – David Irarte - [ultimo acceso: 11/03/22]

<https://forococheselectricos.com/2012/12/es-el-hidrogeno-lo-bastante-eficiente.html>

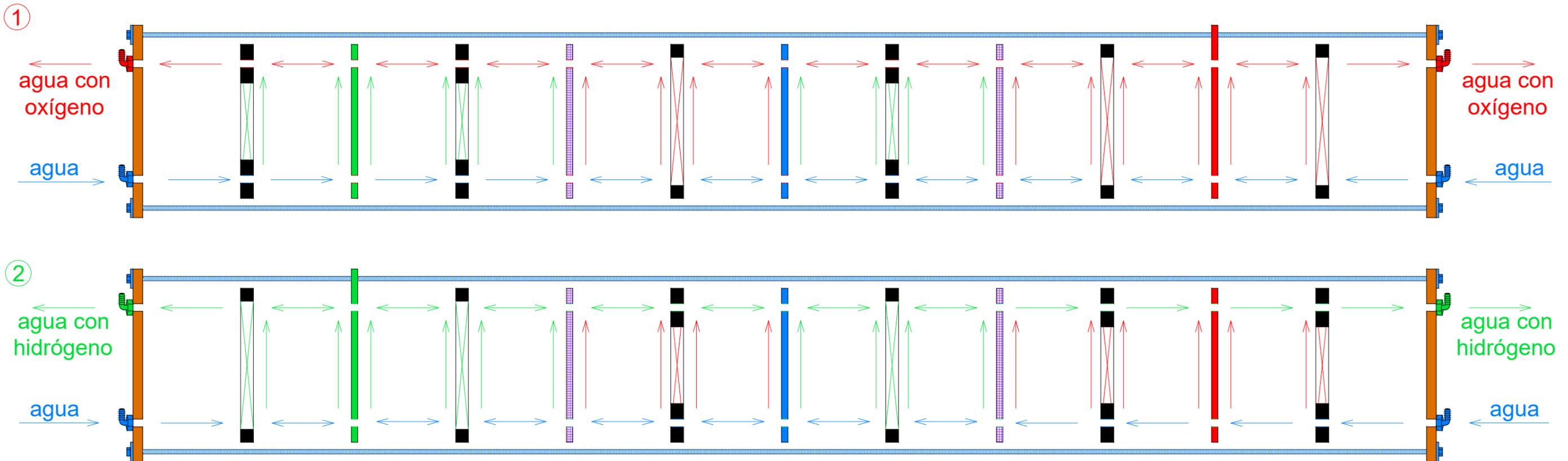
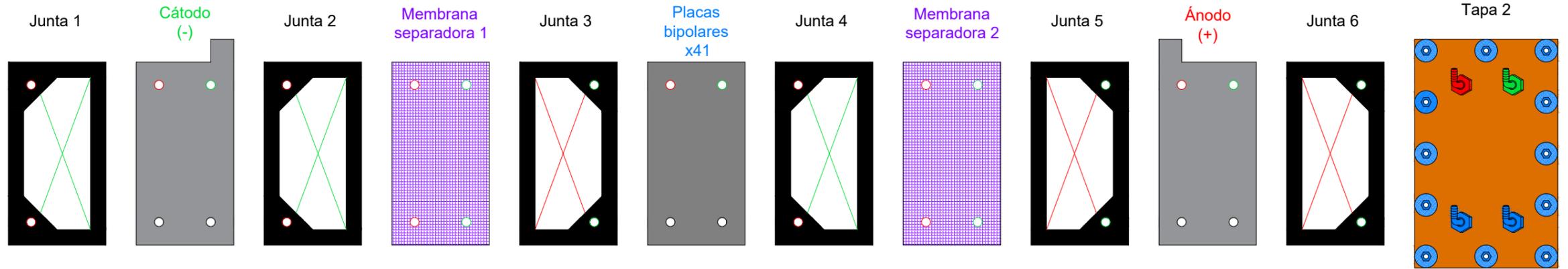
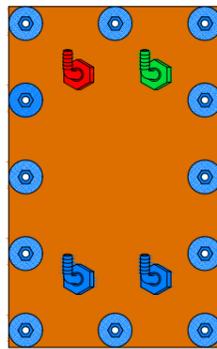
## 12. Anexos

12.1 Componentes y medidas	94
12.2 Despiece y seccionado de la celda	95
12.3 Diagrama simplificado	96
12.4 Vista real del equipo	97
12.5 Circuito de regulación	98
12.6 Sistema de compresión y almacenamiento	99
12.7 Esquema unifilar	100

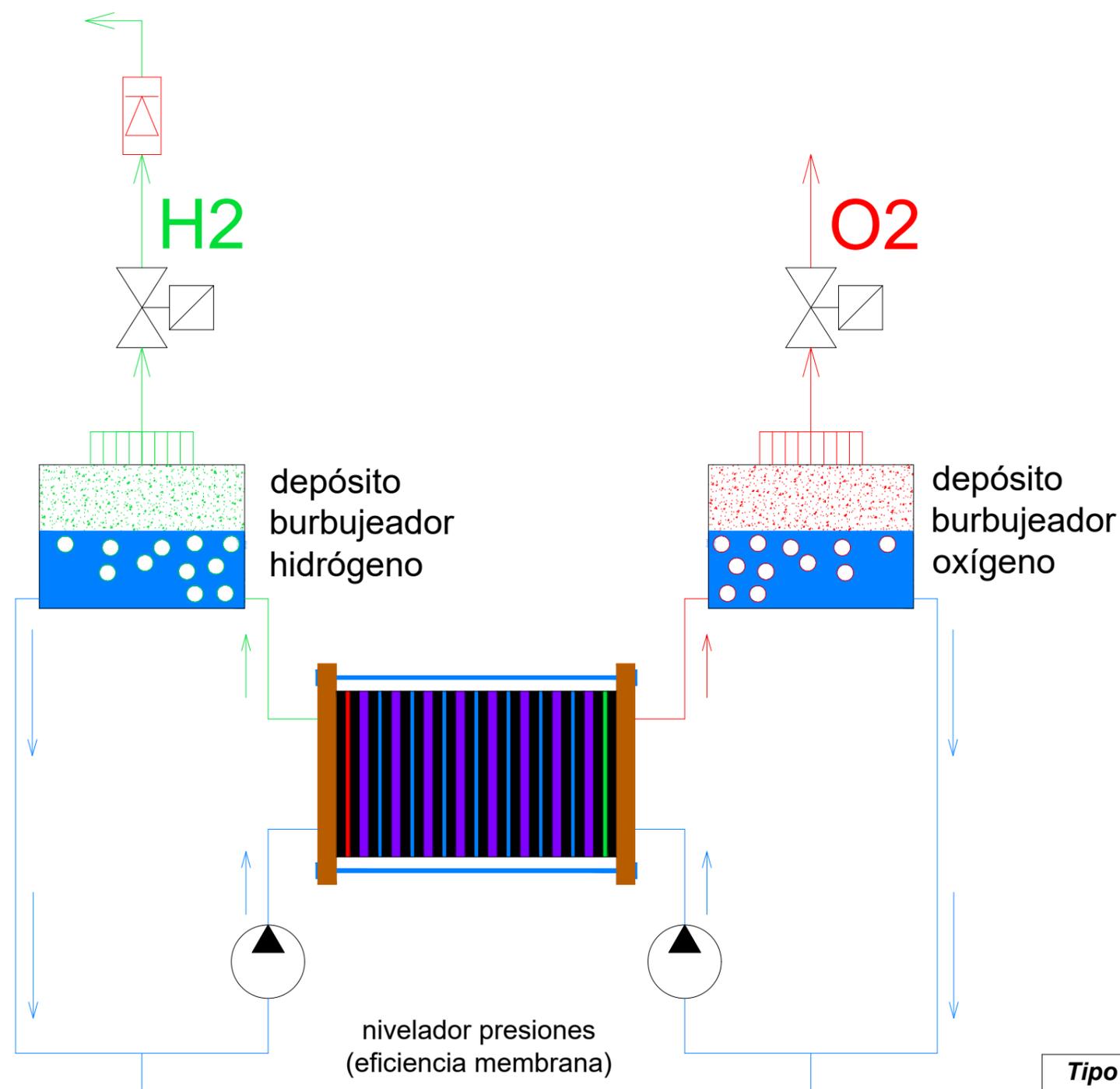


<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	COMPONENTES Y MEDIDAS (mm)		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 1/7

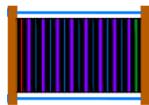
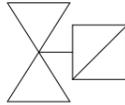
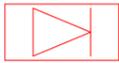
1 Sección izquierda  
2 Sección derecha



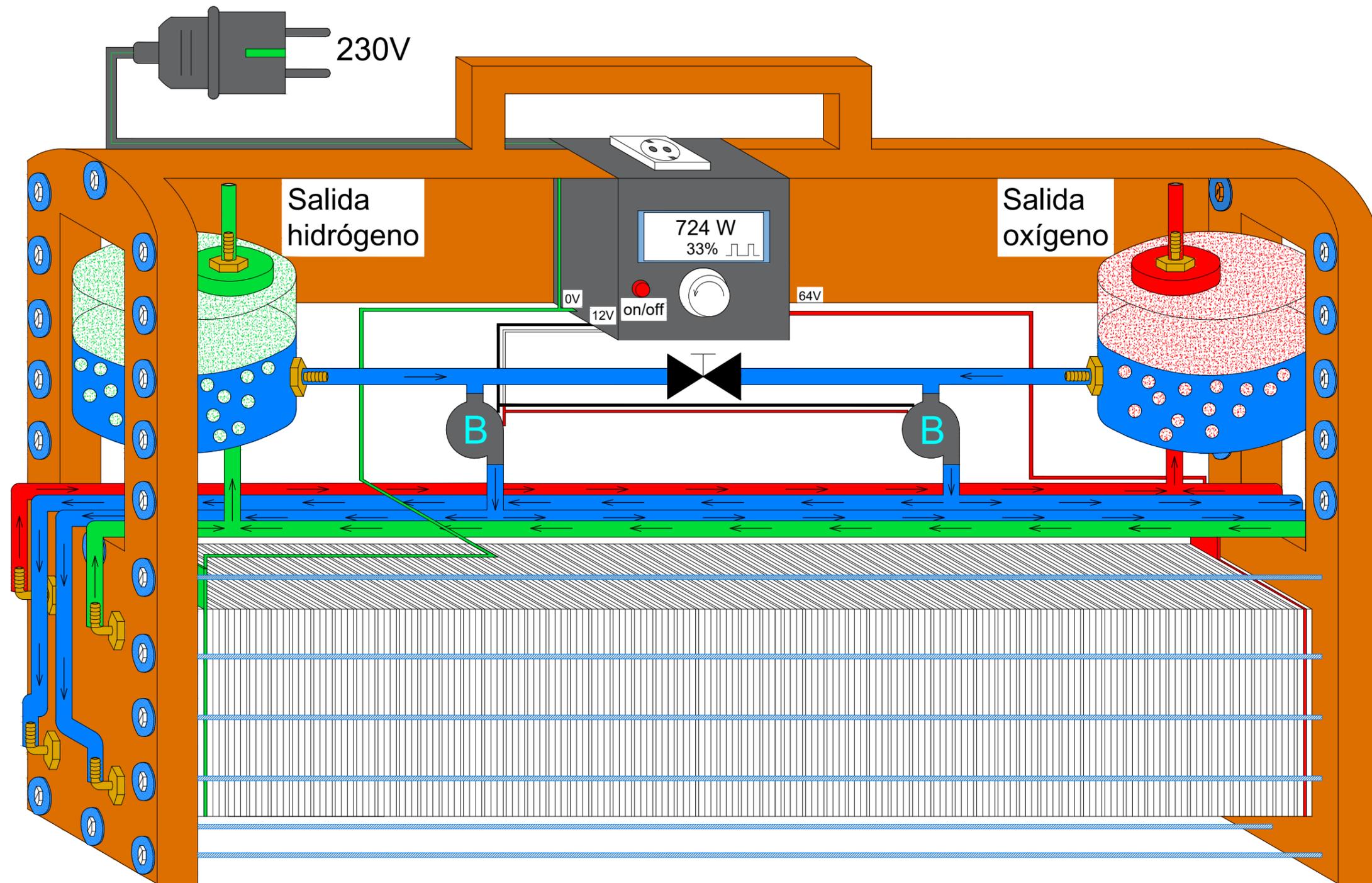
<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	DESPIECE Y SECCIONADO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA SEPARADORA DE GASES DE CONFIGURACIÓN BIPOLAR.		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 2/7



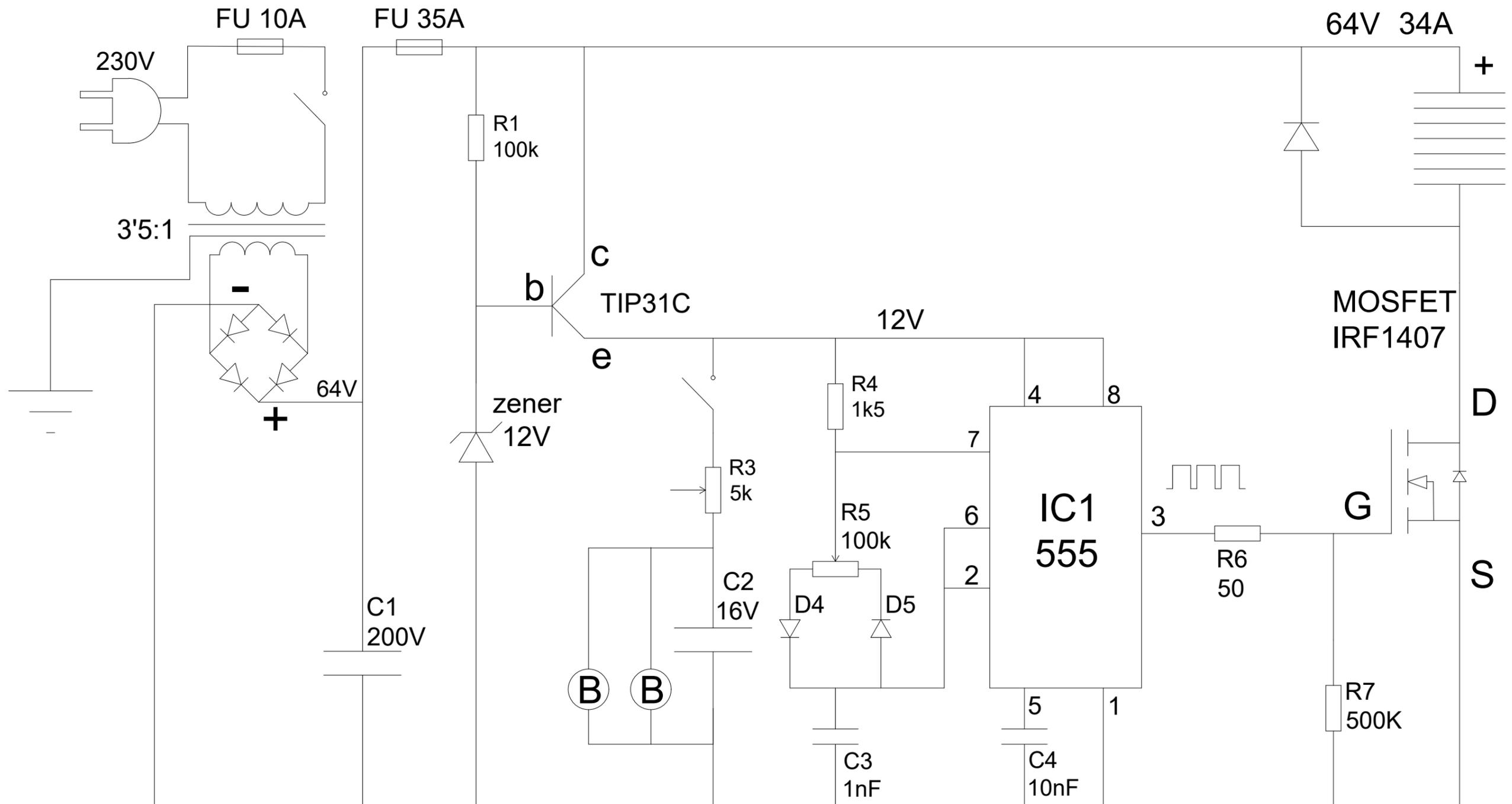
## LEYENDA

	celda electrolítica
	bombas
	Valvula de accionamiento electronico inyector electrónico.
	Valvula antiretorno de llama, arrestallama

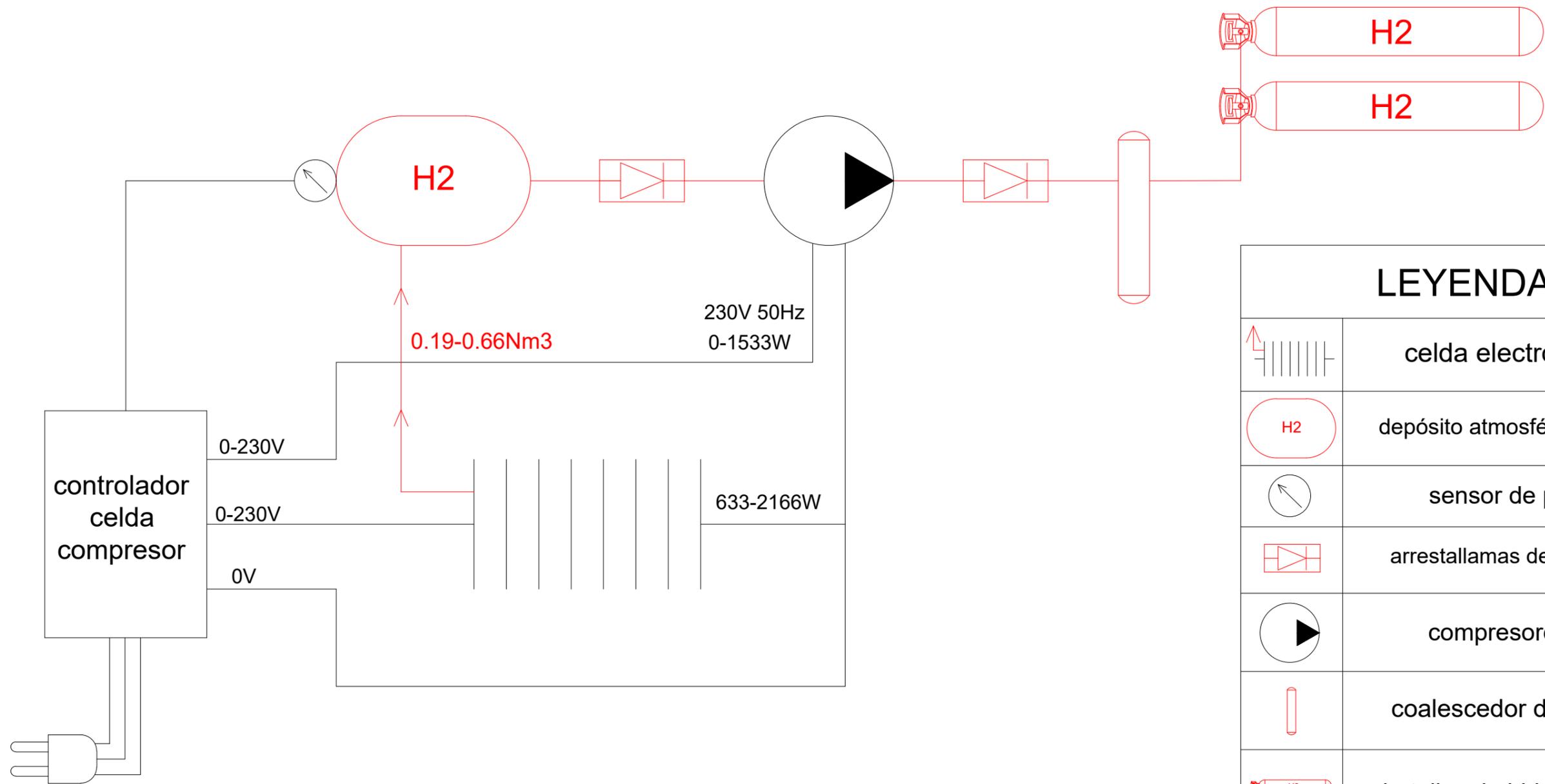
<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	Diagrama simplificado de flujo		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 3/7



<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	VISTA REAL DEL EQUIPO		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 4/7



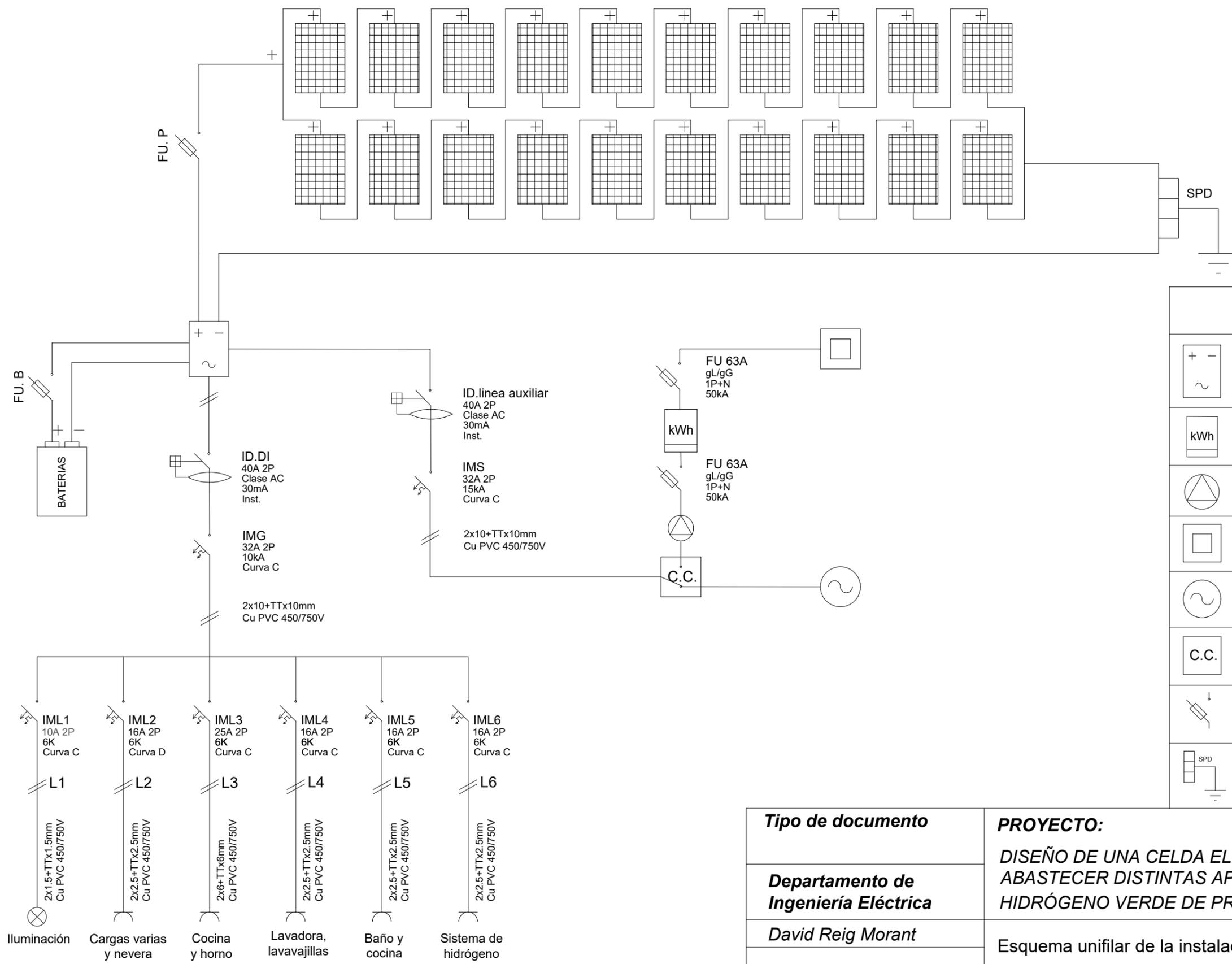
<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	Circuito electrónico de regulación		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 5/7



## LEYENDA

	celda electroítica
	depósito atmosférico previo
	sensor de presión
	arrestallamas de seguridad
	compresores
	coalescedor de agua
	botellas de hidrógeno

<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA.		
David Reig Morant	Sistema de compresión y almacenamiento		
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>		
		Fecha: 11/03/2022	Lámina 6/7



LEYENDA	
	INVERSOR HÍBRIDO
	CONTADOR BIDIRECCIONAL
	DISPOSITIVO ANTIVERTIDO
	RED ELÉCTRICA
	GRUPO ELECTRÓGENO
	CUADRO DE CONMUTACIÓN
	SECCIONADOR PORTAFUSIBLES
	Sistema de protección contra descargas atmosféricas

<b>Tipo de documento</b>	<b>PROYECTO:</b>	
<b>Departamento de Ingeniería Eléctrica</b>	DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA PARA ABASTECER DISTINTAS APLICACIONES CON HIDRÓGENO VERDE DE PRODUCCIÓN PROPIA	
David Reig Morant	Esquema unifilar de la instalación fotovoltaica	
<b>Aprobado por:</b>	<b>Firma:</b>	
	Fecha: 11/03/2022	Lámina 7/7