UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBA DE UN ELECTROLIZADOR SOLAR DE BAJA POTENCIA

CARLOS ANTONIO ARELLANO JORQUERA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. ALEX FLORES MARADIAGA

PROFESOR CO REFERENTE: Dr. Ing. RODRIGO BARRAZA VICENCIO

OCTUBRE 2019

Agradezco a todas las personas que se han involucrado en este proyecto, desde mis padres y hermanos que me enseñaron lo básico de la vida, mi familia que me ha acogido en mi aventura fuera de mis tierras natales, amigos de la universidad con los que pasamos horas estudiando, amigos del Voley USM, con los que olvidamos cualquier mal rato frente a la malla, y a mi segunda familia, en especial a María Jesús, quienes me han incentivado a terminar este hermoso ciclo de mi vida.

I. RESUMEN EJECUTIVO

El mundo ha cambiado, el excesivo uso de combustibles fósiles y la liberación de gases de efecto invernadero han provocado el aumento de la temperatura media del planeta, provocando el derretimiento de los hielos, aumento del nivel del mar y la contaminación atmosférica que afecta el desarrollo del ecosistema y de la salud humana. Afortunadamente, se han introducido a la matriz energética nacional y mundial, sector industrial, doméstico y movilidad, el uso de energías renovables no convencionales, ayudando a disminuir la dependencia del uso de combustibles fósiles y la descarbonización. Una de las alternativas para aumentar la disponibilidad de las energías renovables y evitar el uso de combustibles fósiles es el hidrógeno integrado a las energías renovables no convencionales (ERNC), que puede ser producido a través de fuentes renovables, ser almacenado y transportado con seguridad, para finalmente ser quemado o transformado en electricidad mediante una celda de combustible.

Para acelerar la transición a una matriz energética comprendida por energías renovables y tener disponible un sistema para el aprendizaje, que permita a estudiantes integrarse en el mundo del hidrógeno y las ventajas que este tiene por sobre otras formas de generación de energía, se ha desarrollado este proyecto contemplando un análisis de las tecnologías asociadas al hidrógeno. Se realiza una investigación de tecnologías existentes de generación de hidrógeno para realizar el diseño de un generador de hidrógeno mediante electrólisis de $100\ Nlts\ H_2/h$, este equipo cuenta principalmente con una celda electrolítica, estanques de acumulación, líneas de control y alimentación eléctrica. La construcción del equipo se realiza con materiales que en su mayoría se pueden adquirir en el mercado nacional, además es posible aumentar la generación hasta $500\ Nlts\ H_2/h$ mediante la adición de cámaras de generación en la celda de electrolisis, sin modificaciones en los demás componentes.

Se realiza una serie de pruebas de funcionamiento, generación y seguridad para establecer las capacidades y condiciones de operación del equipo, en donde se encontraron diversas fallas de componentes como sensores, sellantes y válvulas. Finalmente se muestra el equipo terminado con sus procedimientos de operación y seguridad.

II. ABSTRACT

The world has changed, the excessive use of fossil fuels and the release of greenhouse gases have caused the increase in the average temperature of the planet, causing ice melting, rising sea levels and the atmospheric pollution, affecting the development of the ecosystem and human health. Fortunately, they have been introduced to the national and global energy matrix, industrial, domestic and mobility sectors, the use of non-conventional renewable energies, helping to reduce dependence of fossil fuels and decarbonization. One of the alternatives to increase the availability of renewable energies and avoid the use of fossil fuels is hydrogen integrated into non-conventional renewable energies (NCRE), which can be produced through renewable sources, stored and transported safely, to finally be burned or transformed into electricity by a fuel cell.

To accelerate the transition to an energy matrix comprised of renewable energies and to have available a system for learning, which allows students to integrate into the world of hydrogen and its advantages over other forms of energy generation, this project has been developed contemplating an analysis of the technologies associated with hydrogen. An investigation of existing hydrogen generation technologies is carried out to design a hydrogen generator using $100\ Nlts\ H_2/h$ electrolysis, this equipment mainly counts with an electrolytic cell, accumulation tanks, control lines and power supply. The construction of the equipment is carried out with materials that can mostly be purchased in the national market, it is also possible to increase the generation up to $500\ Nlts\ H_2/h$ by adding generation chambers in the electrolysis cell, without modifications in the others components.

A series of tests of operation, generation and safety is performed to establish the capabilities and operating conditions of the equipment, where various component failures were found such as sensors, sealants and valves. Finally, the finished equipment is shown with its operation and safety procedures.

III. ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1 13
1.1. Introducción 13
1.1.1 Definición del problema 13
1.1.2 Contexto general 14
1.1.3 Estructura de trabajo 16
1.2 Marco teórico 16
1.2.1 Hidrógeno 16
1.2.2 Electrólisis 17
1.2.3 Tipos de electrolizadores 19
1.3 Estado del arte 21
1.3.1 Patentes 22
1.3.2 Equipos comerciales 26
1.3.3 Electrolito 33
1.3.4 Uso del hidrógeno 36
1.3.5 Celdas de combustible 37
1.3.6 Tipo de celdas de combustible 38
1.4 Objetivo General 39
1.5 Objetivos específicos 40
2 Capítulo 2 41
2.1 Requerimientos 41
2.2 Diseño 42

2.3 Parámetros de funcionamiento 44
2.3.1 Voltaje de operación 44
2.3.2 Curva característica I/V 46
2.3.3 Rendimiento del electrolizador alcalino 48
2.4 Diseño mecánico 50
2.4.1 Componentes estructurales 50
2.4.2 Componentes fase de generación 54
2.4.3 Componentes fase de acumulación 58
2.4.4 Componentes fase de control 61
2.4.5 Esfuerzos mecánicos en sistema electrolizador 72
2.5 Armado 84
2.5.1 Celda de electrólisis 84
2.5.2 Estanques 87
2.5.3 Sistema de control 88
3 Capítulo 3 91
3.1 Pruebas de funcionamiento 91
3.1.1 Prueba de presión en estanques 91
3.1.2 Prueba de generación de celda 93
3.1.3 Prueba de generación con celda completa 96
3.1.4 Prueba de sistema de control 98
3.1.5 Prueba de presión en celda y estanques 99
3.1.6 Prueba de rendimiento 101
3.1.7 Prueba de concentración de electrolito 102
3.1.8 Prueba de temperatura 104

3.2 Puesta en marcha 105
3.2.1 Procedimiento de encendido 106
3.2.2 Procedimiento de apagado 107
3.2.3 Procedimiento de llenado 107
3.3 Problemas y fallas 108
3.4 Adaptación con otras tecnologías 113
3.4.1 Energía solar fotovoltaica 114
3.4.2 Energía eólica 118
3.4.3 Celda de combustible 119
3.5 Presentación del equipo 121
4 Conclusiones 122
5 Recomendaciones 123
6 Bibliografía 124
7 Anexos 126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Globo relleno de hidrógeno para prospección del viento, propiedad de la Universidad Técnica Federico Santa María. 14
Figura 2: Composición de la matriz energética mundial, año 2016. 15
Figura 3: Diagrama de electrólisis del agua de flujos separados. 18
Figura 4: Diagrama general de electrólisis monopolar en paralelo (izquierda) y bipolar en serie (derecha). 20
Figura 5: Consumo global de hidrógeno por industria, año 2007. 21
Figura 6: Unidad de baja y media capacidad de electrolizador McPhy, flujo de 0,4 a 12 Nm3/h y presión entre 1 y 8 bar. 27
Figura 7: Unidad de gran capacidad de electrolizador de McPhy, flujo de 10 a 400 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar. 27
Figura 8: Electrolizador de McPhy de gran escala, potencias de 4, 20, 100 MW o más a presión 30 bar. 28
Figura 9: Electrolizador de Hidrógena de baja presión, flujo de 8 a 60 Nlts/h con presión de 7 a 12 bar. 28
Figura 10: Electrolizador de Hidrógena de Alta producción y baja presión, flujo de 0.25 a 1.2 Nm3/h con presión de 6 bar. 29
Figura 11: Electrolizador de Hidrógena de alta producción y presión, flujo de 0.25 a 1.2 Nm3/h con presión de 50 bar. 29
Figura 12: Electrolizador de Hidrogenics de interiores, flujo de 4 a 60 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar. 30
Figura 13: Electrolizador de Hidrogenics de exteriores, flujo de 4 a 60 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar. 30
Figura 14: Electrolizador de Siemens, flujo hasta 225 Nm3/h y presión hasta 35 bar. 31
Figura 15: Electrolizador AutoARK® de 27 celdas, 0,46 Nm3/h. 32
Figura 16: Esquema de una celda de combustible. 38
Figura 17: Esquema de una celda de combustible MCFC. 39
Figura 18: Diagrama electrolizador con estanques de acumulación. 42

Figura 19: Diseño preliminar del electrolizador, vista exterior. 43
Figura 20: Diseño preliminar del electrolizador, vista interior. 44
Figura 21: Estructura metálica soldada con perfil 40x40x2 mm. 51
Figura 22: Dimensiones de tapas metálicas fabricadas con planchas de acero galvanizado de 1,5 mm. 52
Figura 23: Dimensiones de bases internas metálicas fabricadas con planchas de acero galvanizado de 2,5 mm y su posición en la estructura. 53
Figura 24: Ruedas de carro horquilla de 200 mm con freno. 53
Figura 25: Marcos de acrílico transparente con perforaciones. 54
Figura 26: Placas de acero inoxidable 316L de 2 mm de espesor, arenadas y niqueladas. .. 56
Figura 27: Disposición de placas en electrolizador. 56
Figura 28: Caucho de polietileno clorosulfonado color negro para sellar el conjunto. 57
Figura 29: Tapas de acero inoxidable 316L de 15 mm de espesor, tapa fontal a la izquierda y tapa trasera a la derecha. 57
Figura 30: Señales de seguridad para el hidróxido de potasio. 58
Figura 31: Estanques cilíndricos de acero inoxidable de 2 mm de espesor. 59
Figura 32: Señales de seguridad en estanque de acumulación de hidrógeno. 60
Figura 33: Señales de seguridad en estanque de acumulación de oxígeno. 60
Figura 34: Manguera de PVC transparente para conexión entre componentes. 61
Figura 35: Posición de válvulas en línea de control de hidrógeno. 62
Figura 36: Posición de válvulas en línea de control de oxígeno. 63
Figura 37: Diagrama de tuberías e instrumentación del sistema electrolizador (Línea contínua: Fluido / Línea segmentada: Señal). 64
Figura 38: Válvula de bola acero inoxidable 316L NPT 1/2" de 2 posiciones y 2 vías. 66
Figura 39: Válvula solenoide de 2 vías con bobina a 220 V AC. 66
Figura 40: Válvula de bola de 2 vías 1/2"a la izquierda y actuador de 24 V DCa la derecha. 67
Figura 41: Fuente de poder AC/DC variable marca Xingtongli, tensión de entrada monofásica 220 [V], salida de 0 a 48 V y de 0 a 100 A. 67
Figura 42: Señales de peligrosidad en fuente de poder. 68

Figura 43: Sensores utilizados en líneas de control: (a) Sensor de temperatura, (b) Sensor de presión, (c) Sensor de humedad y temperatura, (d) Sensor de presencia de hidrógeno. 69
Figura 44: Flujómetro de hidrógeno Mass-View ®. 70
Figura 45: Ventiladores ubicados en las tapas laterales del equipo. 71
Figura 46: Display y controles del equipo. 72
Figura 47: Diagrama de cuerpo libre de pernos, con cargas. 73
Figura 48: Diagrama cuerpo libre de tapas, con cargas. 74
Figura 49: Diseño de tapa frontal del electrolizador, unidades en mm. 76
Figura 50: Diseño de tapa trasera del electrolizador, unidades en mm. 77
Figura 51: Diagrama cuerpo libre de cámaras de generación de acrílico, con cargas. 77
Figura 52: Área en compresión de la cámara de generación de acrílico, correspondiente a $\mathbf{0,029860}\ \boldsymbol{m2}$. 78
Figura 53: Diseño de cámaras de generación de acrílico, dimensiones en mm, 10 perforaciones en dos de los conductos con 8 mm de diámetro. 79
Figura 54: Diagrama cuerpo libre en placas de acero. 80
Figura 55: Diseño de placa polarizada del electrolizador, unidades en mm. 81
Figura 56: Diseño de placa neutra del electrolizador, unidades en mm. 82
Figura 57: Diagrama cuerpo libre de interior estanques de acumulación, con carga distribuida según presión. 83
Figura 58: Tipos de corte de empaques de goma para armado de la celda de electrolisis. .. 84
Figura 59: Secuencia de armado de celda de electrólisis. 86
Figura 60: Celda completa ajustada con pernos en posiciones A (tracción) y B (compresión). 86
Figura 61: Estanques instalados en el equipo. 88
Figura 62: Presentación de componentes de las líneas de control. 89
Figura 63: Vista de las líneas de control en la estructura. 90
Figura 64: Verificación de fugas con presión mínima en estanques de acumulación. 92
Figura 65: Montaje provisorio de estanques de acumulación. 93
Figura 66: Celda con 4 cámaras para pruebas de generación. 94
Figura 67: Conexión de celda para prueba de generación. 95

Figura 68: Prueba de generación con celda. 96
Figura 69: Prueba de generación con celda completa. 97
Figura 70: Salida de hidrógeno a presión ambiente en prueba de generación con celda completa..... 98
Figura 71: Prueba del sistema de control de hidrógeno y oxígeno a nivel de estanques..... 99
Figura 72: Prueba de presión en líneas de control. 100
Figura 73: Presión máxima alcanzada en pruebas de presión con celda completa. 101
Figura 74: Membrana de intercambio protónico usada inicialmente en la construcción de la celda. 109
Figura 75: Restos de desintegración de empaque de goma en placa. 110
Figura 76: Restos de desintegración de empaque de goma en membrana. 110
Figura 77: Placas polarizadas luego de utilizar agua desmineralizada para electrolito..... 112
Figura 78: Sistema de producción de potencia autónomo con fotovoltaica e hidrógeno en Madrid, España. 115
Figura 79: Sistema de energía renovable basado en hidrógeno en Leicestershire, Reino Unido 116
Figura 80: Sistema domestico solar-Hidrógeno (PV/H_2) en Brunate, Italia. 117
Figura 81: Estudio de rendimiento de un electrolizador acoplado a energías renovables. . 118
Figura 82: sistema prototipo de electrolizador eólico de prueba, Casaccia, Italia. 119
Figura 83: Sistema de almacenamiento de hidrógeno en Atsugi, Japón. 120
Figura 84: Equipo electrolizador construido y montado en estructura. 121

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de patentes más recientes sobre hidrógeno y electrolizadores. 22
Tabla 2: Resumen de electrolizadores disponibles en empresas estudiadas. 32
Tabla 3: Propiedades físicas y termoquímicas del Bicarbonato de Sodio NaHCO3. 33
Tabla 4: Propiedades físicas y termoquímicas del Hidróxido de Sodio NaOH. 34
Tabla 5: Propiedades físicas y termoquímicas del Hidróxido de Potasio KOH. 35
Tabla 6: Tabla de coeficientes f1 y f2 obtenidos experimentalmente. 49
Tabla 7: Nomenclatura de variables e instrumentos del diagrama P&ID. 65
Tabla 8: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero 316L. 75
Tabla 9: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acríico. 78
Tabla 10: Concentraciones de electrolito para prueba de punto de operación de la celda. 103
Tabla 11: Factores de par de torsión K para empleo en Ecuación 14. 149

Capítulo 1

1.1. Introducción

1.1.1 Definición del problema

El mundo ha cambiado, el excesivo uso de combustibles fósiles y la liberación de gases de efecto invernadero han provocado el aumento de la temperatura media del planeta, provocando el derretimiento de los hielos, aumento del nivel del mar y contaminación atmosféricas que afecta el desarrollo del ecosistema y de la salud humana. Afortunadamente, se han introducido a la matriz energética, tanto industrial, doméstico y movilidad, el uso de energías renovables no convencionales, ayudando a disminuir la dependencia del uso de combustibles fósiles y la descarbonización. Una alternativa a los combustibles fósiles es el uso del hidrógeno integrado a las energías renovables no convencionales (ERNC), que puede ser producido a través de fuentes renovables, ser almacenado y transportado con seguridad, para finalmente ser quemado o transformado en electricidad mediante una celda de combustible.

La Universidad Técnica Federico Santa María requiere de un banco de pruebas de generación, almacenamiento y conversión de hidrógeno para fines científicos, académicos y prestación de servicios, para ello se construye, desarrolla y prueba un prototipo de electrolizador. Además, desarrolla el proyecto FONDEF ID16110105, sobre alternativas para el monitoreo del viento sobre terrenos complejos, buscando mejorar y precisar los actuales métodos existentes para el monitoreo del recurso eólico. Actualmente, los sistemas de monitoreo suelen desarrollarse mediante la instalación de torres meteorológicas convencionales, que constituyen una solución costosa y poco factible para la caracterización del viento en terrenos de difícil acceso. Por esta razón, el proyecto considera el diseño y desarrollo de un sistema de sensores, que integra globos cautivos de alta estabilidad aerodinámica, los cuales son llenados con hidrógeno puro almacenado (Figura 1) [1]. La Universidad Santa María requiere de un electrolizador para abastecer su demanda de

hidrógeno y llenar los globos meteorológicos, para ello requiere de un electrolizador de gases separados de 100 $Nlts\ H_2/h$ ampliable a 500 $Nlts\ H_2/h$ a una presión entre 3 a 4 bar.

Figura 1: Globo relleno de hidrógeno para prospección del viento, propiedad de la Universidad Técnica Federico Santa María.

1.1.2 Contexto general

La matriz energética de los países del mundo ha cambiado respecto hace unas décadas, que en su mayoría se produce por la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas (Figura 2), se han introducido las energías renovables no convencionales (ERNC) que, no solo están disponibles como plantas de fuerza, sino que, tecnologías como la solar fotovoltaica o térmica, y la eólica, han acercado la disponibilidad de energías a lugares de difícil acceso y con condiciones extremas [2].

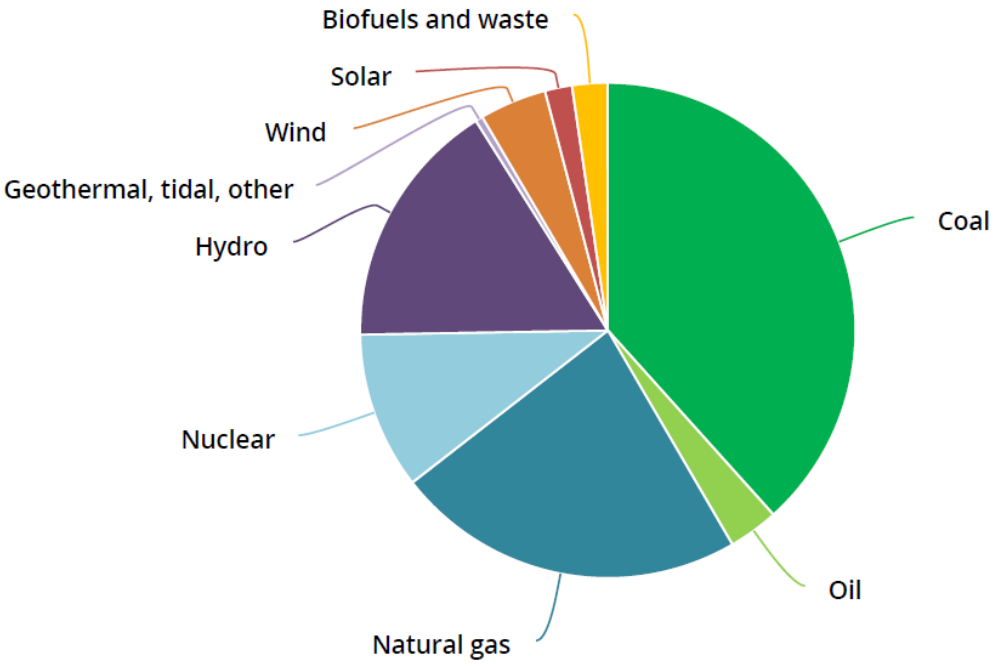


Figura 2: Composición de la matriz energética mundial, año 2017. Fuente International Energy Agency.

El aprovechamiento energético de los combustibles fósiles se ha considerado como el primer factor desencadenante de la liberación a la atmósfera de gases de efecto invernadero. Durante el siglo XX la temperatura del planeta ascendió en 0.6°C, hecho que se relaciona con el crecimiento y desarrollo industrial, basado en combustibles fósiles, de la época. Este impacto no solo afecta a las áreas más industrializadas del planeta, zonas como el Ártico y la Antártica, ven el progresivo derretimiento del hielo, provocando el aumento del nivel del mar en todo el mundo, la contaminación atmosférica afecta a la salud humana y al desarrollo de ecosistemas. además, los posibles derrames de petróleo en yacimientos y deterioro del estado del medio ambiente en zonas de explotación de minas de carbón.

Se estima que las reservas de combustibles fósiles permitan su consumo durante unos 50 años más, además, el descubrimiento de yacimientos desconocidos y al aumento de tecnologías, como el “fracking”, que permitan explotar yacimientos poco rentables hoy en día, se podría seguir disponiendo por unos 100 a 120 años más. Sin embargo, ya sean 50 o 120 años, este recurso es limitado y su ciclo de regeneración no está acorde a la escala humana, situación poco alentadora para nuestras futuras generaciones.

Para resolver estos problemas, es indispensable reducir la dependencia mundial, industrial, generación y transporte, de los combustibles fósiles, es ahí en donde las energías renovables tienen un espacio en la matriz energética, aportando con nuevas tecnologías como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, mareomotriz, undimotriz y biomasa [3].

1.1.3 Estructura de trabajo

La forma de abordar este trabajo de diseño, construcción y prueba de un electrolizador de baja potencia se basa en el avance por etapas que van desde la investigación hasta el desarrollo del equipo de generación de hidrogeno, pasando por el diseño, selección de componentes y parámetros de operación, construcción y pruebas de funcionamiento.

La primera etapa se basa en la investigación sobre el hidrógeno, las diversas formas para obtenerlo, situación mundial y nacional sobre la generación y uso de este compuesto, una serie de patentes sobre generación de hidrógenos y la adaptación con fuentes de energías renovables, especialmente la solar fotovoltaica. Finamente, se realiza un estudio de los modelos de electrolizadores comerciales de marcas reconocidas mundialmente junto a los parámetros de funcionamiento de cada equipo.

La segunda etapa se basa en diseñar el sistema electrolizador según especificaciones requeridas por la universidad, la elección del tipo de electrolizador, los componentes de generación, acumulación y control de hidrógeno, y la selección del electrolito.

La siguiente etapa considera la construcción de los elementos básicos del equipo y las pruebas de funcionamiento de los componentes más importantes del equipo electrolizador, como la celda de generación, estanques de acumulación, líneas de control y fuente de poder, con las cuales se verifican los parámetros de funcionamiento.

Finalmente se realiza el ensamblado completo del sistema y la puesta en marcha.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, pero en nuestro planeta no se encuentra en su estado puro. Posee potencial de aplicación en todos los sectores que requieren energía y su densidad energética es de 33 kWh/kg [4], lo que lo convierte en el

combustible con mayor densidad de energía por unidad de masa. Se caracteriza por su versatilidad, al poder ser usado como combustible, en transporte y como materia prima para distintos procesos industriales, además es limpio y es portador de energía en varios sectores productivos.

El 96% del hidrógeno producido en el mundo se extrae a partir de combustibles fósiles y solo el 4% a partir de agua, por lo que se puede decir que solo ese pequeño porcentaje es debido a una producción "verde" o renovable a gran escala. Actualmente se estima que la producción total de hidrógeno es de 65 $Mt/año$ y se emite alrededor de 500 $Mt\ CO_2eq/año$, se proyecta que para el año 2030, la demanda se incrementará hasta alcanzar los 200 $Mt/año$, si no se aumenta la producción de hidrógeno con ERNC, las emisiones de CO2 se incrementarían significativamente [4].

El hidrógeno puede ser producido a través de varios procesos, los cuales se pueden clasificar en:

- Termoquímicos: Se usa calor y reacciones químicas para obtener el hidrógeno de combustibles convencionales o biomasa.
- Electrolíticos: La molécula de agua se disocia en hidrógeno (H2) y oxígeno (O2) usando electricidad.
- Biológicos: Microorganismos, tales como las bacterias y algas pueden generar hidrógeno como medio de procesos biológicos propios.
- Otros procesos: Tales como la descomposición foto catalítica y biológica del agua.

Las hojas de datos de seguridad de hidrógeno y oxígeno según NCH 2245 Of. 2015 se encuentran en la sección Anexo A.

1.2.2 Electrólisis

El proceso de electrólisis del agua, formulado por primera vez por Michael Faraday en 1820, consiste en la obtención de hidrógeno gaseoso como producto primario y oxígeno gaseoso como subproducto, mediante el rompimiento de la molécula de H2O, este proceso ocurre al circular corriente continua a través de dos electrodos (ánodo y cátodo) en contacto con el agua, los que permite separar sus moléculas en Hidrógeno y Oxígeno. La producción de hidrógeno se realiza mediante la corriente que fluye por ambos electrodos inmersos en un

electrolito acuoso, para evitar la recombinación de ambas moléculas, se utiliza un separador o diafragma (Figura 3). El agua utilizada en el proceso debe ser previamente tratada, para así evitar la deposición de minerales y el deterioro de los elementos que constituyen la celda electrolítica [4].

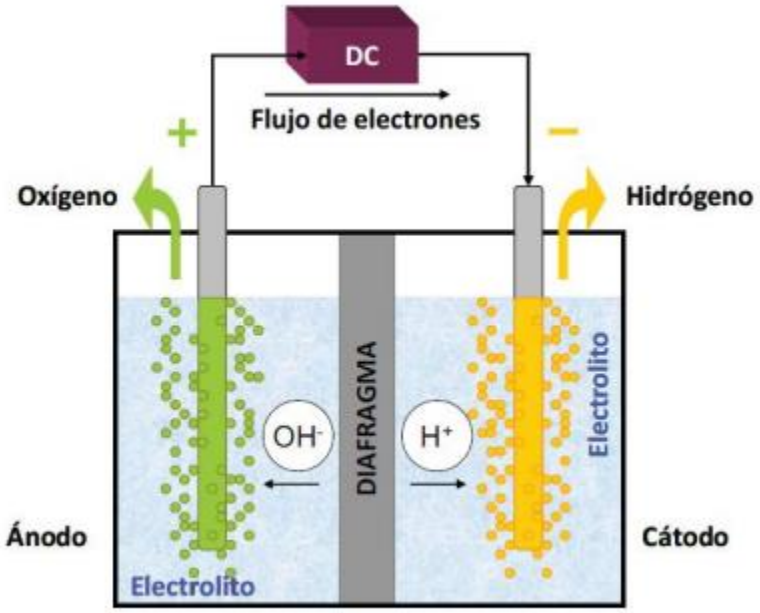


Figura 3: Diagrama de electrólisis del agua de flujos separados.

La ecuación química que se produce durante la electrólisis es la siguiente [5]:

$$2H_2O -> \ O_2 + 2H_2 \qquad E^0 = -2.65v \tag{1}$$

En el cátodo (electrodo negativo), se crea una carga negativa, las moléculas de agua que se encuentran cerca se rompen y descomponen en un ion hidrógeno H^+ y un ion hidróxido OH^-.

Esta reacción que se produce en el cátodo se describe como:

$$H_2O -> \ H^+ \ + \ OH^- \tag{2}$$

El ion hidrógeno libre toma uno de los electrones del cátodo, formando un átomo de hidrógeno neutro.

$$H^+ \ + \ e^- -> H \tag{3}$$

Este átomo neutro de hidrógeno se une con otro átomo de hidrógeno generado de la misma forma que el anterior, esta molécula asciende a la superficie en forma de hidrógeno.

$$H + H -> H_2 \quad (4)$$

A su vez, en el ánodo (electrodo positivo), el ion hidróxido retira el electrón extra que el hidróxido había tomado anteriormente del átomo de hidrógeno, entonces el átomo de hidróxido se combina con otros tres iones hidróxidos para formar una molécula de oxígeno y dos moléculas de agua.

$$4OH^- -> O_2 + 2H_2O + 4e^- \quad (5)$$

La molécula de oxígeno, al igual que el hidrógeno, asciende hasta la superficie.

1.2.3 Tipos de electrolizadores

Actualmente, existen tres tipos de electrolizadores, varían en el electrolito utilizado y en la madurez tecnológica de cada uno, estos son:

- Alcalinos
- Membrana de intercambio protónico (PEM)
- Membrana de estado sólido (SOE)

1.2.3.1 Electrolizador alcalino

Este tipo de electrolizador utiliza un líquido electrolítico de solución acuosa con pH básico, generalmente de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) con el fin de mejorar la conductividad eléctrica del agua. Estos dispositivos pueden llegar a tamaños entre 2 a 3 MW, produciendo entre 40 y 70 kg de hidrógeno por hora, la temperatura de operación va entre los 60 a 80 °C y trabajan generalmente a presión atmosférica. Esta tecnología es la más madura en la generación por electrólisis del agua, ya que se podían encontrar equipos operando a inicios del siglo XX. La vida útil es de 15 años, estimándose entre 60.000 a 90.000 horas de operación, con eficiencias entre 47 y 82 %, y pureza del hidrógeno sobre el 99.5 % [4]. Las celdas convencionales operan a voltajes entre electrodos de 1.8 – 2.2 V, con densidades de corriente por debajo de 0,4 A/cm2, los electrolizadores avanzados trabajan a voltajes relativamente bajos, sobre 1,6 V, y densidades de corrientes más elevadas, hasta 2 A/cm2 [6].

Posee dos configuraciones de ensamble, en la configuración monopolar, las celdas están conectadas eléctricamente en paralelo, los cátodos de todas las celdas electrolíticas están conectadas entre sí al igual que los ánodos, pero tanto los ánodos como los cátodos

están físicamente separados (Figura 4). En cambio, la configuración bipolar es aquella en que las celdas electrolíticas están conectadas en serie, el ánodo de una celda se conecta al cátodo de la siguiente, esta configuración se suele usar en electrolizadores que operan a sobrepresión (Figura 4) [18].

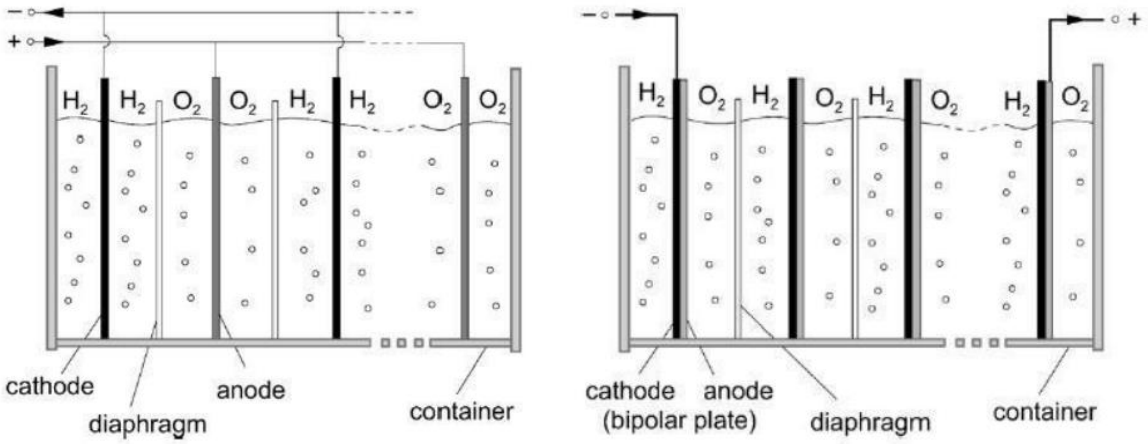


Figura 4: Diagrama general de electrólisis monopolar en paralelo (izquierda) y bipolar en serie (derecha).

1.2.3.2 Membrana de intercambio protónico (PEM)

Esta tecnología utiliza una membrana polimérica con carácter ácido, la cual es responsable del intercambio de protones del hidrógeno. Los electrodos normalmente son de metales nobles como el platino o iridio. El uso de este tipo de electrolizadores comenzó en la década del 50, logrando ser utilizados en aplicaciones de menor escala, demostraciones y de gran escala hasta 100 MW. La vida útil ronda las 20.000 a 60.000 horas de funcionamiento, eficiencias entre 48 y 78 % y puede lograr mayor pureza que los alcalinos, llegando a 99.99 %. La mayor diferencia con el alcalino es la ventaja de trabajar bajo variaciones de potencia, ya que responde rápidamente a las fluctuaciones en la alimentación eléctrica [4].

1.2.3.3 Membrana de estado sólido (SOE)

Este tipo de dispositivo utiliza una membrana sólida cerámica, la cual presenta una buena conductividad en el electrolito y permite la electrólisis de vapor a altas temperaturas, entre 600 y 900 °C, lo que resulta en eficiencias mayores a los electrolizadores alcalinos o PEM. La vida útil ronda las 1.000 horas y la eficiencia entre un 80 a 90 %. Actualmente,

están en una etapa de investigación y desarrollo, a pesar de que en Estados Unidos y Alemania su desarrollo data de los años 60 [4].

1.3 Estado del arte

Alrededor del 90% de la producción global de hidrógeno es utilizado por la industria, específicamente en producción de metano y amoniaco, en refinerías para el procesamiento de petróleo crudo y de esquisto, también se usa en menor medida en la industria aeroespacial, fabricación de metales, vidrios, electrónica, semiconductores, elaboración de grasas, bebidas y aceites (Figura 5) [4].

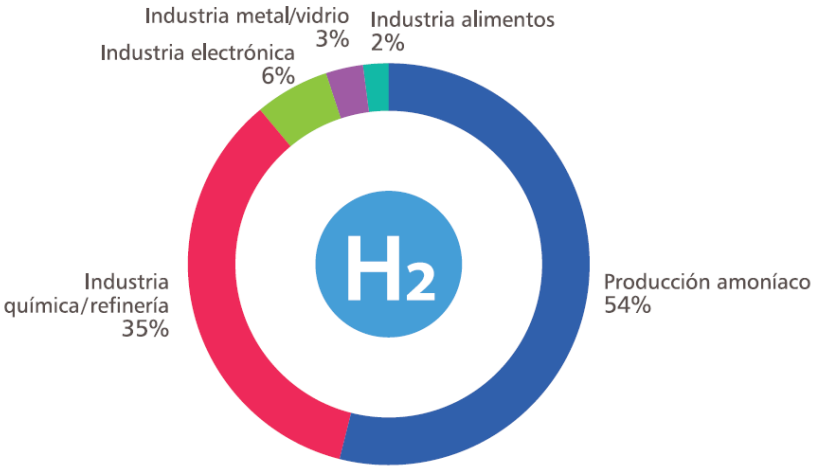


Figura 5: Consumo global de hidrógeno por industria, año 2007.

En la actualidad, solo un pequeño porcentaje de hidrógeno se utiliza en el sector energético, a pesar de que se considera una de las tecnologías más prometedoras en la integración a gran escala de la energía renovable. Cuando más de genera electricidad a partir de fuentes renovables fluctuantes, como el sol y el viento, y la menor dependencia de las empresas de energías convencionales, más importante es que cambien los sistemas de energía. En última instancia, la energía generada de forma renovable también debe estar disponible en momentos en que el sol y el viento escasean. Esto requiere almacenar energía, incluso durante largos periodos de tiempo.

Hace dos décadas se comenzó a desarrollar los primeros automóviles a hidrógeno, que, dotados de una celda de combustible, pueden circular con un motor eléctrico solo con la carga de hidrógeno, actualmente se ha ampliado el mercado del transporte mediante

hidrógeno instalándose en las calles del mundo los buses eléctricos a base de celdas de combustibles.

Además, existen variadas aplicaciones estacionarias en donde se operan celdas de combustible para energía primaria, energía de respaldo o electricidad y calor, estas aplicaciones son de grandes consumidores como: data centers, almacenes, edificios, plantas de tratamientos de agua, aeropuertos, hospitales, etc.

1.3.1 Patentes

En la Tabla 1 se resumen las patentes más recientes sobre hidrógeno y electrolizadores en el mundo.

Tabla 1: Resumen de patentes más recientes sobre hidrógeno y electrolizadores.

Sección	N° de solicitud	Nombre	Fecha adjudicación	Descripción
A	WO2009063104A1	Rubén BENEITO PÉREZ, Valentín PÉREZ HERRÁNZ, Manuel Molto Paya, José Antonio MOLINA TORTOSA, Rafael Navarro Berbegal, Joaquín Vilaplana Cerda	22 May 2009	Sistema de producción de hidrógeno y de energía eléctrica a partir de energía fotovoltaica cuya finalidad consiste en facilitar una fuente energética independiente que pueda utilizarse como medio de abastecimiento en sitios aislados de las redes de distribución de energía eléctrica comerciales, o como medio de apoyo cuando se producen fallos en la red comercial.
B	WO2008035957A1	Chang Jeon SonJun Seong Park	27 Mar 2008	Explica la generación de hidrógeno mediante la electrólisis pulsada, con fundamentos en la mecánica cuántica, la cual es mucho más eficiente que la electrólisis DC.
C	An overview of hydrogen	J.D. Holladay*, J. Hu, D.L. King,	2009	Describe la producción de hidrógeno mediante

	production technologies	Y. Wang		hidrocarburos, mediante procesos naturales y a través del agua.
D	The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production	Mingyong Wang a,n, Zhi Wang a, Xuzhong Gong a, Zhancheng Guo a.	2014	Describe las mejoras que se pueden realizar a la electrólisis para realizar un aumento de la eficiencia.

Sección A (WO2009063104A1)

SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La patente presenta un sistema de producción de hidrógeno y de energía eléctrica a partir de energía fotovoltaica cuya finalidad consiste en facilitar una fuente energética independiente que pueda utilizarse como medio de abastecimiento en sitios aislados de las redes de distribución de energía eléctrica comerciales, o como medio de apoyo cuando se producen fallos en la red comercial; facilitando además mediante la invención la mejora en el rendimiento de producción de energía eléctrica a partir de energía fotovoltaica y su disponibilidad, debido al empleo de hidrógeno como vector energético de almacenamiento intermedio.

El objetivo principal de la invención consiste en facilitar el desarrollo de plantas de generación de energía eléctrica y de producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno, haciendo uso de lo que se conoce como ciclo solar del hidrógeno.

Sección B (WO2008035957A1)

La patente da a conocer un diseño innovador para la obtención de gas marrón (HHO, Oxihidrógeno), mediante el método de la electrólisis pulsada.

La electrólisis pulsada corresponde a un método de generación de hidrógeno, en la cual se inyectan perturbaciones o pulsos eléctricos a intervalos de tiempo, en el proceso de la obtención de hidrógeno. En la electrólisis a corriente continua, esta ocurre cuando el voltaje entre el cátodo y el ánodo excede un voltaje de 1.6V. Puesto que la corriente que fluye

en el agua depende del coeficiente de difusión de los iones, es decir, qué tan buenos conductores son, existe un punto en que, si se sigue aumentando el voltaje, la eficiencia comienza a disminuir. Esto hace que el método DC sea ineficiente, y, por tanto, la electrólisis pulsada surge como una alternativa.

Los sistemas de generación de gas marrón que se utilizan generalmente tienen problemas porque el coste de producción se incrementa considerablemente porque una pluralidad de ventiladores de enfriamiento se combina con un sistema de enfriamiento para separar el vapor de agua de una mezcla de gas marrón. Este vapor de agua, que se genera mediante la hidrólisis pulsada, no se logra separar completamente del gas marrón, y, por tanto, no se obtiene uno de alta calidad. La patente entonces les da una solución a estos problemas, mediante un sistema refrigerante externo.

Otros trabajos como el de "A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply", muestran que, escogiendo un ancho de pulso adecuado para el voltaje suministrado, la eficiencia de la electrólisis pulsada es mayor que la eficiencia de la electrólisis a corriente continua. Más aún, es posible aumentar el voltaje, sin disminuir la eficiencia de esta.

Sección C (An overview of hydrogen production technologies)

Este trabajo da cuenta de algunas formas de obtención del hidrógeno para fines energéticos, mencionando los métodos clásicos y algunos más innovadores. Los principales son los siguientes, y se enumeran para una mayor comprensión:

i. Pirólisis: La pirólisis es otra tecnología productora de hidrógeno donde el hidrocarburo se descompone (sin agua ni oxígeno presente) en hidrógeno y carbono. La pirólisis se puede hacer con cualquier material orgánico y se utiliza para la producción de hidrocarburos, nanotubos y esferas de carbono.
ii. Electrólisis de plasma: En la electrólisis de plasma, las reacciones químicas globales son las mismas que las de la electrólisis convencional; sin embargo, la energía y los radicales libres utilizados para la reacción de electrólisis son proporcionados por un plasma generado típicamente con electricidad o calor, en vez de una fuente de voltaje DC.

iii. Hidrógeno procedente de la biomasa: A corto plazo, la biomasa es el sustituto orgánico renovable más probable del petróleo. Para la generación de hidrógeno, las tecnologías de biomasa actuales incluyen: gasificación, pirólisis, conversión a combustibles líquidos por extracción supercrítica, licuefacción, hidrólisis, etc., seguido en algunos casos por electrólisis y producción biológica de hidrógeno.

iv. Hidrógeno biológico: Debido a la creciente atención al desarrollo sostenible y la minimización de los desechos, la investigación en biohidrógeno ha aumentado sustancialmente en los últimos años. Las principales tecnologías de bioprocesos utilizadas para la producción de biohidrógeno incluyen: producción de hidrógeno fotolítico a partir de agua por algas verdes o cianobacterias (como fotólisis directa), producción de hidrógeno fermentativo oscuro durante la fase acidogénica de la digestión anaerobia de material orgánico, procesos de foto fermentación, producción de dos fases en oscuridad / fermentación e hidrógeno por cambio de agua y gas.

v. Fotólisis directa: La fotosíntesis utiliza la energía solar para convertir el dióxido de carbono y el agua en hidratos de carbono y oxígeno. Para algunos organismos, el exceso de energía solar es "ventilado". por la producción de hidrógeno a través de fotólisis directa del agua. Los investigadores están tratando de modificar este proceso en algas y bacterias por lo que la mayoría de la energía solar se desvía a la producción de hidrógeno, con lo suficiente desviado a la producción de hidratos de carbono para mantener la vida de estas algas.

Sección D (The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production)

Los métodos mencionados hasta el momento proponen la utilización de nuevas formas para la obtención del hidrógeno, reemplazando los métodos de electrólisis clásicos que se utilizan en general, pero hay trabajos que proponen formas de potenciar y mejorar la eficiencia de la electrólisis clásica. Por ejemplo, una forma aumentar la eficiencia, es reduciendo la resistencia óhmica de los elementos que conforman la solución.

$$\sum R = Re + Rm + Rb + Rc \qquad (6)$$

La relación (6) muestra la suma de las resistencias que se obtienen en el proceso de la electrólisis del agua, donde Re, Rm, Rb y Rc son la resistencia del electrolito, la

resistencia de la membrana, la resistencia de las burbujas y la resistencia del circuito, respectivamente. La resistencia Re puede ser minimizada agregando sales conductoras tales como KOH o NaOH, pero no pueden agregarse en exceso pues pueden erosionar la membrana; las resistencias Rc y Rm pueden ser minimizadas al momento de la construcción del proceso de electrólisis, pero para una celda dada, estos parámetros son constantes. Las burbujas que se generan al momento de la electrólisis, las que contienen la separación de los elementos, y que se originan en los electrodos, son también un problema en la electrólisis clásica. Estas burbujas no se distribuyen uniformemente a lo largo de los electrodos, en cambio, se acumulan en la superficie, y se ha determinado que se desprenden cada 0.15[s], lo que ocasiona una menor obtención de hidrógeno, debido a que se dispersan las burbujas por la solución, y, por tanto, se genera un aumento en la energía para la obtención de este. Uno de los métodos que se utilizan actualmente para solucionar este problema, es la utilización de campos magnéticos externos, los cuales se basan en la ley de Lorentz. De esta forma, se evita la dispersión de las burbujas.

1.3.2 Equipos comerciales

Algunas empresas constructoras de electrolizadores y otros sistemas relacionados en el mundo se presentan a continuación.

McPhy, es una empresa francesa con enfoque en la impulsión de las energías limpias, para ello enfocan en la integración del hidrógeno para descarbonizar la industria y el transporte. Ofrece electrolizadores alcalinos desde 0,4 a 400 $Nm3/h$ con presiones de salida desde 1 a 30 bar (Figura 6, Figura 7), además ofrece integración con plantas de generación escalables de 4, 20, 100 MW y más (Figura 8), el consumo eléctrico de sus electrolizadores es de 4.5 $kWh/Nm3$. Además de electrolizadores, dispone de almacenamiento de hidrógeno y estaciones de distribución [7].

Figura 6: Unidad de baja y media capacidad de electrolizador McPhy, flujo de 0,4 a 12 Nm3/h y presión entre 1 y 8 bar.

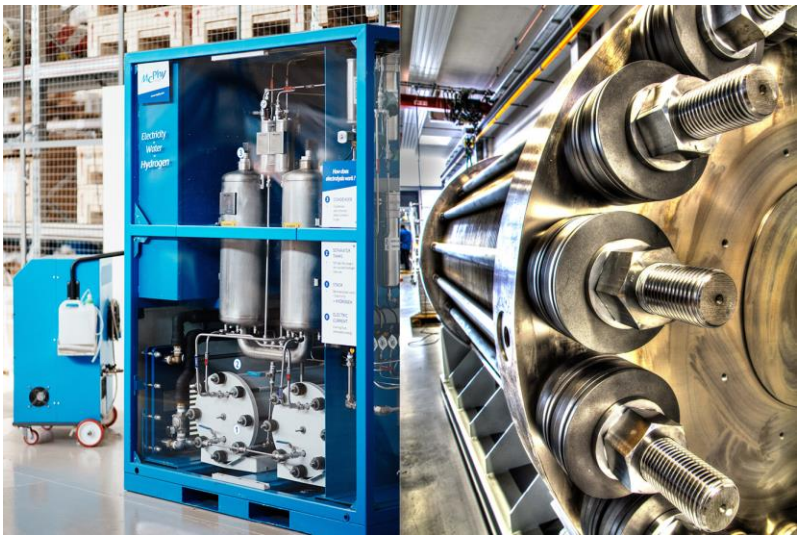


Figura 7: Unidad de gran capacidad de electrolizador de McPhy, flujo de 10 a 400 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar.

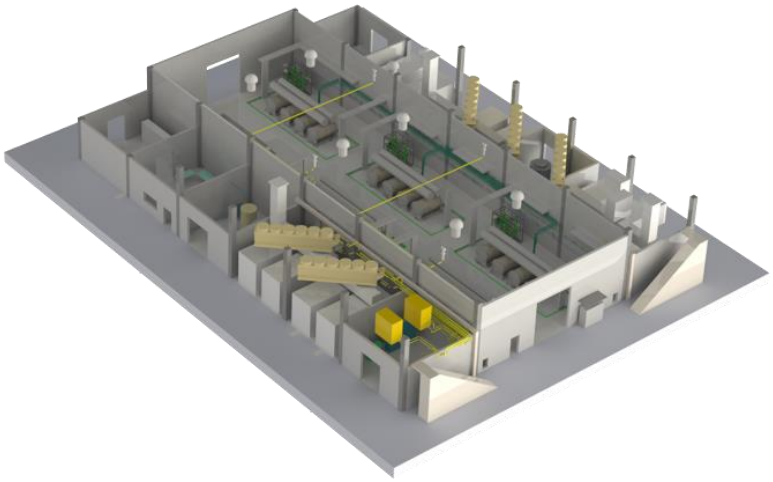


Figura 8: Electrolizador de McPhy de gran escala, potencias de 4, 20, 100 MW o más a presión 30 bar.

Hidrógena, es una empresa española dedicada a la fabricación de equipos de generación de hidrógeno por electrólisis, catalizadores y accesorios para hidrógeno de baja escala, con equipos que van de 8 $Nlts/h$ a 1,2 $Nm3/h$, posee equipos PEM y SOE que alcanzan entre 6 y 50 bar (Figura 9, Figura 10, Figura 11) [8].

Figura 9: Electrolizador de Hidrógena de baja presión, flujo de 8 a 60 Nlts/h con presión de 7 a 12 bar.

Figura 10: Electrolizador de Hidrógena de Alta producción y baja presión, flujo de 0.25 a 1.2 Nm3/h con presión de 6 bar.

Figura 11: Electrolizador de Hidrógena de alta producción y presión, flujo de 0.25 a 1.2 Nm3/h con presión de 50 bar.

Hydrogenics, empresa con participación en Europa y Norte América, realiza el diseño, construcción e instalación de generadores de hidrógeno comercial e industrial, celdas de combustible de hidrógeno y soluciones de almacenamiento de energía a escala de los MW. Ofrece una gama de aplicaciones, que incluyen: electrolizadores PEM y Alcalinos para

instalación en interiores (Figura 12) y exteriores (Figura 13), celdas de combustibles de hidrógeno para vehículos eléctricos y para plantas de energía eléctrica independientes, energía crítica y sistemas con fuente de alimentación ininterrumpida [9].

Figura 12: Electrolizador de Hidrogenics de interiores, flujo de 4 a 60 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar.

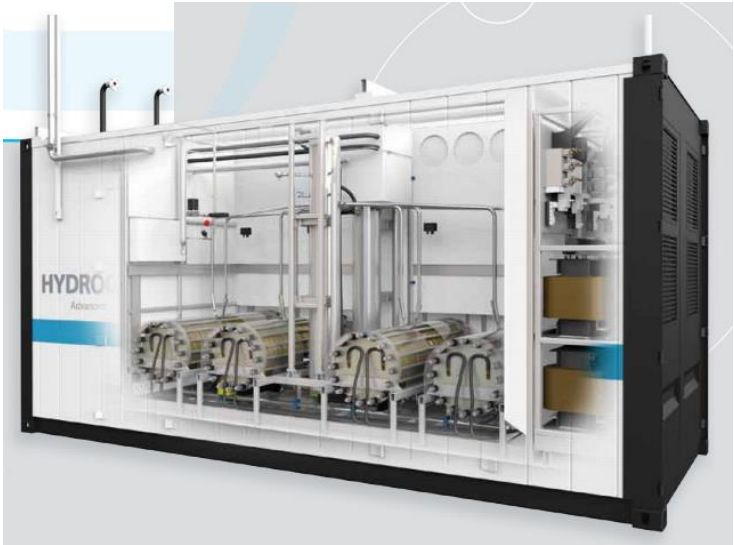


Figura 13: Electrolizador de Hidrogenics de exteriores, flujo de 4 a 60 Nm3/h y presión de 10 a 30 bar.

Siemens, empresa multinacional con origen en Alemania, opera en sectores industrial, energético, salud e infraestructura. Sus nuevos desafíos son contribuir en la

descarbonización de la economía global, expandiendo las fuentes de energías renovables e integrarlas a infraestructuras desarrolladas de la industria, la energía y la movilidad. Posee equipos electrolizadores PEM de hasta 225 $Nm3/h$ con presiones hasta los 35 bar y 99.5 a 99.9% de pureza del hidrógeno (Figura 14) [10].

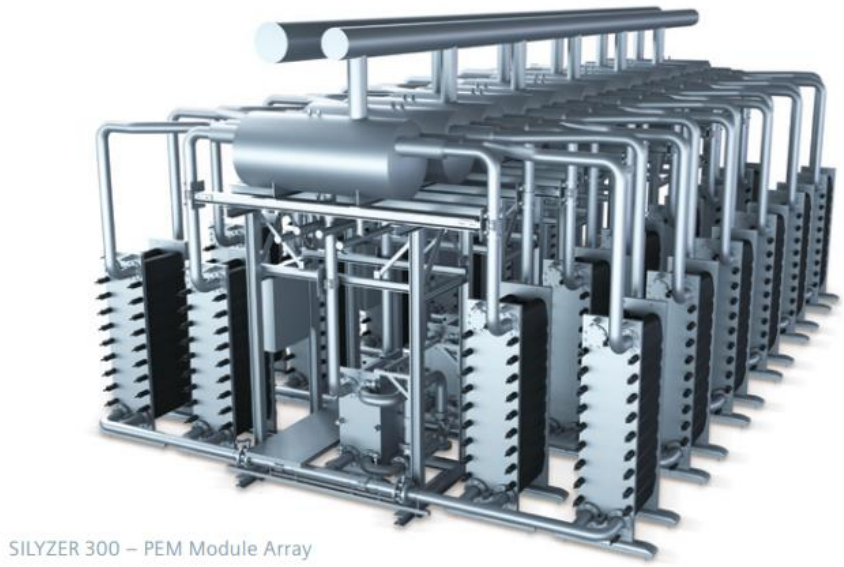


Figura 14: Electrolizador de Siemens, flujo hasta 225 Nm3/h y presión hasta 35 bar.

AutoARK® 11 or 27 cell models, Es un modelo de electrolizador fabricado en Estados Unidos por Millennium Reign Energy, es un generador de hidrógeno automatizado para residencial, pequeños negocios, telecomunicaciones y/o agricultura. Cuenta con 11 o 27 celdas, producción de casi 0,46 Nm^3/h para las 27 celdas, pureza del hidrógeno de 99,5%, potencia de entrada de 750 o 1800 W según modelo y un 63% de eficiencia de producción.

Figura 15: Electrolizador AutoARK® de 27 celdas, 0,46 Nm3/h.

En la Tabla 2 se muestra un resumen con los parámetros de operación de electrolizadores fabricados por las empresas mencionadas anteriormente.

Tabla 2: Resumen de electrolizadores disponibles en empresas estudiadas.

Empresa	País	Flujo H2 [Nm3/h]	Presión [bar]	Tipo
McPhy	Francia	0,4 a 400	1 a 30	Alcalino
Hidrógena	España	0.008 a 1,2	6 a 50	PEM/SOE
Hydrogenics	América y Europa	4 a 60	10 a 30 (hasta 200)	Alcanino/PEM
Siemens	Alemania	hasta 225	hasta 35	PEM
Millennium Reign Energy	Estados Unidos	0,46	-	-

Las empresas mencionadas anteriormente, McPhy, Hidrógena, Hydrogenics, Siemens y Millennium Reign Energy, han desarrollado electrolizadores de baja y gran escala, para la industria y como integración con las energías renovables no convencionales que son más intermitentes, la energía solar y eólica. Para ello entregan soluciones de electrólisis, alcalina y PEM, almacenamiento y generación de electricidad mediante celdas de combustible.

1.3.3 Electrolito

El Funcionamiento de un electrolizador requiere del compuesto H_2O como consumible, este compuesto no es conductor eléctrico, por lo que no se realiza la electrólisis de forma espontánea. Para lograr el proceso de electrólisis es necesario agregar un compuesto que permita que se comporte como un conductor eléctrico, esta sustancia contiene en su composición iones libres, el cual es denominado electrolito.

Se realiza un análisis de 3 potenciales electrolitos, los cuales se presentan a continuación:

i. Bicarbonato de Sodio: NaHCO3

Tabla 3: Propiedades físicas y termoquímicas del Bicarbonato de Sodio NaHCO3.

Propiedades físicas	
Apariencia	Blanco cristalino
Densidad	2173 kg/m3
Masa Molar	84 g/mol
Punto de fusión	323 K (50°C)
Punto de ebullición	543 K (270°C)
Índice de refracción (Np)	1,3344
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	10,3 g/100g de H2O
Propiedades termoquímicas	

$\Delta_f H^0 sólido$	-951 kJ/mol

Se realizan pruebas con Bicarbonato de Sodio, este compuesto es estable, no corrosivo ni reactivo, por lo que su manipulación es sencilla y no requiere de mayores medidas de precaución. Al momento de utilizarlo para la electrólisis, el compuesto reacciona transformándose en Hidróxido de Sodio NaOH, produciendo gases no deseados y causando daños en las superficies de los electrodos de acero inoxidable.

Durante la electrólisis del NaHCO3, los iones de Na+ se ven atraídos hacia el cátodo, generando una serie de reacciones en cadena, las cuales son:

$$2Na + 2H_2O + e^- \rightarrow 2NaOH + H_2 + HCO_3^- + H_2O \rightarrow H_2CO_3 + OH^- \quad (7)$$

$$2H_2CO_3 \rightarrow H_2O + CO_2 \quad (8)$$

$$2CO_2 + 2H + 2e^2 \rightarrow CO + H_2O \quad (9)$$

$$2CO + 2H + 2e^- \rightarrow C + H_2O \quad (10)$$

Al final del proceso de electrólisis el bicarbonato de sodio se transforma completamente en NaOH, luego de este punto se puede comenzar la generación de hidrógeno, por lo tanto, no existe conveniencia en utilizar el bicarbonato de sodio como electrolito para el proceso de electrólisis [11].

ii. Hidróxido de Sodio: NaOH

Tabla 4: Propiedades físicas y termoquímicas del Hidróxido de Sodio NaOH.

Propiedades físicas	
Apariencia	Sólido, Blanco
Densidad	2100 kg/m3
Masa Molar	39,99713 g/mol
Punto de fusión	591 K (318°C)
Punto de ebullición	1663 K (1390°C)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	111 g/100g de H2O (20°C)

	13,89 g/100 ml de alcohol etílico (20°C)
Propiedades termoquímicas	
$\Delta_f H^0 gas$	-197,76 kJ/mol
$\Delta_f H^0 líquido$	-416,88 kJ/mol
$\Delta_f H^0 sólido$	-425,93 kJ/mol
$S^0 gas, 1\ bar$	228,47 J*K/mol

El hidróxido de sodio corresponde a un compuesto altamente corrosivo, absorbe fácilmente la humedad del ambiente, por lo que debe almacenarse en un lugar fresco y seco, es una sustancia muy alcalina con alta solubilidad en agua y un excelente conductor eléctrico.

Mediante reiterados experimentos, se establece que, a altas concentraciones de NaOH, mayores a 300 g/litro de H2O, se genera espuma blanca, perjudicial para la conductividad y vida útil del electrolito, además, incide directamente en la temperatura de funcionamiento de la celda, llegando a superar los 35°C, reduciendo la generación de hidrógeno [11].

iii. Hidróxido de Potasio: KOH

Tabla 5: Propiedades físicas y termoquímicas del Hidróxido de Potasio KOH.

Propiedades físicas	
Apariencia	Blanco
Densidad	2040 kg/m3
Masa Molar	56,10563 g/mol
Punto de fusión	633 K (360°C)
Punto de ebullición	1593 K (1320°C)
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	119 g/100g de H2O

Propiedades termoquímicas	
$\Delta_f H^0 gas$	-232 kJ/mol
$\Delta_f H^0 líquido$	-415,6 kJ/mol
$\Delta_f H^0 sólido$	-425 kJ/mol

El hidróxido de potasio corresponde a una sustancia química inorgánica altamente corrosiva, por lo que requiere de buenas condiciones de manipulación. se debe mantener en un lugar fresco y seco, para no absorber la humedad del ambiente, su disolución en agua es altamente exotérmica, es un excelente conductor eléctrico para ser usado como electrolito, no genera otros compuestos adicionales al someterlo a electrólisis.

Para altas concentraciones, mayores a 300 gr por litro de H2O, genera espuma y la temperatura aumenta, sin embargo, controlando la temperatura y la concentración, se puede obtener una alta eficiencia de la electrólisis [11].

1.3.4 Uso del hidrógeno

El mayor uso del hidrógeno en Chile se utiliza en refinerías de hidrotratamiento, hidrocraking y desulfuración de los combustibles, este uso ha aumentado debido a la demanda de combustibles con menor contenido de azufre, junto con la reducción de demanda por crudos ligeros y “dulce”. En menor medida, se utiliza el hidrógeno en la industria de alimentos para la hidrogenación de grasas, fabricación de aceites y margarinas. Otros usos son en la industria vidriera para el pulido de artículos de vidrio y requemado de bordes tras el proceso de conformado, en sistemas de generación de energía como refrigerante y en tratamientos térmicos y termoquímicos.

Existen dos empresas en Chile que poseen plantas de producción de hidrógeno, como Linde Chile S.A. o Hidrógenos del Biobío. Linde Chile S.A. inicia sus operaciones en 2006 con una capacidad de producción de 4.200 kg/h (46.700 Nm3/h) a 21 bar y 30°C, en su mayoría para abastecer la demanda de hidrógeno de ENAP. Hidrógenos del Biobío es propietaria de una planta productora de alta pureza, destinada exclusivamente a abastecer a

la refinería Biobío de ENAP, cuenta con 2 plantas de producción de hidrógeno en Chile, alimentación de hidrógeno para planta Vidrios Lirquén e Hidrógeno en Indura S.A [4].

1.3.5 Celdas de combustible

Las celdas de combustible son una de las tecnologías más prometedoras para generar energía limpia y eficiente para aplicaciones domésticas, industriales y vehicular. Una celda de combustible convierte la energía química del hidrógeno y el oxígeno en electricidad teniendo como residuo agua. La gran mayoría de estos equipos fueron utilizados por la NASA y algunos laboratorios, pero con la necesidad de reducir polución y la emisión de gases que favorecen el efecto invernadero ha resurgido el interés en todo el mundo.

Su funcionamiento es similar al de una batería, está basado en las reacciones electroquímicas entre un combustible, en este caso un gas rico en hidrógeno, y un oxidante, en este caso el oxígeno del aire, sin ningún ciclo de combustión intermedio. Produce energía en forma de electricidad y calor mientras se le suministre combustible, como subproducto genera agua 100% pura, no emite contaminantes.

Estas celdas funcionan al contrario que la electrólisis. Tienen dos electrodos, uno positivo, el cátodo y uno negativo, el ánodo, separados por una membrana, el oxígeno se hace pasar por el cátodo y el hidrógeno por el ánodo. El hidrógeno reacciona a un catalizador en el ánodo que convierte las moléculas de gas hidrógeno (H_2) en electrones con carga negativa (e^-) e iones con carga positiva (H^+). Si el electrolito es ácido los iones de hidrógeno se mueven a través de la membrana hacia el cátodo. En el cátodo, las moléculas de oxígeno se rompen en átomos de oxígeno, y se combinan con los iones de hidrógeno y electrones para producir agua y calor.

El tipo de ion que circula depende del electrolito:

- Electrolito ácido: los iones hidrógeno emigran del ánodo al cátodo.
- Electrolito alcalino: los iones hidroxilo (OH^-) emigran del cátodo al ánodo.
- Electrolito de sales de carbonatos: los iones carbonato (CO_3^{-2}) emigran del cátodo al ánodo.
- Electrolito de óxido sólido: los iones oxigeno (O^{-2}) emigran del cátodo al ánodo.

Los electrones salen de la celda mediante un conductor conectado al cátodo para ser utilizados como energía eléctrica, el agua y el calor se expulsan del baño electrolítico como vapor, que puede ser separado o reciclado mediante sistemas de cogeneración [12].

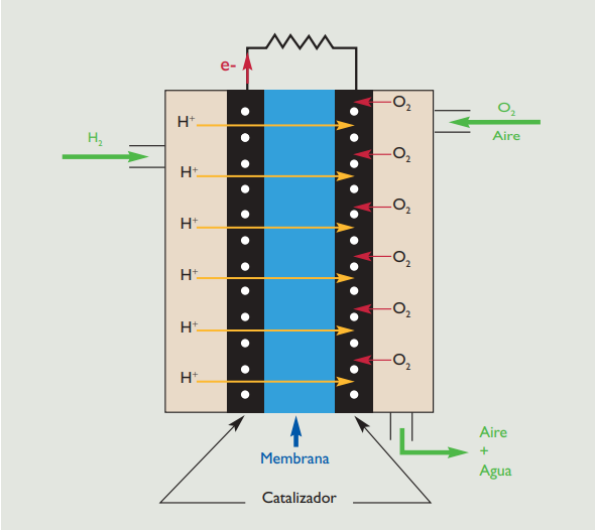


Figura 16: Esquema de una celda de combustible.

1.3.6 Tipo de celdas de combustible

La principal clasificación de celdas es por tipo de tecnología, al igual que los electrolizadores, por lo que de la misma forma existen de variados tamaños, desde grandes estaciones de generación hasta vehículos. Los distintos tipos de celdas que se utilizan actualmente son los siguientes.

1.3.6.1 Alcalinas

Celda de combustible que utiliza como electrolito el hidróxido de potasio (KOH), su funcionamiento es el inverso al de una celda de electrólisis alcalina, generando electricidad y agua mediante la adición de hidrógeno y oxígeno. Su eficiencia ronda el 70%.

1.3.6.2 Ácido fosfórico

Esta celda de combustible utiliza ácido fosfórico como electrolito, su eficiencia es superior al 40% y su temperatura de operación ronda los 205°C. Es utilizado principalmente en vehículos pesados como locomotoras y autobuses.

1.3.6.3 Membrana de intercambio protónico (PEM)

Poseen una membrana de intercambio protónico que perite el paso de iones de oxígeno circular a través, funcionan con temperaturas relativamente bajas, cercanas a 90°C, Según el U.S. Departamento of Energy son las principales candidatas para uso en vehículos ligeros, edificios y aplicaciones pequeñas.

1.3.6.4 Carbonato fundido (MCFC)

Utiliza como combustible carbón, se introduce hidrogeno por un lado y una mezcla de oxígeno con dióxido de carbono, funcionan a temperaturas de 340°C, se han probado celdas desde 10 kW a 2 MW.

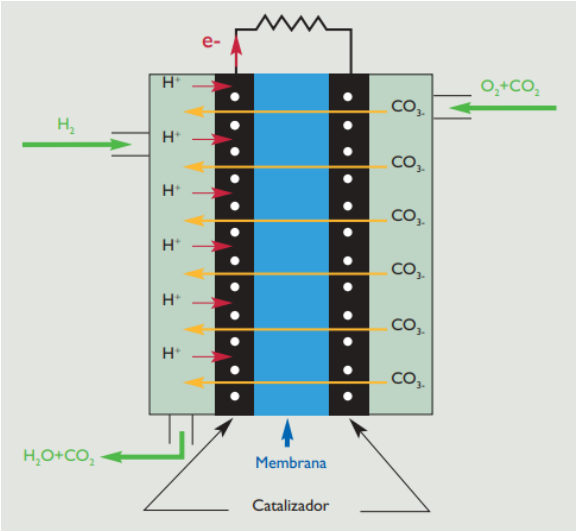


Figura 17: Esquema de una celda de combustible MCFC.

1.3.6.5 Óxido sólido (SOFC)

Utiliza electrolito sólido no poroso de óxido metálico denominado Zirconia, es una celda para aplicaciones de gran potencial, más de 100 kW, la temperatura de operación puede llegar a los 1000 °C, debido a que utilizan materiales cerámicos sólidos en logar de electrolito líquido, la eficiencia puede llegar al 60%.

1.4 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es diseñar, fabricar y probar un electrolizador de baja potencia alimentado mediante energía solar, acoplado a una pila de combustible en un banco de prueba para uso académico.

1.5 Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de tipos, tamaños y materiales de electrolizadores de baja potencia (y seleccionar una configuración para ser construida).
- Plantear el diseño conceptual del proceso de electrólisis del agua para generación de hidrógeno.
- Seleccionar, dimensionar y especificar componentes adecuados para el sistema de electrólisis, control, suministro de energía y seguridad.
- Realizar simulación del proceso químico y definir parámetros de funcionamiento.
- Construir el equipo electrolizador y realizar pruebas, por componentes y general, del funcionamiento y rendimiento.
- Diseñar un banco de pruebas para el electrolizador acoplando una celda de combustible de hidrógeno.
- Estudiar la prefactibilidad técnica de la generación continua de hidrógeno para alimentar celdas de combustible.

2 Capítulo 2

2.1 Requerimientos

La generación de hidrógeno mediante electrólisis genera calor residual, por lo que el sistema puede requerir sistemas de enfriamiento para mantener una temperatura estable del equipo, y no variar las propiedades termoquímicas del electrolito, membrana y demás componentes.

Los requisitos que debe cumplir el electrolizador solicitado por la universidad son:

- Caudal de hidrógeno 100 $Nlts/h$ ampliable a 500 $Nlts/h$
- Presión salida hidrógeno 3 bar, máximo 4 bar
- Pureza del hidrógeno ≥99,95%
- Monitorización de estado con visualización de parámetros del proceso
- Sensores de presión, temperatura, voltaje, corriente y flujo de hidrógeno
- Capacidad de llenado 21 Nm^3 semicontinuo

El funcionamiento de un electrolizador de flujos separados requiere principalmente de una celda, donde se realiza la electrólisis y de un estanque de acumulación para cada salida de gas (hidrógeno y oxígeno) (Figura 18).

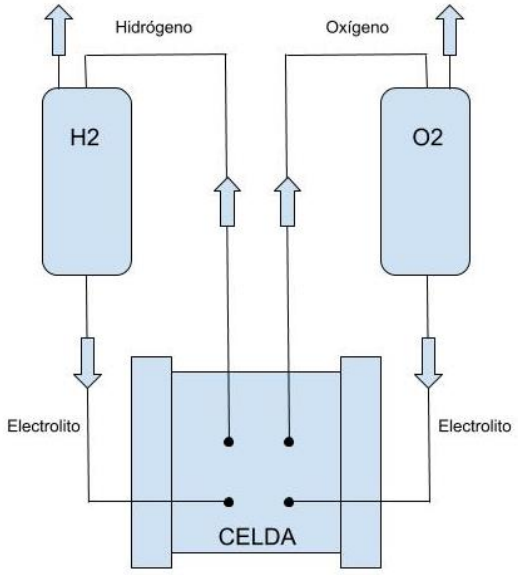


Figura 18: Diagrama electrolizador con estanques de acumulación.

Los electrolizadores disponibles en el mercado generalmente están fabricados con los siguientes elementos [13].

- Marcos de acrílico transparente. Constituyen el elemento estructural de la celda y genera el espacio para la producción de los gases.
- Membrana separadora. Utilizada para separar los gases después de la producción.
- Electrodos bipolares. Placas de acero niquelados que se polarizan mediante una fuente de corriente.
- Electrodos monopolares. Placas de acero niquelados intermedias que se polarizan al circular corriente por el electrolito.
- Juntas. Sellos de goma entre cada elemento para evitar fugas de electrolito y gases.
- Tapas exteriores. Placas de acero que mantienen el conjunto de elementos acoplados.
- Pernos de fijación con tuercas de seguridad.

2.2 Diseño

El diseño preliminar del electrolizador (Figura 19) consta de una caja metálica, la cual contiene todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento. Las características funcionales y visuales que debe cumplir son las siguiente:

- Estar completamente cerrada.
- Tener acceso al interior por todas las caras.
- Poder moverse por superficies lisas y horizontales.
- Poseer pantalla de visualización de parámetros y botonera de control.
- Poseer parada de emergencia.
- Poseer pilotos de estado.
- Poseer salidas de hidrógeno y oxígeno.
- Poseer control manual de salidas de gases.
- Poseer rejillas de ventilación.

Figura 19: Diseño preliminar del electrolizador, vista exterior.

El interior de la caja metálica (Figura 20) debe considerar todos los sistemas que permitan la generación de hidrógeno, control y seguridad del equipo, estos son:

- Sistema electrolizador (celda y estanques).
- Sistema de control electrónico.
- Sistema de control manual.
- Fuente de poder.
- Sensores.

- Conexiones.

Figura 20: Diseño preliminar del electrolizador, vista interior.

2.3 Parámetros de funcionamiento

2.3.1 Voltaje de operación

Para un proceso electroquímico operando a temperatura y presión constante, el trabajo útil (trabajo reversible) está dado por el cambio en energía libre de Gibbs, por lo que el potencial mínimo de disociación de las moléculas de agua (voltaje reversible) se define como.

$$U_{rev}[V] = \frac{\Delta G \left[\frac{J}{mol}\right]}{z[n^{\underline{a}}\ electrones] * F \left[\frac{Coulomb}{mol}\right]}$$

Donde ΔG es el incremento de energía libre de Gibbs, z es el número de moles de electrones intercambiados en la reacción de electrólisis, en este caso (z=2) y F es la constante de Faraday (96500 [C]).

La variación ΔG incluye un parámetro térmico debido a irreversibilidad ($T\Delta S$), el cual para un proceso reversible representa la demanda de calor. La entalpía estándar para el proceso de electrólisis de agua es de O = 285,83 H KJ/mol. La demanda total de energía ΔH está relacionada con el voltaje termoneutral de celda mediante la siguiente expresión:

$$U_{tn}[V] = \frac{\Delta H}{zF}$$

Esto se aprecia en la siguiente figura:

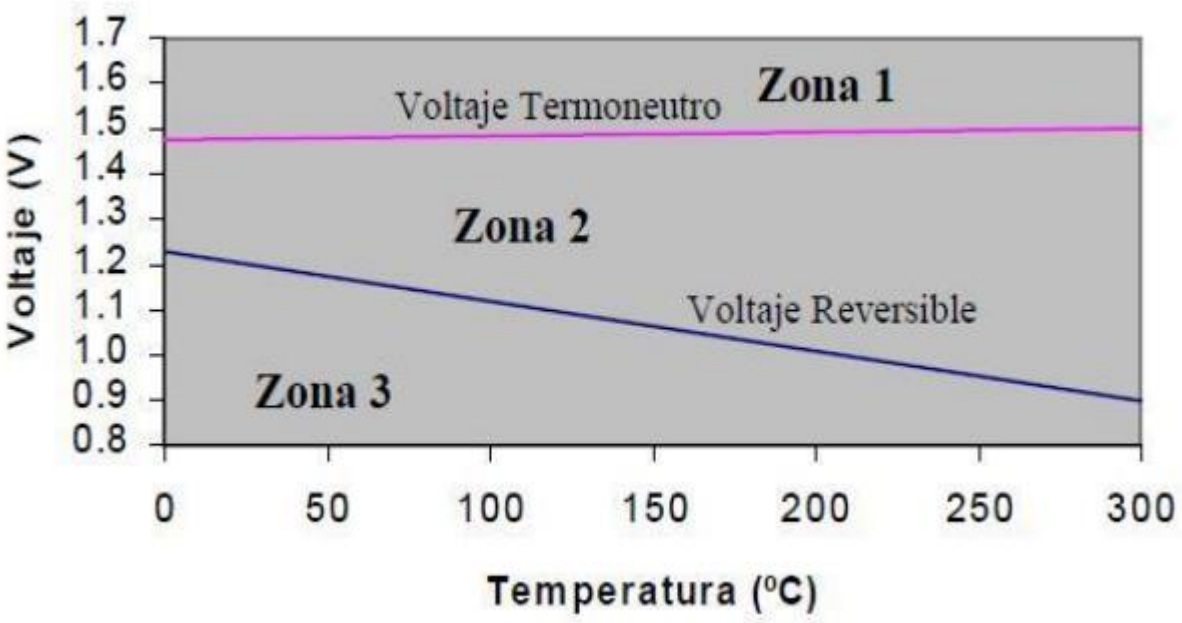


Gráfico 1: Zonas de electrólisis según Voltaje y temperatura del electrolito.

Se diferencian 3 zonas:

- Zona 1: Zona donde se produce la electrólisis con exceso de potencia, la cual es liberada en forma de calor.
- Zona 2: La electrólisis solo es posible si se aporta energía adicional en forma de calor.
- Zona 3: La electrólisis es imposible, no circula corriente por los electrodos de la celda.

De acuerdo con lo anterior, se tiene:

Voltaje mínimo (rev)	[V]	1,23
Voltaje termoneutral	[V]	1,48

El máximo valor de voltaje que se puede alcanzar está limitado por la membrana Zirfon (2,2 [V] y la fuente de alimentación para toda la celda de electrólisis (50 [V]).

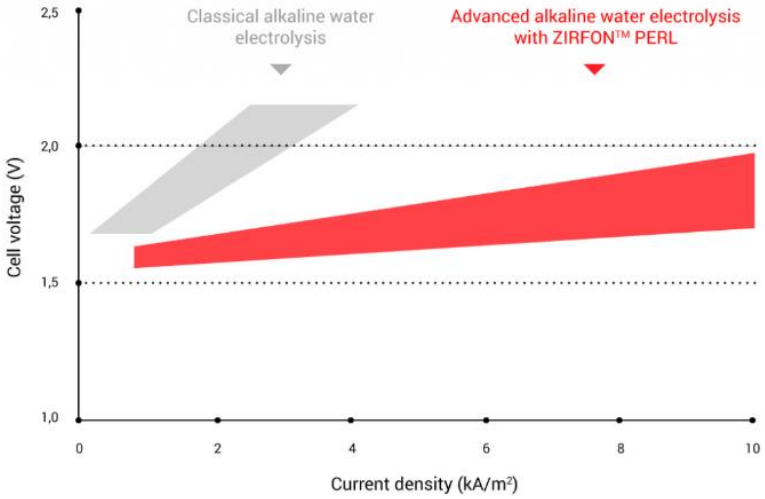


Figura 21: Rangos ideales de operación del Zirfon.

En cuanto al calor generado en el proceso, este se puede estimar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{gen}\left[\frac{J}{s}\right] = \left(V_{aplicado} - V_{tn}\right) * I_{aplicada}$$

Es decir, a mayor sobre voltaje, mayor será la temperatura alcanzada por el electrolito.

2.3.2 Corriente de operación

A continuación, se muestra la producción requerida por el equipo trabajando con 12 cámaras y por celda con 2 cámaras.

Tabla 6: taza de producción requerida.

12 cámaras	2 cámaras	unidad
100	16,67	NL/h
27,78	4,63	Ncm3/s

4,46	0,74	mol/h

Para producir 0,74 mol/h se calcula el voltaje requerido de acuerdo con las leyes de Faraday para la electrolisis.

$$n[moles] = \frac{I[A] * t[s]}{z[-] * F[C]}$$

Donde n son los moles de H2, I la intensidad de corriente en Amperes, t el tiempo en segundos, z el número de electrones necesarios para liberar una molécula (2 en este caso) y F es la constante de Faraday (96500 [C]).

De acuerdo con lo anterior, despejando I, se requiere de una corriente teórica mínima de 39,89 [A].

2.3.3 Curva característica I/V

La curva característica de un electrolizador alcalino es una curva empírica que modela la cinética de la reacción de la electrólisis de agua en la celda electrolítica y determina los diferentes puntos de operación. A continuación, en el Gráfico 2 se muestra la curva característica I/V de un electrolizador alcalino a diferentes temperaturas de operación [19].

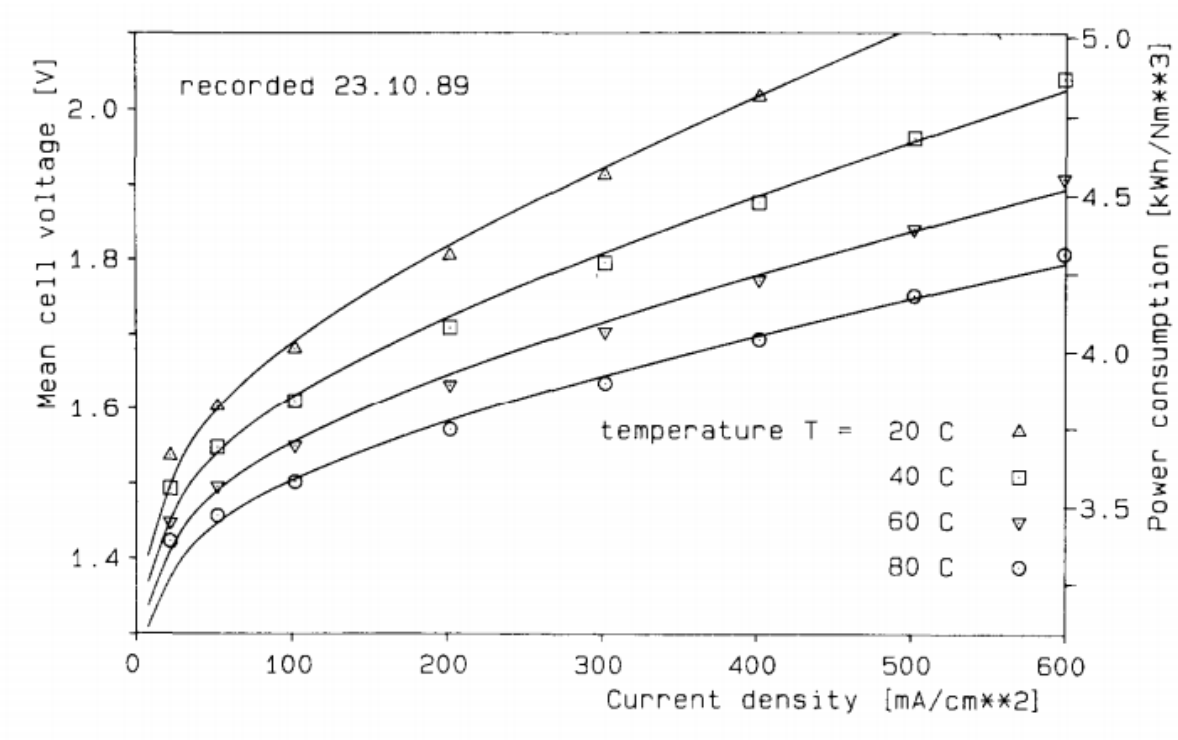


Gráfico 2: Curva I-V característica de un electrolizador con temperaturas entre 20 y 80°C.

Las curvas isotérmicas de mayor temperatura están por debajo de las de menor temperatura, por lo que, para una misma densidad de corriente, se requiere menor tensión aplicada en las placas mientras mayor sea la temperatura del electrolito, es decir, mientras mayor sea la temperatura de operación, se requiere menor potencia para la generación, siempre y cuando sea posible operar sin perjudicar la conductividad del electrolito.

2.3.4 Rendimiento del electrolizador alcalino

2.3.4.1 Eficiencia de Faraday

La eficiencia de Faraday (η_f) está definida como la razón entre la generación real versus la generación teórica de hidrógeno del electrolizador. Este valor decrece debido a corrientes parásitas a lo largo de los ductos de gas, las cuales varían linealmente con la potencia del electrolizador. La ecuación 11 es una expresión empírica que describe estos fenómenos para una temperatura dada.

$$\eta_f = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2 \tag{11}$$

En donde I es la corriente de los electrodos en Amper, A el área en m^2 de los electrodos y los coeficientes f_1 y f_2 son valores experimentales obtenidos con el electrolizador de la planta Phoebus ubicada en Jülic, Alemania y el electrolizador de la planta Hysolar ubicada en Stuttgart, Alemania [18]. Los valores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Tabla de coeficientes f1 y f2 obtenidos experimentalmente.

	PHOEBUS	HYSOLAR			
T	80	40	60	80	°C
f_1	250	150	200	250	$mA^2\ cm^{-4}$
f_2	0.96	0.990	0.985	0.980	0 . . . 1

La eficiencia de Faraday obtenida con estas dos plantas se muestra en el Gráfico 3. Se aprecia que, a partir de los datos experimentales, un aumento de la densidad de corriente por sobre los 50 mA/cm^2 no implica un aumento de eficiencia de Faraday, pero si un aumento del consumo eléctrico.

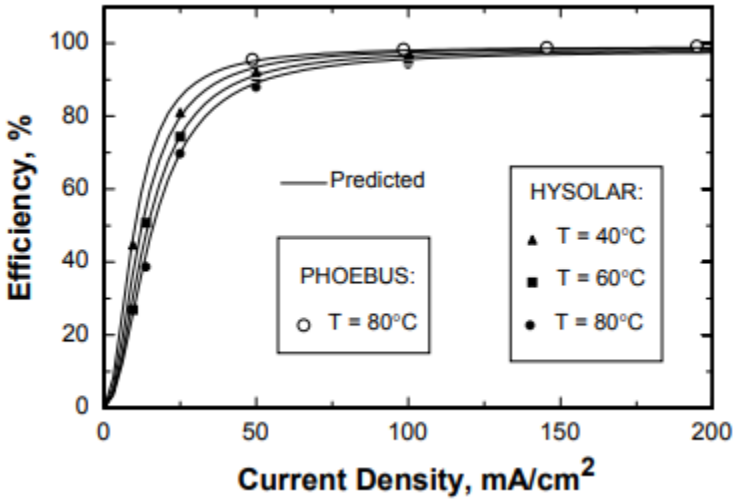


Gráfico 3: Eficiencia de Faraday obtenida experimentalmente.

2.3.4.2 Rendimiento del electrolizador

La energía teórica necesaria para realizar la electrólisis del agua y generar 1 Nm^3 de hidrógeno es de 3,54 kWh/Nm^3, la eficiencia de los generadores de hidrógeno ronda entre los 64 y 82% dependiendo del tamaño del electrolizador [15]. La ecuación 12 determina la eficiencia de generación del electrolizador, está representada por la razón entre la energía teórica y la energía requerida para generar 1 Nm^3, este ultimo parámetro se determina mediante la razón entre la potencia requerida para generar cierto volumen de hidrógeno y el volumen de hidrógeno generado, en una hora de funcionamiento (Ecuación 13).

$$\eta_{elec} = \frac{E_{teorica}}{E_{requerida}} * 100\% \tag{12}$$

$$E_{electrolizador} = \frac{Potencia\ (para\ generar\ 1Nm^3/h)}{Generación\ (1Nm^3)} \tag{13}$$

2.4 Diseño mecánico

Según las características de funcionamientos obtenidas en la sección anterior, se establecen las dimensiones y capacidades de la estructura, en ella se debe incluir el sistema electrolizador y almacenamiento, los cuales deben posicionarse en una estructura se soporte que, además, debe contener todos los demás sistemas, como fuente de alimentación, control de generación de gases, control del sistema eléctrico y salidas de trabajo.

2.4.1 Componentes estructurales

2.4.1.1 Estructura

La estructura metálica que contiene al sistema electrolizador y demás componentes se fabrica con perfil tubular cuadrado de acero estructural de dimensiones 40x40x2 mm. El esqueleto estructural soldado (Figura 22) posee separaciones para soportar el sistema electrolizador aislado del sistema de control electrónico y sistema de control manual. Permite el acceso a los componentes internos mediante 5 de sus 6 caras (frontal, trasera, izquierda derecha y superior), la tapa superior posee inclinación hacia la cara frontal para evitar el ingreso de líquidos derramados en la superficie superior.

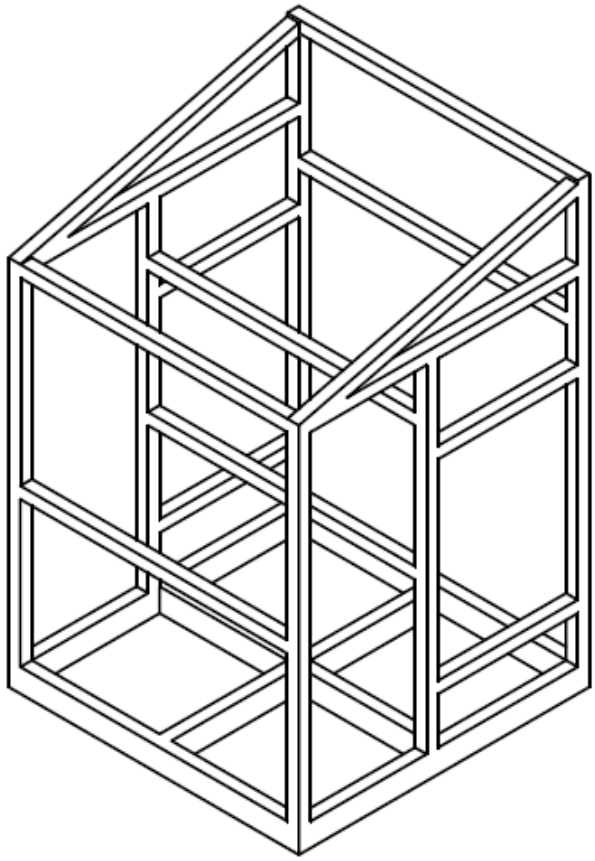


Figura 22: Estructura metálica soldada con perfil 40x40x2 mm.

2.4.1.2 Tapas metálicas

Para cerrar la estructura metálica, se utilizan tapas de acero galvanizado, fabricadas con planchas de 1,5 mm de espesor, cortadas mediante esmeril angular con disco de corte para acero inoxidable de 4” (Figura 23). Para sujetarlas a la estructura de acero, se perforan con taladro y broca de 10 mm. La tapas laterales y superior se sujetan con pernos tipo parcker 5/16” x 3” con golilla plana y golilla presión, la tuerca va por dentro de la estructura. Con el fin de tener un mejor acceso al interior de la estructura, para funciones de inspección y/o mantenimiento, las tuercas de la tapa frontal y trasera son soldados al interior de la estructura, lo que permite cerrar por completo el equipo desde fuera. La placa para el tablero eléctrico va de forma vertical en el centro de la estructura, con vista desde la parte trasera, separa la sección de generación y acumulación con la sección eléctrica.

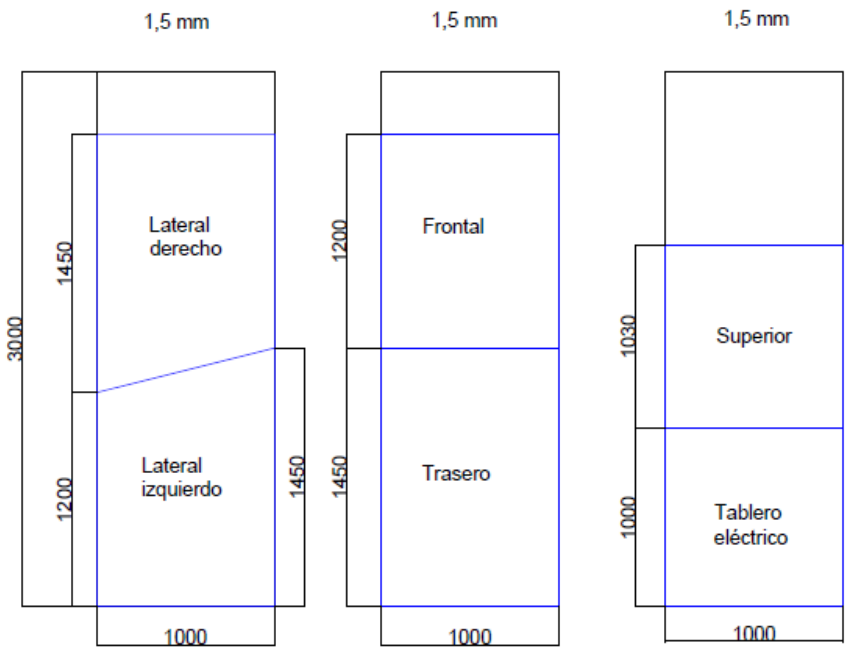


Figura 23: Dimensiones de tapas metálicas fabricadas con planchas de acero galvanizado de 1,5 mm.

2.4.1.3 Base inferior, base control y base estanques

Para sostener los componentes internos del electrolizador, se instala una base de acero galvanizado de 2,5 mm de espesor en la parte inferior de la estructura para sostener la celda electrolítica y la fuente de poder, de la misma forma se instala una base media para sostener los estanques de acumulación de hidrógeno y oxígeno, y una base superior para el sistema de control y seguridad (Figura 24). La base superior cuenta con inclinación hacia el frontal para evitar que cualquier fuga en el sistema de control alcance el área eléctrica y electrónica de la parte posterior.

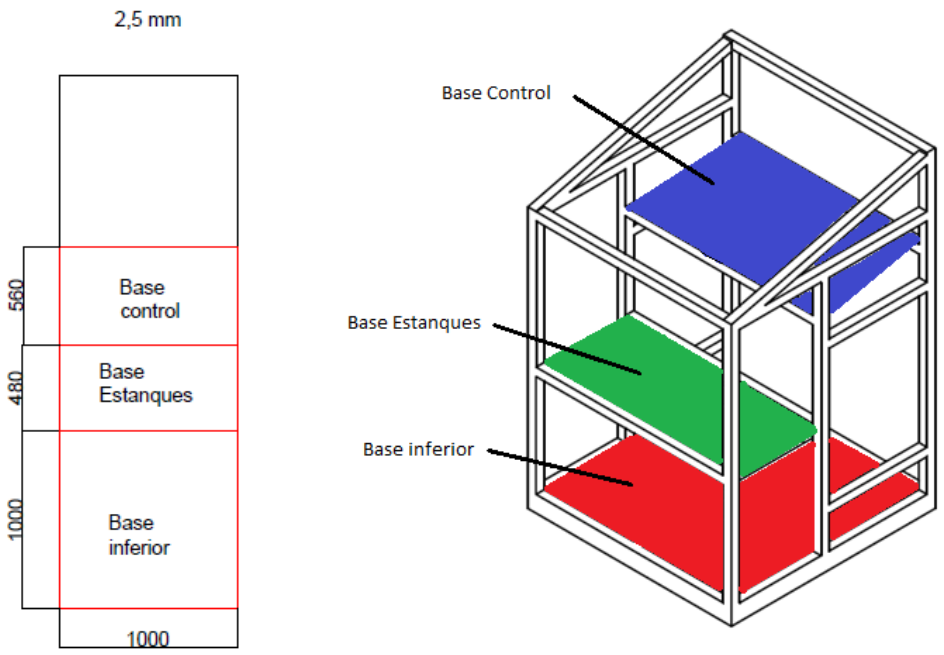


Figura 24: Dimensiones de bases internas metálicas fabricadas con planchas de acero galvanizado de 2,5 mm y su posición en la estructura.

2.4.1.4 Ruedas

Para el desplazamiento del equipo se utilizan cuatro ruedas de carro horquilla de 200 mm con freno, soporta 200 kg cada una (Figura 25), apernadas a la base inferior de la estructura. El tamaño y material de las ruedas permite el libre desplazamiento por superficies lisas y horizontales, incluso en superficies más rugosas, sobresaltos y con pendiente.

Figura 25: Ruedas de carro horquilla de 200 mm con freno.

2.4.2 Componentes fase de generación

2.4.2.1 Celda

La celda de electrólisis es construida mediante el apilamiento de los componentes y cerrado con dos tapas en los extremos, para mantener todos los elementos en su lugar, las tapas son comprimidas con pernos por el rededor de las cámaras de generación. La celda consta de 7 placas de generación, cada una realiza la generación de hidrógeno y oxígeno por cada lado, obteniéndose un total de 14 cámaras de generación, cada cámara tiene un ingreso de electrolito por la parte inferior y una salida de gas por la parte superior, las 7 cámaras de hidrógeno están interconectadas entre sí, separadas de las 7 cámaras de oxígeno también interconectadas entre sí, la alimentación de electrolito también está separada para cada conjunto de cámara.

Los materiales y su función en la celda son los siguientes:

2.4.2.2 Marcos de acrílico

Marcos de acrílico transparente de 15 mm de espesor dimensionadas mediante corte láser, con perforaciones de 8 mm mediante mecanizado en dos de los ductos de transferencia de gases y electrolito (Figura 26). Su principal función es generar el espacio donde se generan los gases, manteniendo una distancia fija de separación entre placas.

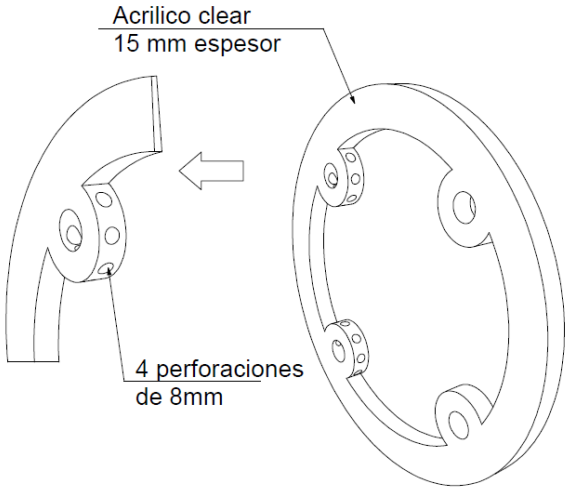


Figura 26: Marcos de acrílico transparente con perforaciones.

2.4.2.3 Membrana separadora

Tradicionalmente, las membranas de asbestos han sido el tipo de separador más utilizado en este tipo de tecnología, sin embargo, la peligrosidad y toxicidad para la salud de este material cancerígeno han limitado su uso hasta prácticamente eliminarlo [14]. Por ello, en las últimas dos décadas, gran parte de los esfuerzos realizados para mejorar la electrólisis alcalina, han estado centrados en el desarrollo de membranas de intercambio aniónico que idealmente, presenten buenas propiedades químicas y mecánicas en medio extremadamente alcalino, elevada porosidad y pequeño tamaño de poro, buena humectabilidad permitiendo así el transporte de aniones entre los electrodos y baja permeabilidad gaseosa, para evitar la mezcla de H2 y O2 durante el proceso de electrólisis [15].

Entre las diferentes membranas que se han sintetizado y explorado en los últimos años el Zirfón® es una de las que mejor estabilidad química, térmica y mecánica presenta en presencia de KOH y por lo que ha sido el material elegido para utilizar como separador en el electrolizador.

ZIRFON PERL UTP 500 de AGFA, es membrana separadora para electrólisis alcalina del agua. Esta membrana hidrofílica es considerada como un reemplazo de materiales como asbesto cristalino y tela PPS (Sulfuro de polifenileno), funcionamiento estable para distintas soluciones de KOH hasta 110°C, resistencia a presiones de hasta 200 bar, densidad 1 +- 0,2 g/cm2 [16].

2.4.2.4 Electrodos

Placas de acero inoxidable 316L de 2 mm de espesor, arenadas para aumentar el área de contacto con el electrolito y niqueladas para mejorar la resistencia a la corrosión (Figura 27), en total se utilizan 7 placas, 2 de ellas son polarizadas mediante una fuente de poder y las otras 5 son neutras, montadas entre las 2 polarizadas (Figura 28). Todas las placas poseen 4 agujeros de canalización para el electrolito y los gases, las placas polarizadas poseen un agujero extra para acoplar el electrodo de la fuente de poder.

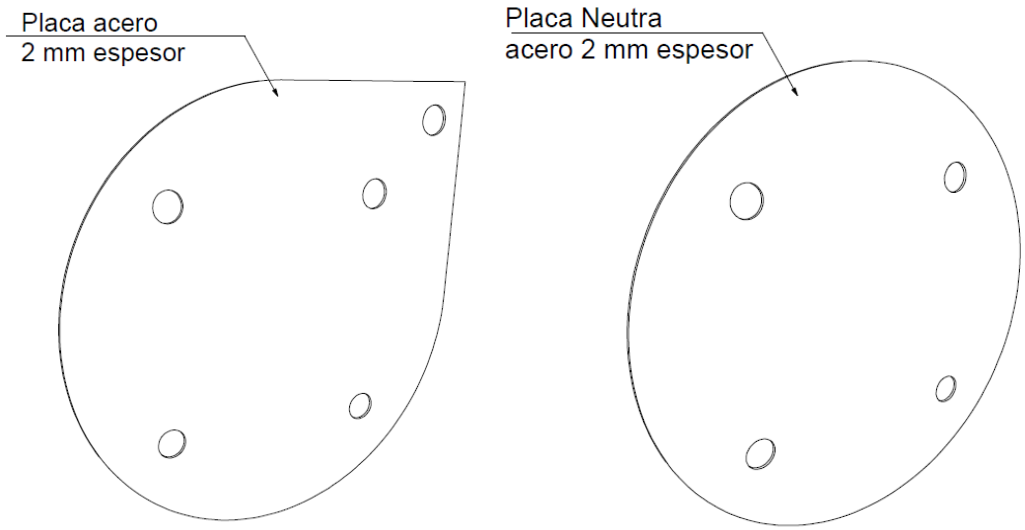


Figura 27: Placas de acero inoxidable 316L de 2 mm de espesor, arenadas y niqueladas.

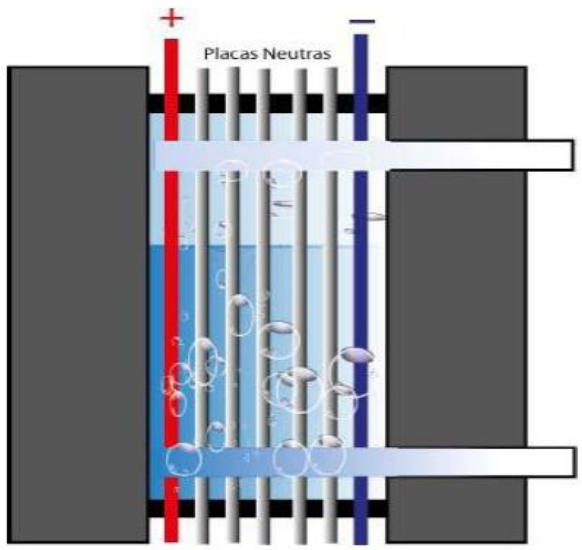


Figura 28: Disposición de placas en electrolizador.

2.4.2.5 Juntas

Caucho de polietileno clorosulfonado color negro, de alta calidad con una excelente resistencia al ozono, a la oxidación, a la luz solar y a la intemperie. temperatura de servicio entre -35 y 125°C, resistencia a ácidos y álcalis concentrados y diluidos, hidrocarburos, aceites, grasas y solventes orgánicos.

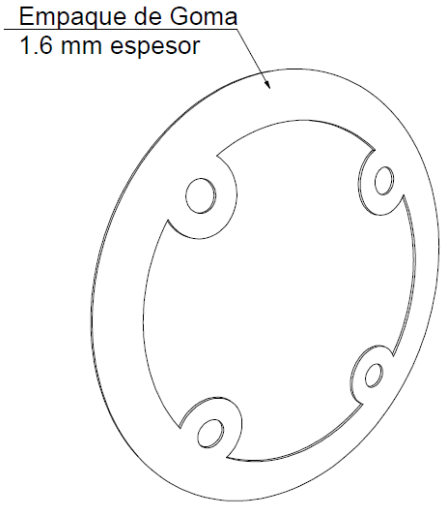


Figura 29: Caucho de polietileno clorosulfonado color negro para sellar el conjunto.

2.4.2.6 Tapas exteriores

Placas de acero inoxidable 316L de 400 x 400 x 15 mm, su función es sujetar el conjunto. La tapa frontal posee 4 aberturas con coplas 1/2" NPT soldada, las 2 inferiores para el ingreso de electrolito y las 2 superiores para la salida de hidrógeno y oxígeno (Figura 30).

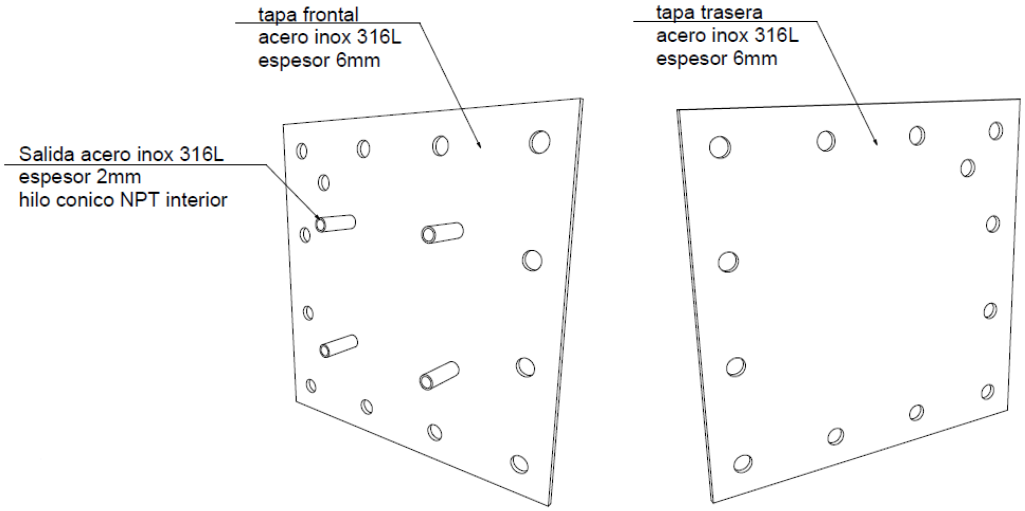


Figura 30: Tapas de acero inoxidable 316L de 15 mm de espesor, tapa fontal a la izquierda y tapa trasera a la derecha.

2.4.2.7 Sujeción

Se utilizan 12 pernos, tuercas y golillas tamaño m16 x 330 mm de largo en acero inoxidable 304, que sujetan el conjunto entre ambas tapas exteriores.

2.4.2.8 Electrolito

El agua utilizada en el electrolizador debe tener características que le permitan disociar al recibir una descarga eléctrica pequeña. En función de esta situación, es que se debe determinar el electrolito que debe ser aplicado al agua, y la proporción en la cual debe encontrarse para permitir un funcionamiento óptimo del equipo.

La selección del compuesto para electrolito es el KOH, debido a que la reacción con el H2O es menor exotérmica que el NaOH, la solubilidad es menor, por lo que necesita menos compuesto para lograr la concentración deseada [11]. El empaque que contenga el hidróxido de potasio debe indicar de forma visible las siguientes señales de seguridad.

Figura 31: Señales de seguridad para el hidróxido de potasio.

La hoja de datos de seguridad del hidróxido de potasio se encuentra en la sección Anexo C.

2.4.3 Componentes fase de acumulación

La generación de hidrógeno y oxígeno producida por el sistema de electrólisis no es usada directamente, debido a que uno de los requerimientos del sistema es que el flujo de

hidrógeno se entregue a una presión de 3 bar, para lograr dicha presión se utilizan dos estanques acumuladores de base circular ubicados sobre la celda de electrólisis (Figura 32). Los estanques también tienen la función de suministrar el electrolito a las cámaras de generación de hidrógeno y oxígeno. Los principales requerimientos para el diseño de los estanques son:

- Presión máxima al interior 4 bar.
- Salida de electrolito por la base con llave de paso.
- Entrada de gas producido (hidrógeno u oxígeno) por la parte superior.
- Salida de gas acumulado (hidrógeno u oxígeno) por la parte superior con llave de paso.
- Nivel de electrolito visual por la parte frontal.
- Tapón para llenado en la parte superior.
- Tapón para revisión en la parte superior.
- Conexión para manómetro.

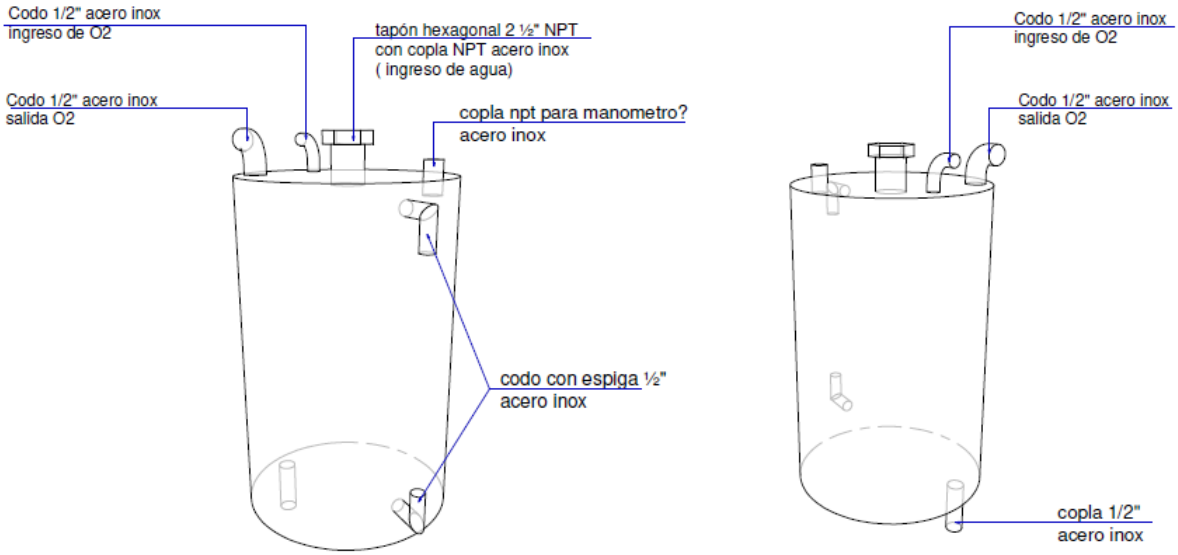


Figura 32: Estanques cilíndricos de acero inoxidable de 2 mm de espesor.

Los estanques de acumulación deben poseer señales de seguridad dependiendo del contenido, hidrógeno u oxígeno, las señales son las siguientes.

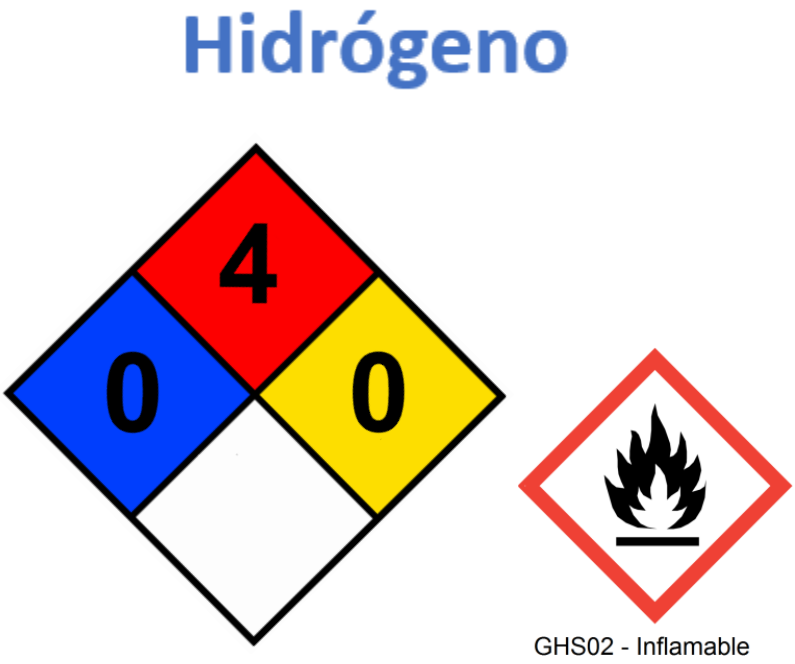


Figura 33: Señales de seguridad en estanque de acumulación de hidrógeno.

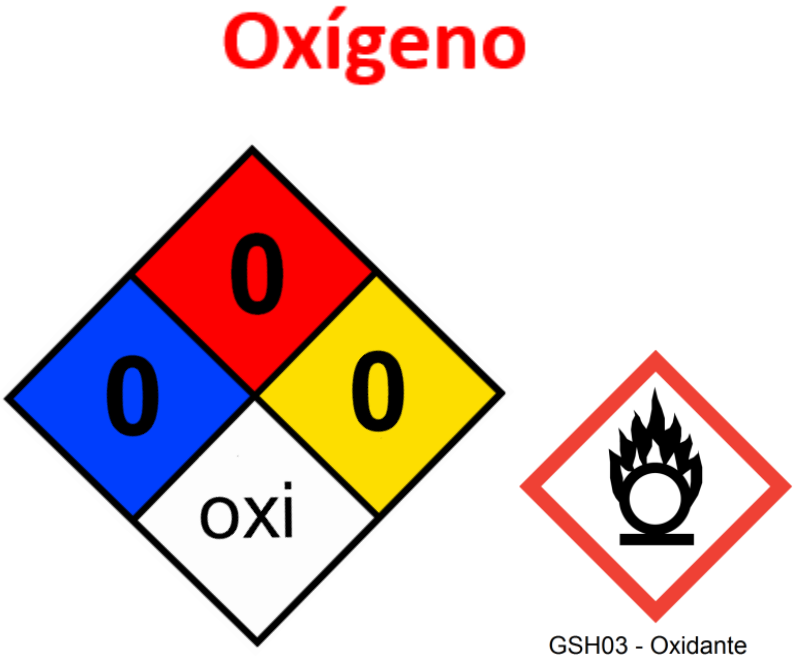


Figura 34: Señales de seguridad en estanque de acumulación de oxígeno.

2.4.4 Componentes fase de control

La conexión entre estanques, celda y demás componentes como válvulas y sensores se realiza mediante manguera de policloruro de vinilo (PVC) transparente de 1/2" con refuerzo de alambre de acero en espiral (Figura 35), temperatura de operación entre -10 y +60 °C, presión de operación hasta 8 bar [17].

Figura 35: Manguera de PVC transparente para conexión entre componentes.

2.4.4.1 Fase de control - Eléctrico y manual

Luego de la llave manual que se encuentra en la salida de gas acumulado de cada estanque, se encuentra el sistema de control tanto manual como eléctrico. Después del estanque de acumulación de hidrógeno se encuentra la línea de control de hidrógeno, y después del estanque de acumulación de oxígeno se encuentra la línea de control de oxígeno. Línea de control de hidrógeno: Esta línea de control está encargada de controlar el flujo de hidrógeno luego del estanque de acumulación, para ello se utilizan válvulas manuales, válvulas solenoides y motorizadas con rango de apertura entre 0 y 100%. La posición de dichas válvulas en la línea de control de hidrógeno se muestra en la Figura 36.

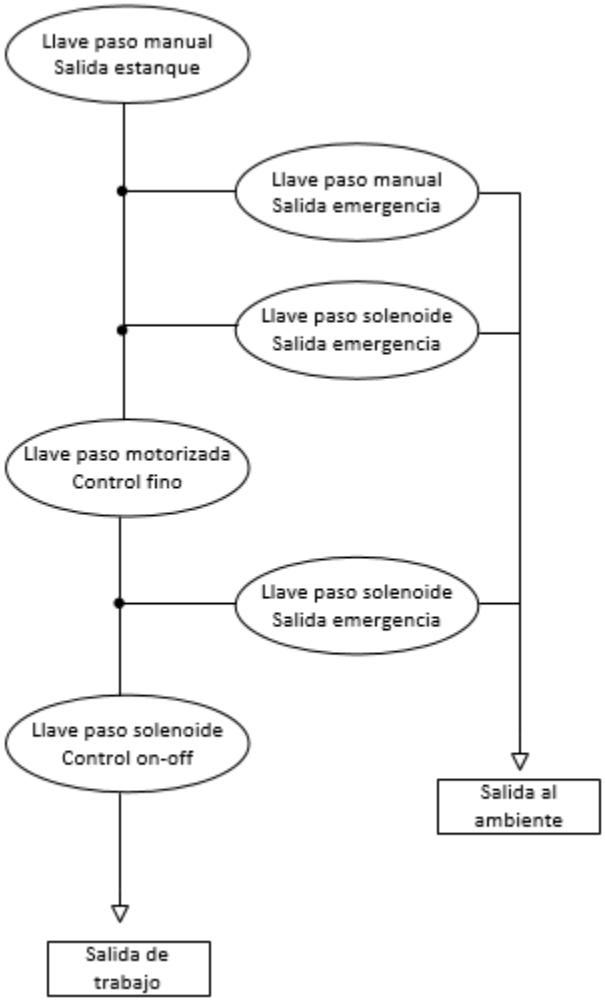


Figura 36: Posición de válvulas en línea de control de hidrógeno.

Tras la salida del estanque de acumulación de hidrógeno, se sitúa la primera válvula manual, que alimenta al sistema de control. La línea principal se separa en 3 vías, la primera posee solo una llave manual ubicada en el exterior del equipo, con la cual se podrá despresurizar el sistema de hidrógeno en caso de emergencia y mantenciones, la segunda posee un llave solenoide con salida al exterior, con la cual se puede despresurizar la línea pero es accionada por el controlador, la tercera vía integra una válvula motorizada, la cual regula el flujo de hidrógeno de la línea, esta vía tiene dos salidas accionadas con dos válvulas solenoides, el trabajo en conjunto de estas válvulas permite el flujo controlado del gas hacia el exterior o hacia la salida de trabajo.

Línea de control de oxígeno: Esta línea de control está encargada de controlar el flujo de oxígeno luego del estanque de acumulación, para ello se utilizan las mismas válvulas que en la línea de control de hidrógeno, pero solo existe la salida al ambiente, por lo que no es necesario la llave de paso solenoide hacia la salida de trabajo (Figura 37).

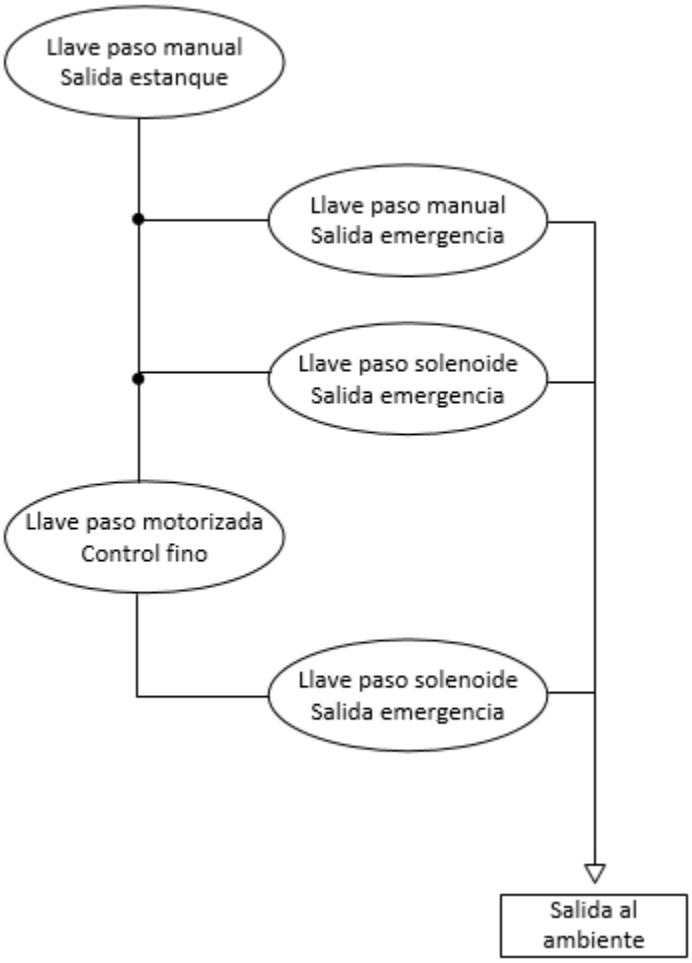


Figura 37: Posición de válvulas en línea de control de oxígeno.

El funcionamiento de la línea de oxígeno es muy similar a la línea de hidrógeno, la diferencia es que no posee salida de trabajo, por lo que utiliza una válvula solenoide menos y solo tiene salida al ambiente para regulación de presión y seguridad.

Por lo tanto, el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del sistema completo para generación y control de la electrólisis se presentan en la Figura 38, en el centro se puede apreciar los componentes principales para la generación y acumulación de hidrógeno y oxígeno, la celda de electrólisis denominada "Celda", el estanque de acumulación de hidrógeno denominado "H_2" y el estanque de acumulación de oxígeno denominado "O_2", conectados entre si para llenado de la celda con electrolito y salida de gases a estanques de acumulación.

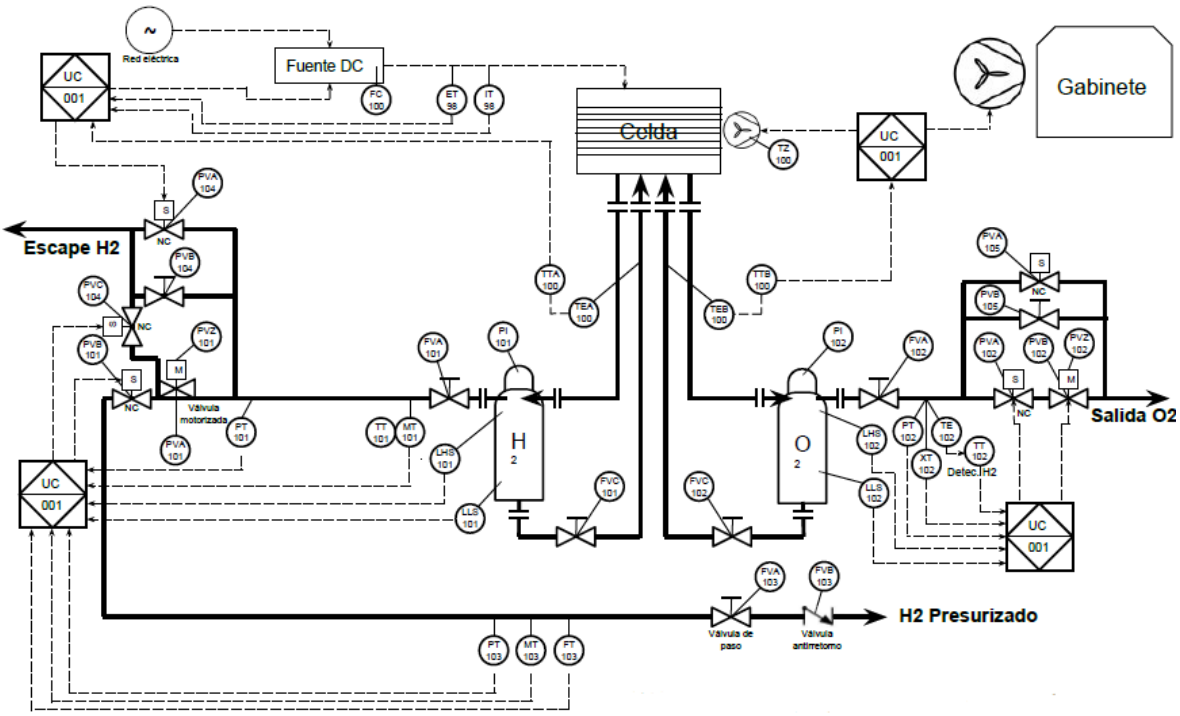


Figura 38: Diagrama de tuberías e instrumentación del sistema electrolizador (Línea contínua: Fluido / Línea segmentada: Señal).

Luego de los estanques de acumulación se tienen las líneas de control de hidrógeno y oxígeno, en ellas se indica la ubicación de válvulas y sensores para el control y funcionamiento del electrolizador. La nomenclatura indica la variable a medir o controlar, el instrumento utilizado, un enumerador en caso de elemento repetido y el lazo al que corresponde, todos ellos indicados en la Tabla 8.

Nomenclatura: X(M)Y(Z)001

- X: Variable de lazo

- M: Modificador (opcional)
- Y: Tipo de instrumento
- Z: Enumerador (opcional)
- 001: Número de lazo

Tabla 8: Nomenclatura de variables e instrumentos del diagrama P&ID.

Variables	Instrumentos	Modificador	Lazos
P: Presión	T: Transmisor	H: Alto	98: Fuente
T: Temperatura	V: Válvula	L: Bajo	99: Gabinete
F: Flujo	S: Switch		100: Celda
X: Presencia	C: Controlador		101: Estanque H_2
L: Nivel	Z: Elemento final de lazo		102: Estanque O_2
U: Multipropósito	I: Indicador		103: Salida sistema
E: Tensión			104: Escape H_2
I: Corriente			105: Escape O_2
M: Humedad			

El listado de componentes y su descripción se encuentra en la sección Anexo D. Los componentes por utilizar se describen a continuación.

2.4.4.2 Válvulas de control

Válvula de paso manual: Válvula de bola acero inoxidable 316L NPT 1/2" de 2 posiciones y 2 vías (Figura 39), su función es despresurizar las líneas de hidrógeno y oxígeno en caso de emergencia y mantenciones.

Figura 39: Válvula de bola acero inoxidable 316L NPT 1/2" de 2 posiciones y 2 vías.

Válvula de paso solenoide: Válvula solenoide, cuerpo de cobre, de uso general 2 vías 1/2" con bobina de 220 VAC 50/60Hz (Figura 40), presión mínima de operación 0,5 bar, presión máxima 16 bar, temperatura máxima 80°C.

Figura 40: Válvula solenoide de 2 vías con bobina a 220 V AC.

Válvula de paso motorizada: Esta llave consta de dos partes, una válvula de bola de latón, cobre y aluminio de 2 vías de 1/2", presión máxima 40 bar, y un actuador de 24 V, torque máximo 5 Nm con velocidad de apertura 25 segundos y de cierre 20 segundos (Figura 41).

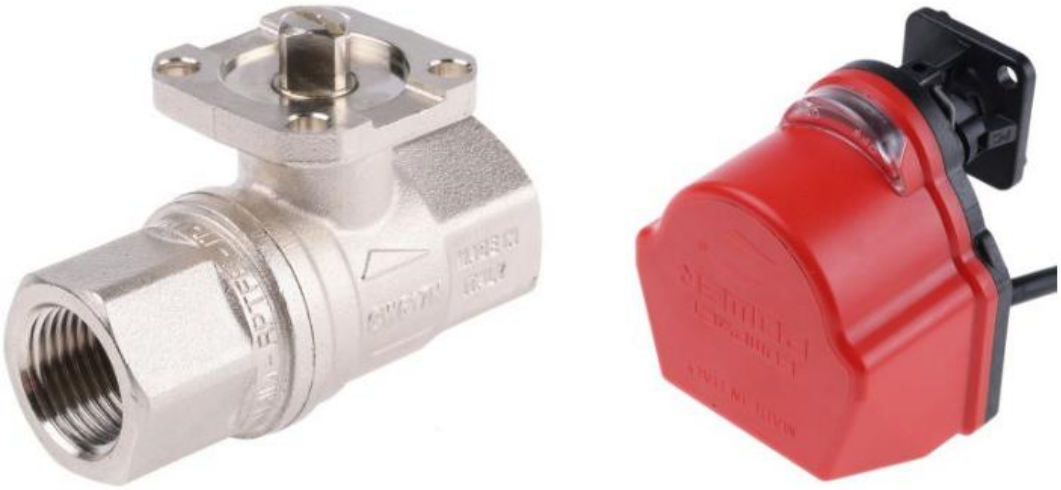


Figura 41: Válvula de bola de 2 vías 1/2"a la izquierda y actuador de 24 V DCa la derecha.

2.4.4.3 Alimentación eléctrica

La alimentación de la celda se realiza con una fuente de poder AC/DC variable marca Xingtongli, tensión de entrada monofásica 220 [V], salida de 0 a 48 V y de 0 a 100 A (Figura 42), para ajustar los parámetros de funcionamiento se toman en cuenta los resultados del análisis químico, el cual establece, según separación de placas, un voltaje de $18\,V$ y una corriente de $40\,A$. El ajuste de estos parámetros se puede realizar con un control remoto o con control externo.

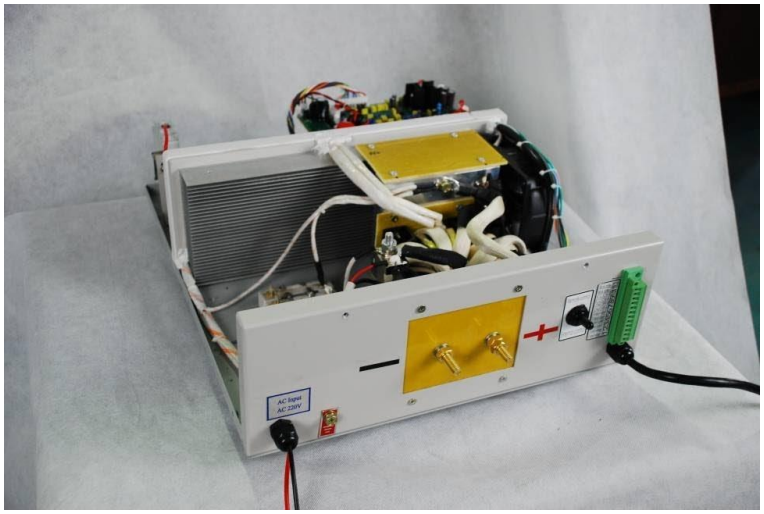


Figura 42: Fuente de poder AC/DC variable marca Xingtongli, tensión de entrada monofásica 220 [V], salida de 0 a 48 V y de 0 a 100 A.

Esta fuente debe indicar su peligrosidad de alto voltaje con las siguientes señales, dispuestas de forma visible y cercana a los bornes.

Figura 43: Señales de peligrosidad en fuente de poder.

2.4.4.4 Sensores

Para realizar el control de la producción de hidrógeno y oxígeno, se requieren una serie de sensores, que entregan información instantánea de la operación del sistema de electrólisis, estos sensores son los siguientes:

- Sensor de temperatura: Sensor de temperatura “RTD PT100 Thin Film Clase A” de acero inoxidable SS 304 con rosca NPT de 1/2", temperatura de operación entre -50 a +350°C (Figura 44 (a)). La función del sensor es medir la temperatura del electrolito y de los gases de salida mediante el control de refrigeración.
- Sensor de presión: Sensor de presión para agua, gas o aceite, rango de presión entre 0 a 1,2 MPa, entrega señal análoga de voltaje entre 0,5 a 4,5 V, rango de temperatura entre 0 a 85°C (Figura 44 (b)). Su función es medir la presión en las líneas de control de hidrógeno y oxígeno, para funcionamiento de actuadores mecánicos.
- Sensor de humedad y temperatura: Sensor de humedad y temperatura SHT10, con base de metal y malla metálica para aumentar la resistencia a la temperatura, presión y desgaste mecánico. Rango de medición de 0 a 100±5.0% RH , de -10 a 80±0.5 °C (Figura 44 (c)). Su función es medir la humedad relativa de la línea de hidrógeno, para verificar la calidad del gas de trabajo producido.

- Sensor presencia de hidrógeno: Sensor de gas TGS6812-D00 de detección de hidrógeno y metano, temperatura de funcionamiento entre -10 a 70 °C (Figura 44 (b)). Su funcionamiento es detectar fugas de hidrógeno en la línea de oxígeno, para evitar flujos cruzados.

(a)	(b)	(c)	(d)

Figura 44: Sensores utilizados en líneas de control: (a) Sensor de temperatura, (b) Sensor de presión, (c) Sensor de humedad y temperatura, (d) Sensor de presencia de hidrógeno.

2.4.4.5 Extras

- Flujómetro de Hidrógeno

La medición del flujo de hidrógeno se realiza mediante la inclusión de un medidor de flujo marca Mass-View ®, este dispositivo muestra el flujo instantáneo y acumulado de hidrógeno en una pantalla LCD integrada (Figura 45), pudiendo modificar la unidad de medida dependiendo de los requerimientos [27].

Figura 45: Flujómetro de hidrógeno Mass-View ®.

- Ventiladores

Se utilizan 2 ventiladores marca Jason con filtro, estos ventiladores están posicionados en las tapas laterales de la estructura del equipo (Figura 46), cuya función es liberar el calor producido en la generación. Uno de los ventiladores se encuentra en la tapa derecha a la altura de la celda de electrólisis ingresando aire fresco al sistema, el segundo se encuentra en la tapa izquierda a la altura de los estanques de acumulación, extrayendo el calor generado en el interior.

Figura 46: Ventiladores ubicados en las tapas laterales del equipo.

- Display y controles

El equipo puede ser controlado mediante un controlador Arduino, montado en la parte trasera, cerca de la fuente de poder, este controlador recibe la señal de los sensores y controla la fuente de poder para asegurar una generación estable. El controlador muestra los parámetros de funcionamiento en una pantalla ubicada al costado izquierdo del equipo, junto a ella 6 botones y un accionador, 5 de los botones funcionan como navegador, un botón de emergencia detiene la generación apagando la fuente de poder y el accionador permite la alimentación a la fuente de poder (Figura 47).

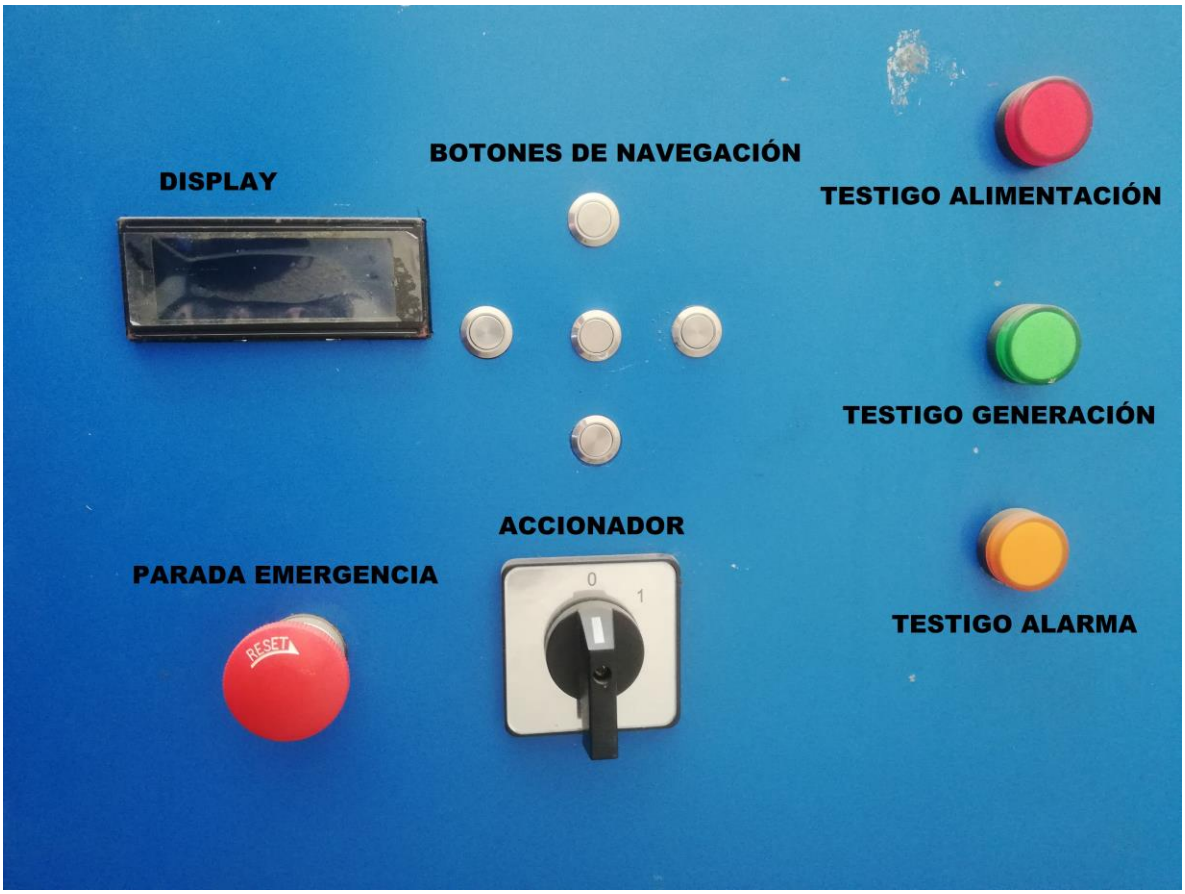


Figura 47: Display y controles del equipo.

2.4.5 Esfuerzos mecánicos en sistema electrolizador

2.4.5.1 Pernos

La compresión del conjunto que compone el electrolizador se realiza con pernos de acero galvanizado m16 x 330 mm. Los 8 pernos principales en tracción contienen todo el conjunto (Figura 48)

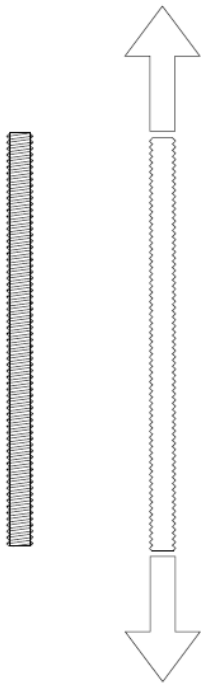


Figura 48: Diagrama de cuerpo libre de pernos, con cargas.

La relación entre el par de torción con la tensión del perno se puede expresar en la Ecuación 14 [26].

$$T_{último} = KF_i d \tag{14}$$

En donde:

- $T_{último}$ es el par de torción límite en Nm
- K es el factor de par de torción
- F_i es la precarga del perno en N
- d el diámetro del perno en m

El factor de par de torción se puede extraer de la tabla en la sección Anexo E.

Para determinar la precarga del perno, es necesario conocer la fuerza de fluencia, para ello se utiliza la siguiente ecuación.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_t} \rightarrow F_i = \sigma_i * A_t \tag{15}$$

En donde

- σ_i es el esfuerzo de fluencia en Pa

- A_t es el área de esfuerzo de tensión en m^2

El esfuerzo de fluencia para el acero inoxidable es de 460 Mpa, el área de esfuerzo de tensión para el perno métrico m16 es de 146,552 mm^2, equivalente a $1{,}47 * 10^{-4}\ m^2$. Por lo tanto, la fuerza de fluencia F_i se calcula como.

$$F_i = \sigma_i * A_t = 460 * 10^6 * 1{,}47 * 10^{-4} = 67.413\ N \qquad (16)$$

Equivalente a 6.872 kgf.

Considerando el factor de par de torsión K como acero galvanizado con un valor de 0,20 y el diámetro de la rosca 0,016 m, se calcula el par de torsión máximo como.

$$T = KF_i d = 0{,}2 * 67.413 * 0{,}016 = 215{,}7\ Nm \qquad (17)$$

Por lo tanto, el aprete de los pernos de la celda no sebe superar este límite.

2.4.5.2 Tapas

Las tapas que sujetan al resto de componentes están sometidas a esfuerzos por flexión, según fuerzas mostradas el diagrama de cuerpo libre presentado en la Figura 49, se muestran las cargas realizadas por los pernos, en tracción, y las reacciones de las cámaras de acrílico, en compresión.

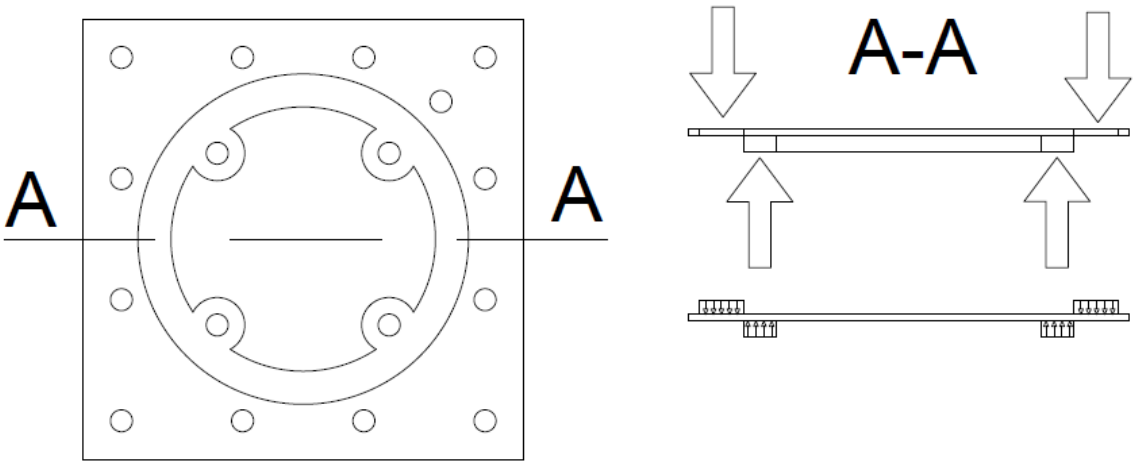


Figura 49: Diagrama cuerpo libre de tapas, con cargas.

El material con el cual será construido es acero inoxidable 316L, esta aleación es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Se le añade

molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión especialmente en entornos que contienen cloruros. El bajo contenido en carbono de la aleación 316L otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas. Sus principales propiedades son las siguientes:

Tabla 9: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acero 316L.

Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm3)	7,96
Punto de fusión (°C)	1370 – 1400
Propiedades Mecánicas	
Dureza Brinell	160 – 190
Módulo de Elasticidad (GPa)	190 – 210
Resistencia a la Tracción (MPa)	460 – 860
Módulo de Elasticidad transversal (GPa)	80
Propiedades Térmicas	
Calor Específico a 23°C (J/kg K)	502
Conductividad Térmica (W/m K)	16,3

Aplicando en las tapas la fuerza máxima que resiste cada perno, equivalente a $67413\ N$, en el diagrama de cuerpo libre presentado en la Figura 49, se calcula el esfuerzo por flexión de la tapa, el cálculo de diagrama fuerza cortante y diagrama momento flector se encuentran en la sección Anexo F.

Utilizando el valor máximo del diagrama fuerza cortante se obtienen $6872\ kgf$ en la parte externa de las cámaras de generación. El diagrama momento flector indica un valor máximo de $24{,}5\ Nm$.

El esfuerzo de flexión de la tapa de acero inoxidable se calcula con la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \tag{18}$$

Donde:

- M es el momento flector máximo
- c es la distancia máxima desde el eje neutro

- I es el momento de inercia

Por lo tanto, el esfuerzo al que están sometidos las tapas con la fuerza que ejercen los pernos se calcula como.

$$\sigma_{admisible} = \frac{24{,}5 * 0.006}{7{,}2 * 10^{-9}} = 20{,}42\ MPa \tag{19}$$

Por lo tanto, el factor de seguridad de las tapas es.

$$FS = \frac{\sigma_{último}}{\sigma_{admisible}} = \frac{460}{20{,}42} = 22{,}5\ [-] \tag{20}$$

Dados los resultados obtenidos se genera el diseño de las tapas Frontal (Figura 50) y Trasera (Figura 51).

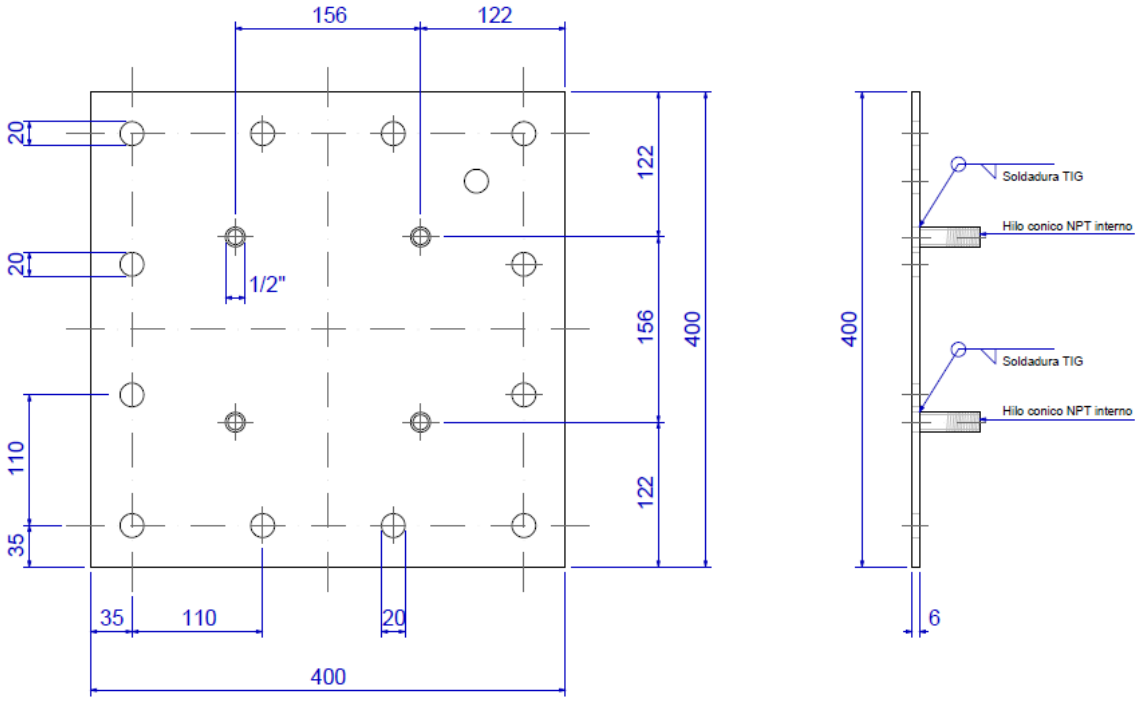


Figura 50: Diseño de tapa frontal del electrolizador, unidades en mm.

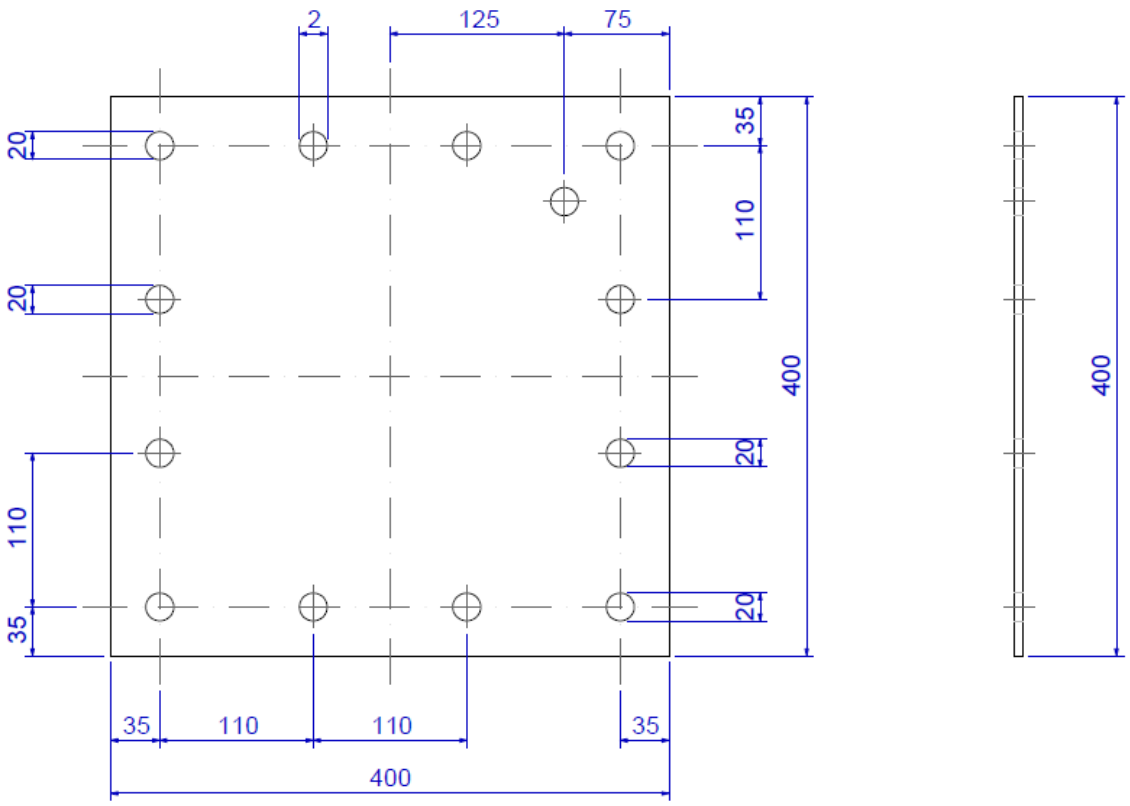


Figura 51: Diseño de tapa trasera del electrolizador, unidades en mm.

2.4.5.3 Acrílico

La carga en las cámaras de generación fabricadas de acrílico se presenta en el diagrama de cuerpo libre, el cual se presenta con fuerzas en compresión (Figura 52), además se presenta el área del acrílico en compresión (Figura 53).

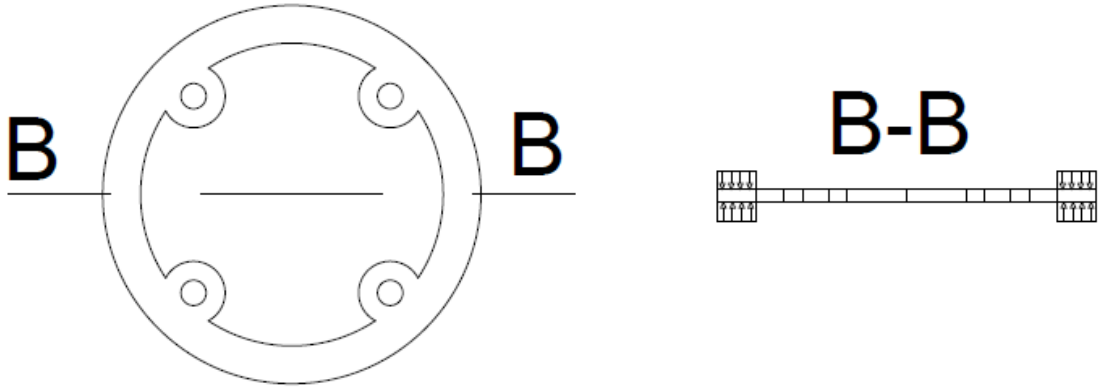


Figura 52: Diagrama cuerpo libre de cámaras de generación de acrílico, con cargas.

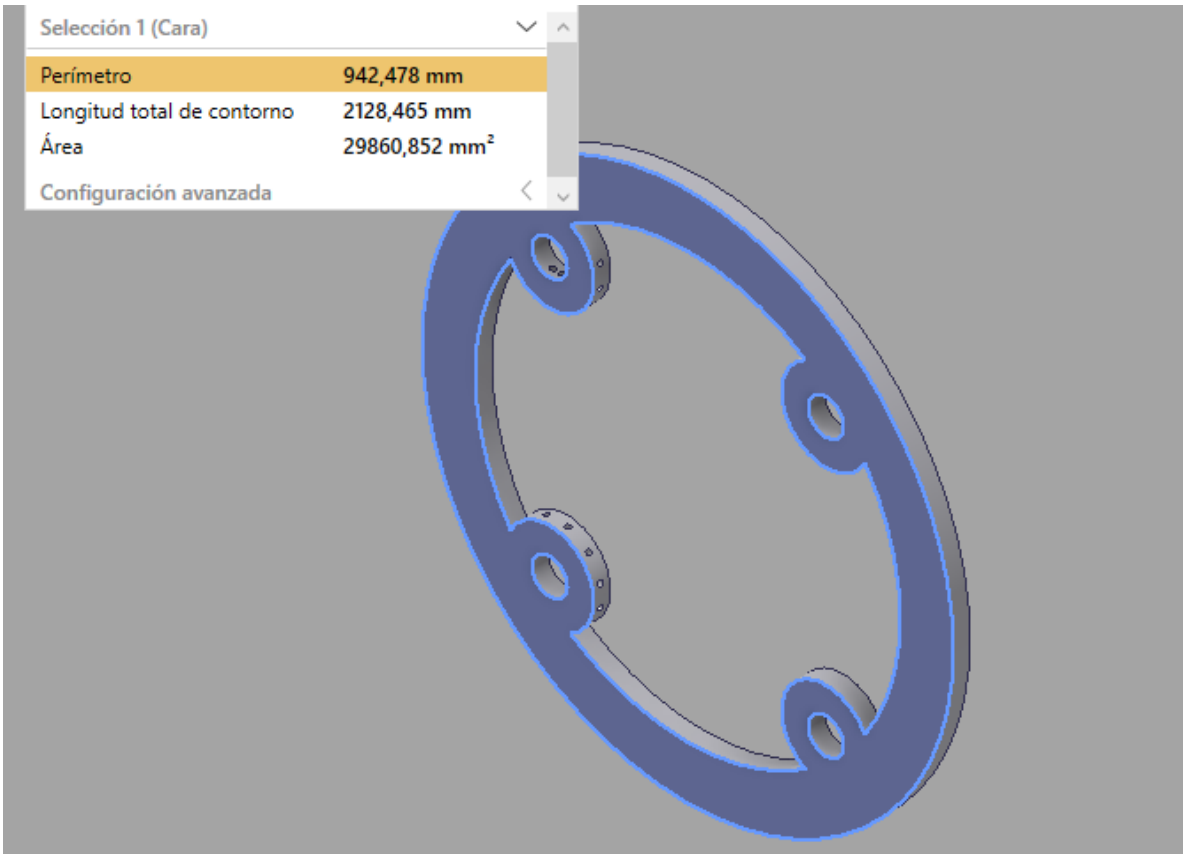


Figura 53: Área en compresión de la cámara de generación de acrílico, correspondiente a $0,029860\ m^2$.

Las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acrílico utilizado se muestran a continuación

Tabla 10: Propiedades físicas, mecánicas y térmicas del acríico.

Propiedades Físicas	
Densidad (g/cm3)	1,19
Propiedades Mecánicas	
Dureza Rockwell	M100
Módulo de Elasticidad (GPa)	2,94 – 3,14
Resistencia a la Compresión (MPa)	100
Propiedades Térmicas	
Calor Específico a 23°C (J/kg K)	1465

El esfuerzo de compresión del acrílico nos entrega la carga máxima total que puede resistir la cámara de generación antes de una rotura. Para ello se relaciona el esfuerzo de compresión con el área de compresión en la siguiente expresión.

$$F = \sigma_{comp} * A_s = 100 * 10^6 * 0{,}029860 = 2986000\ N \qquad (21)$$

Por lo tanto, las cámaras de acrílico pueden soportar una carga equivalente a $373250\ N$ de cada uno de los 8 perno que sostienen el conjunto.

El diseño de las cámaras de generación fabricadas con acrílico se muestra en la Figura 54.

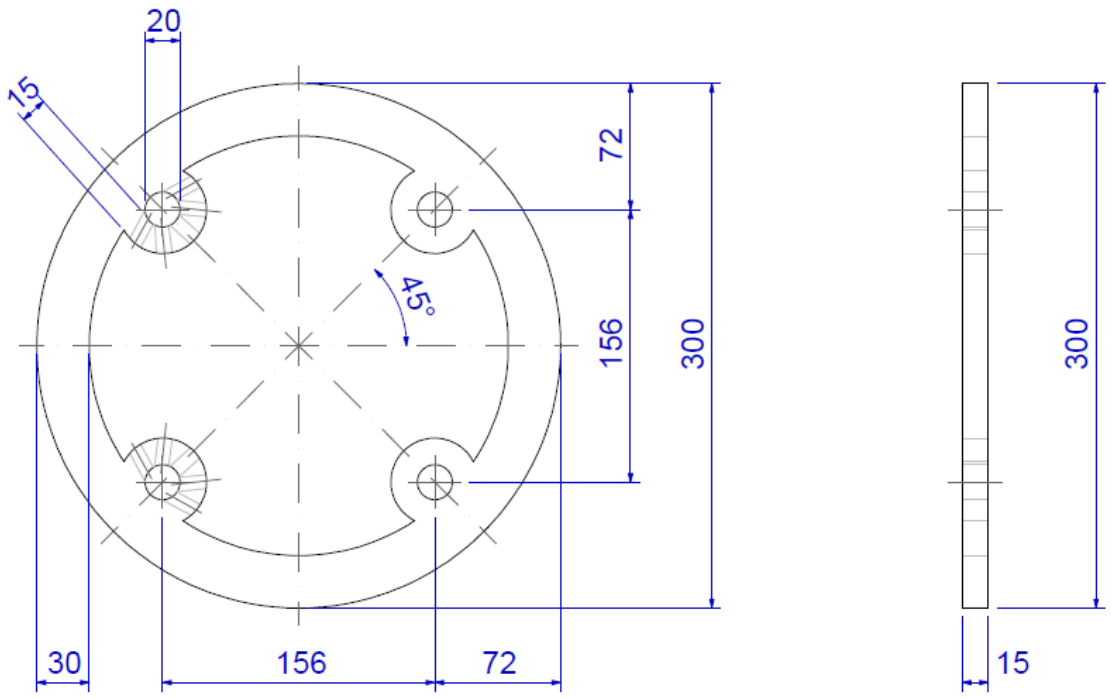


Figura 54: Diseño de cámaras de generación de acrílico, dimensiones en mm, 10 perforaciones en dos de los conductos con 8 mm de diámetro.

2.4.5.4 Placas

Al igual que las cámaras de generación de acrílico, las placas polarizadas y neutras están sometidas a fuerzas en compresión, como se muestra en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 55.

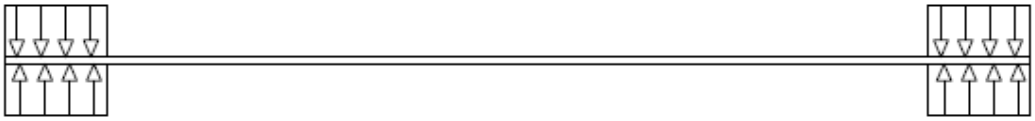


Figura 55: Diagrama cuerpo libre en placas de acero.

Se relaciona el esfuerzo en compresión del acero con el área de compresión, idéntica al área utilizada para los cálculos de esfuerzo en las cámaras de acrílico.

$$F = \sigma_{comp} * A_s = 460 * 10^6 * 0{,}029860 = 13735{,}6\ kN \qquad (22)$$

Las placas pueden soportar una carga equivalente a $1716950\ N$ de cada uno de los 8 perno que sostienen el conjunto. Por lo tanto, las dimensiones con las cuales se fabrican las placas polarizadas (Figura 56) y neutras (Figura 57) se presentan a continuación.

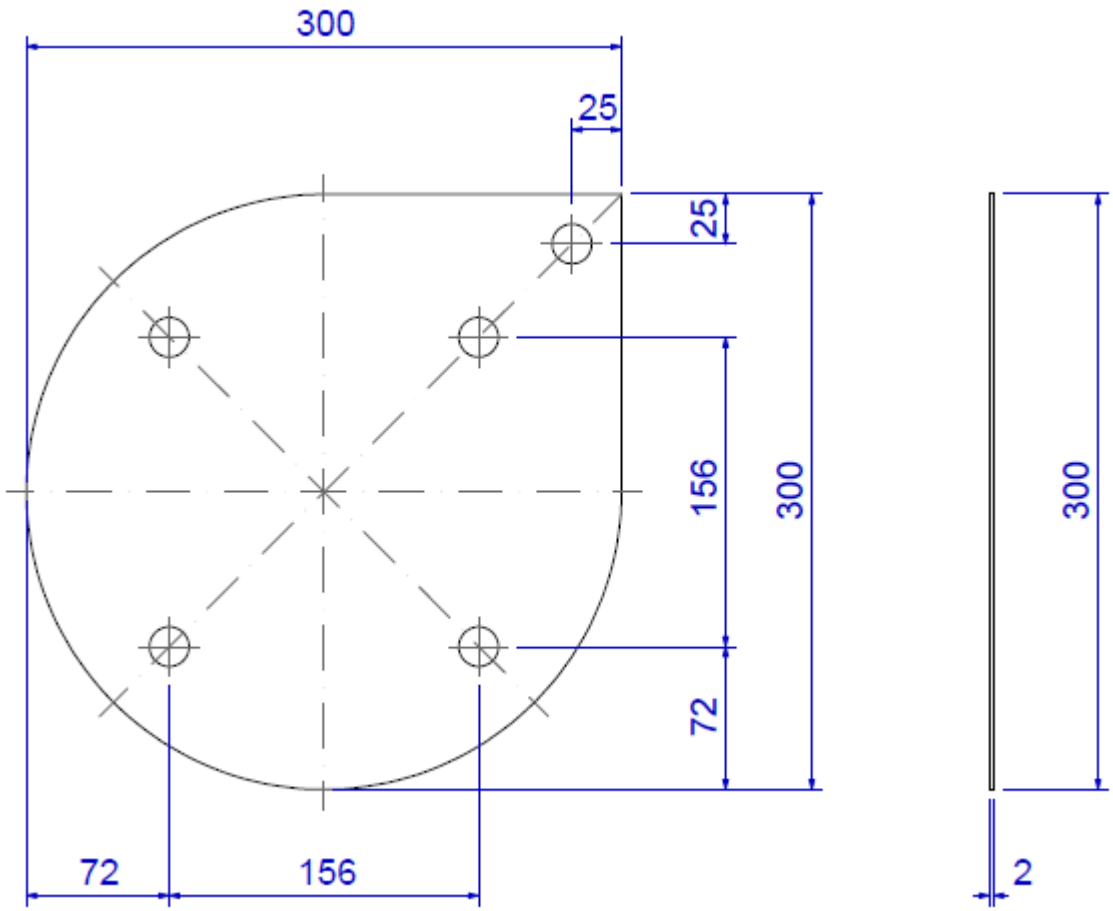


Figura 56: Diseño de placa polarizada del electrolizador, unidades en mm.

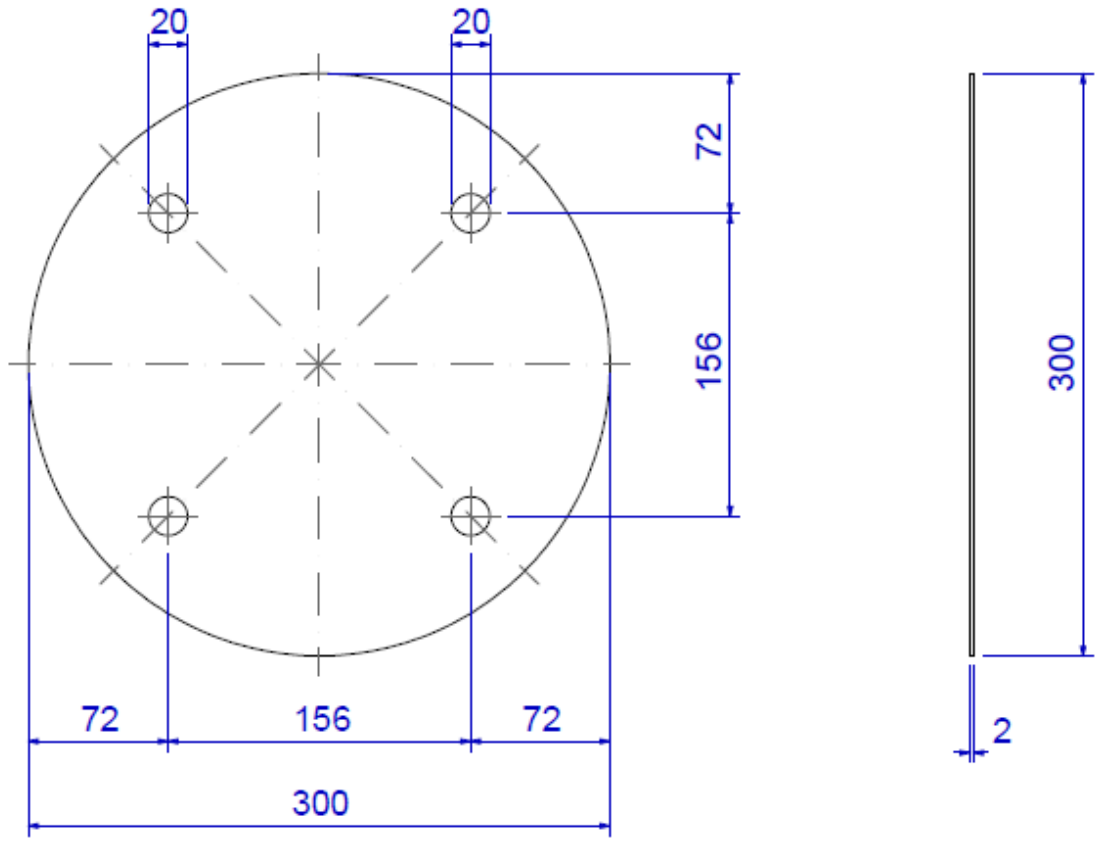


Figura 57: Diseño de placa neutra del electrolizador, unidades en mm.

Finalmente, Se decide trabajar con un Factor de Seguridad igual a 2 según los pernos que sujetan el conjunto, por lo tanto, el torque de aprete de la celda de electrólisis es.

$$T_{final} = \frac{T_{último}}{FS} = \frac{215\ Nm}{2} = 107{,}5\ Nm \qquad (23)$$

2.4.5.5 Estanques

Los estanques de acumulación de oxígeno e hidrogeno, y almacenamiento de electrolito deben cumplir con las especificaciones entregadas en el punto 2.4.3, entre ellas se encuentra la presión máxima dentro de los estanques, para ello se analiza las capacidades del diseño preliminar para los estanques, cuyas principales características son:

- Material: acero inoxidable de 2 mm de espesor.
- Dimensiones: 200 mm de diámetro y 320 mm de alto.
- Volumen: 10,05 lts cada uno.

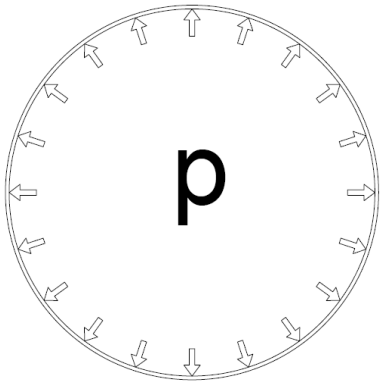


Figura 58: Diagrama cuerpo libre de interior estanques de acumulación, con carga distribuida según presión.

Un recipiente de pared delgada es considerado de esta forma cuando su espesor de pared es una vigésima parte o menos de su radio. Es este caso el radio es de $100\ mm$ y la pared de $2\ mm$, obteniéndose una relación de $1/25$, menor al especificado, por lo que sí es posible considerarlo como recipiente de pared delgada.

El esfuerzo tangencial máximo está determinado mediante la siguiente expresión:

$$(\sigma_t)_{máx} = \frac{p * (d_i + t)}{2t} \tag{24}$$

En donde:

- p es la presión interna
- d_i es el diámetro interior
- t es el espesor de pared

Reemplazando los valores se obtiene que la presión máxima soportada por las paredes de los estanques de acero inoxidable es:

$$p = \frac{2t * (\sigma_t)_{máx}}{d_i + t} = \frac{2 * 2 * 80}{196 + 2} = 16{,}16\ MPa \tag{25}$$

Luego se analiza el esfuerzo longitudinal promedio, calculado mediante la siguiente expresión.

$$\sigma_l = \frac{p * d_i}{4t} = \frac{16{,}16 * 196}{4 * 2} = 39{,}592\ MPa \tag{26}$$

2.5 Armado

El conjunto electrolizador está diseñado para ensamblarse capa por capa según una secuencia de armado fijado mediante pernos m16 x 33 cm, las entradas y salidas del electrolizador van conectadas mediante manguera a los estanques de acumulación, finalmente las placas positiva y negativa van conectadas a los bornes de la fuente de poder. A continuación, se presenta el armado de la celda de electrólisis, los estanques y el sistema de control.

2.5.1 Celda de electrólisis

La secuencia de armado de la celda de electrólisis requiere el empaque de goma entre cada elemento, para evitar fugas de electrolito y gases, dependiendo de la ubicación y forma del empaque, se tienen 3 modelos distintos mostrados a continuación.

Empaque A	Empaque B	Empaque C

Figura 59: Tipos de corte de empaques de goma para armado de la celda de electrolisis.

La disposición de armado de inicio a fin es la siguiente:

Tapa frontal – empaque A – acrílico – empaque B – placa positiva – empaque B – acrílico – empaque B - zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa neutra – empaque B – acrílico – empaque B – zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa neutra – empaque B – acrílico – empaque B – zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa neutra – empaque B – acrílico – empaque B – zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa neutra – empaque B – acrílico – empaque B – zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa neutra – empaque B – acrílico – empaque B – zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa negativa – empaque B – acrílico – empaque C – Tapa trasera.

Se deja como base la tapa frontal con las conexiones de entrada y salida hacia abajo (Figura 60 (a)), luego se instala el empaque A verificando la alineación de las 4 aberturas, con esto se evitarán fugas entre las cámaras de generación y la tapa frontal (Figura 60 (b)). Luego se instala la placa de acero positiva, de igual forma se debe alinear las 4 aberturas y la abertura para el perno del borne en la placa (Figura 60 (c)). La primera cámara de generación se crea al instalar un empaque B, seguido de un marco de acrílico con las aberturas hacia la derecha (Figura 60 (d)) y un segundo empaque B, esta cámara, al estar junto a la placa positiva, genera oxígeno. La separación de las cámaras se realiza con la membrana de intercambio aniónico Zirfón, de igual forma se instala alineando las aberturas (Figura 60 (e)). Para la cámara de hidrógeno, se instala un marco de acrílico entre dos empaques B, el marco de acrílico debe llevar las perforaciones al lado contrario que la de oxígeno, es decir, al lado izquierdo. Lo siguiente es instalar una placa neutra (Figura 60 (f)) y un empaque B, la placa se polariza al conectar la celda y funciona como cátodo en la cámara de hidrógeno y como ánodo en la cámara de oxígeno. La secuencia entre placas se repite 5 veces, para luego instalar la placa negativa con el borne hacia el lado izquierdo. Para finalizar se instala el empaque C y la tapa Trasera (Figura 60 (g)).

(a)	(b)	(c)
(d)	(e)	(f)

(g)		

Figura 60: Secuencia de armado de celda de electrólisis.

La celda se comprime mediante 8 espárragos, golillas y tuercas m16 de acero inoxidable en los agujeros A, para mantener las tapas completamente paralelas, se utilizan 4 espárragos en compresión en los agujeros B (Figura 61), los cuales se ajustan con golillas y tuercas en el interior.

Figura 61: Celda completa ajustada con pernos en posiciones A (tracción) y B (compresión).

El conjunto se comprime apretando las tuercas de los pernos A con un torque de 100 Nm, manteniendo ambas tapas paralelas entre sí, finalmente se verifica la alineación vertical de todos los componentes en el mismo sentido que los pernos.

2.5.2 Estanques

Los estanques son enviados a fabricar y soldar con placa de acero inoxidable de 2 mm. En las salidas delanteras para el nivel visual, se instalan espigas NPT de 1/2", las cuales se conectan con un trozo de manguera sujetas con abrazaderas de alta presión (Figura 62). En la salida inferior (salida de electrolito) se instala una unión americana NPT de 3/4", un bushing NPT de 3/4" a 1/2", una llave manual NPT de 1/2" y una espiga NPT de 1/2", en la entrada superior (entrada de hidrógeno u oxígeno al estanque) se instala una unión americana NPT de 1/2", un codo NPT de 1/2", y una espiga NPT de 1/2", En la salida superior (salida de hidrógeno de trabajo u oxígeno) se instala una unión americana NPT de 1/2", un codo NPT de 1/2", una llave de paso manual NPT de 1/2" y una espiga NPT de 1/2". La ventaja de este tipo de rosca NPT por sobre las BSP es el sello automático que se realiza al unir ambas roscas, sin necesidad de agregar algún sello como bandas de teflón.

Figura 62: Estanques instalados en el equipo.

2.5.3 Sistema de control

En primera instancia, se presentan los componentes según el orden mostrado en el diagrama P&ID en la bandeja a utilizar en la estructura (Figura 63), desde la salida de estanques hasta la salida de ambos gases en dos líneas, ambas son armadas con todos los componentes descritos en la sección 2.4.4.

Figura 63: Presentación de componentes de las líneas de control.

Las conexiones de los componentes son realizadas con espigas, TEEs, codos 90°, cruces 90° y niples, todos en acero inoxidable con rosca NPT se 1/2", unidos mediante manguera de pvc transparente de 1/2" con refuerzo de alambre de acero en espiral. El resultado del armado de las líneas de control y la ubicación en la estructura de soporte se muestra en la Figura 64.

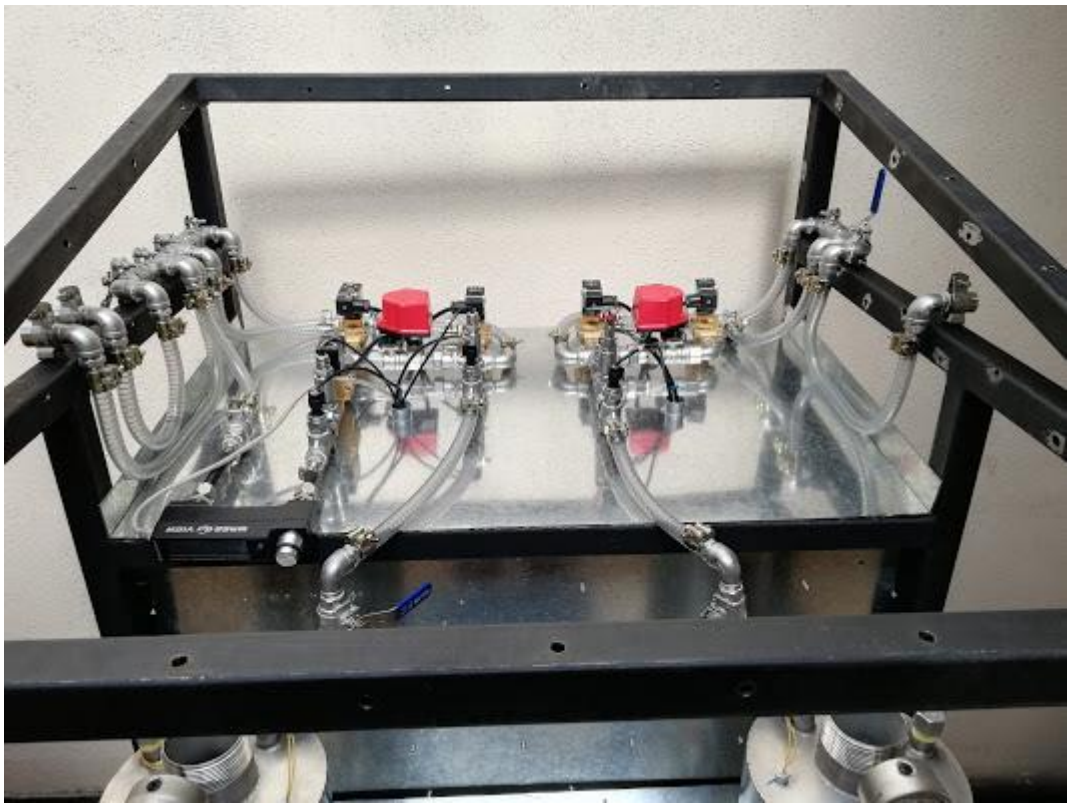


Figura 64: Vista de las líneas de control en la estructura.

3 Capítulo 3

3.1 Pruebas de funcionamiento

Se realizan pruebas de funcionamientos de los componentes más importantes del sistema electrolizador, con el fin de encontrar cualquier falla que no permita un buen funcionamiento y una generación de gases esperada.

3.1.1 Prueba de presión en estanques

Los estanques están fabricados con chapa de acero inoxidable 316L de 2 mm de espesor, el diseño permite una presión máxima de 4 bar según requerimientos del sistema. Se realiza una prueba de presión con inyección de aire comprimido hasta los 5 bar durante 10 minutos bajo condiciones de seguridad implementadas por una empresa externa, controlando que el nivel de presión no disminuya y sumergiendo los estanques en agua para verificar que no existan fugas, ambos estanques pasaron la prueba de presión hasta 5 bar. Se realiza prueba con presión positiva mínima bajo agua en cada estanque para verificar fugas en tapas, válvulas y conexiones (Figura 65).

Figura 65: Verificación de fugas con presión mínima en estanques de acumulación.

Luego de esto, son montados en una estructura provisoria para realizar pruebas visuales, pruebas de llenado, conexión con celda y vaciado de electrolito.

Figura 66: Montaje provisorio de estanques de acumulación.

Se llenan los estanques con solución electrolítica al 25% de KOH, solución que será utilizada en las pruebas de funcionamiento de la celda, comprobándose que no existen fugas por ninguna de las tapas, conexiones ni soldaduras.

3.1.2 Prueba de generación de celda

Previamente a realizar el armado completo de la celda electrolítica, se realiza una prueba de funcionamiento con el mínimo de cámaras de generación posible, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de algunos componentes, lo cuales son los siguientes:

- 1 tapa frontal
- 1 tapa posterior
- 1 empaque A
- 6 empaques B
- 1 empaque C

- 4 anillos de acrílico
- 1 membrana de Zirfón
- 2 placas polarizadas

El orden de armado es simular al orden del armado completo de la celda electrolítica, eliminando cámaras de generación, placas neutras y empaques de gomas del centro del conjunto, con la siguiente configuración (Figura 67 y Figura 68):

Tapa frontal – empaque A – acrílico – empaque B – placa positiva – empaque B – acrílico – empaque B - zirfón – empaque B – acrílico – empaque B – placa negativa – empaque B – acrílico – empaque C – Tapa trasera.

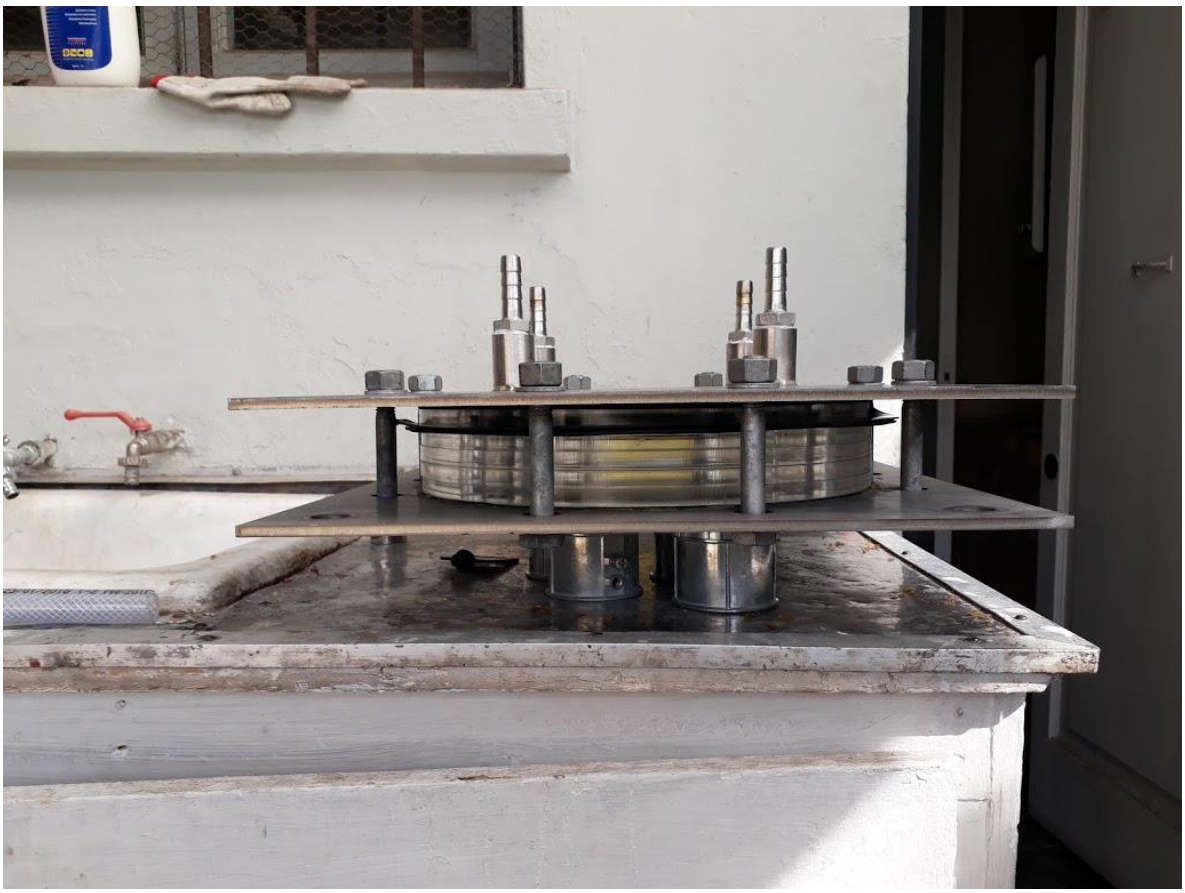


Figura 67: Celda con 4 cámaras para pruebas de generación.

Figura 68: Conexión de celda para prueba de generación.

Se instalan los componentes en un soporte provisorio según la ubicación que tendrán en la estructura final, se rellenan los estanques con 2,5 litros de electrolito al 25% de concentración de KOH en cada uno de los estanques, con los cuales se rellenan las cámaras de generación de hidrógeno y oxígeno en partes iguales. Se realiza la conexión eléctrica de las placas positiva y negativa a los bornes de la fuente de poder, borne negativo junto a cámara de generación de hidrógeno y borne negativo junto a cámara de generación de oxígeno, en la salida del estanque de hidrógeno se instala el flujómetro de hidrógeno.

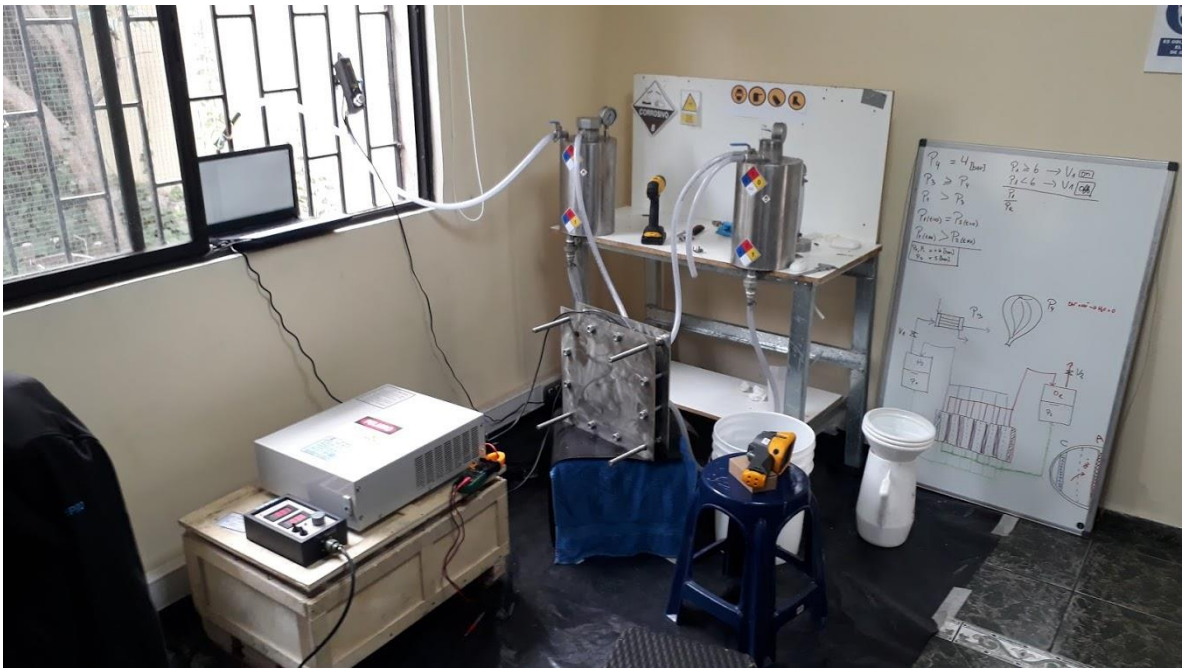


Figura 69: Prueba de generación con celda.

Se inicia la generación con el ajuste de voltaje en la fuente de poder, considerando 1.5 $[V]$ por cada cámara de generación entre placas, ajustando 6 $[V]$ en la fuente de poder. Se aprecia generación de ambos gases en las cámaras de acrílico, pero dado el bajo flujo de salida no es posible apreciarlo en la salida de los estanques de acumulación.

3.1.3 Prueba de generación con celda completa

Se continua con el desarme de la celda de prueba y armado de la celda de electrólisis completa según el orden indicado en la sección 2.5.1, para lo cual es necesario:

- 1 tapa frontal
- 1 tapa posterior
- 1 empaque A
- 26 empaques B
- 1 empaque C
- 14 anillos de acrílico
- 7 membranas de Zirfón
- 2 placas polarizadas
- 5 placas neutras

Una vez armada la celda completa, se instala en la misma posición en donde se instaló la primera celda de pruebas, el llenado de los estanques de realiza con electrolito con solución al 25% de KOH con 5 litros en cada uno de ellos, se realiza el llenado de la celda y la conexión de las placas polarizadas a los bornes de la fuente de poder, del mismo modo que la prueba realizada anteriormente. Los parámetros eléctricos se ajustan según la cantidad de cámaras de generación (14 cámaras) y el voltaje necesario por cámara (1.5 $[V]$), por lo tanto, el voltaje de entrada a la celda es de 21 $[V]$.

Figura 70: Prueba de generación con celda completa.

Se inicia la generación con venteo a presión ambiente de ambos gases, se aprecia que la generación aumenta respecto a la obtenida en la prueba anterior, en el extremo de la manguera de salida de hidrógeno se instala el flujómetro MassView, para dimensionar la cantidad de gas generado, además, se deja salir el gas dentro de un vaso precipitado con agua destilada a fin de visualizar el flujo.

Figura 71: Salida de hidrógeno a presión ambiente en prueba de generación con celda completa.

3.1.4 Prueba de sistema de control

Previamente a la incorporación del sistema de control al equipo, mostrado en la sección 2.5.3, se realiza una prueba de funcionamiento de todos los componentes de ambas líneas de control, hidrógeno y oxígeno. Para ello se realiza la conexión de todos los

componentes según el diagrama P&ID presentado en la sección 2.4.4.1, con la menor cantidad de conectores posible y sin enfatizar en su ubicación, ya que esta no representa la ubicación final, pero permite identificar alguna falla en válvulas y sensores, verificar el funcionamiento general y la configuración electrónica. Ambas líneas son montadas sobre el nivel de los estaques de acumulación en el soporte provisorio (Figura 72), se utiliza la misma configuración utilizada en la prueba de generación con celda completa, de la sección anterior, las líneas de control son conectadas a sus respectivos estanques y se inicia la generación.

Figura 72: Prueba del sistema de control de hidrógeno y oxígeno a nivel de estanques.

La prueba consiste en verificar el funcionamiento de todas las válvulas (manual, motorizada y por solenoide), sensores (presión, temperatura, presencia de H_2 y de flujo) y conexiones, para ello es necesario acumular ambos gases en sus respectivos estanques hasta 1 [bar], indicado por los manómetros ubicados en ambos estanques, abrir y cerrar valvular según el sentido de flujo y verificar si existe pérdida de presión en alguno de los componentes.

3.1.5 Prueba de presión en celda y estanques

Con la misma configuración utilizada en la prueba de generación con celda completa y en la prueba de sistema de control (Figura 73), se realiza una prueba de presión en la celda

y estanques. Consiste en comenzar con la generación de gases con la totalidad de las válvulas de salida cerradas, para que se acumule hidrógeno y oxígeno en sus respectivos estanques de acumulación, lo que incrementa la presión en el interior de la celda, el aumento de presión es monitoreado mediante los manómetros ubicados en la parte superior de los estanques. Al comenzar la generación de abren las válvulas para expulsar de las líneas del sistema el aire, así la acumulación es netamente de los gases generados, una vez transcurridos 5 minutos de generación se cierran las válvulas y la presión del sistema comienza a aumentar. La prueba se detiene al alcanzar una presión de 4.4 $[bar]$ (Figura 74).

Figura 73: Prueba de presión en líneas de control.

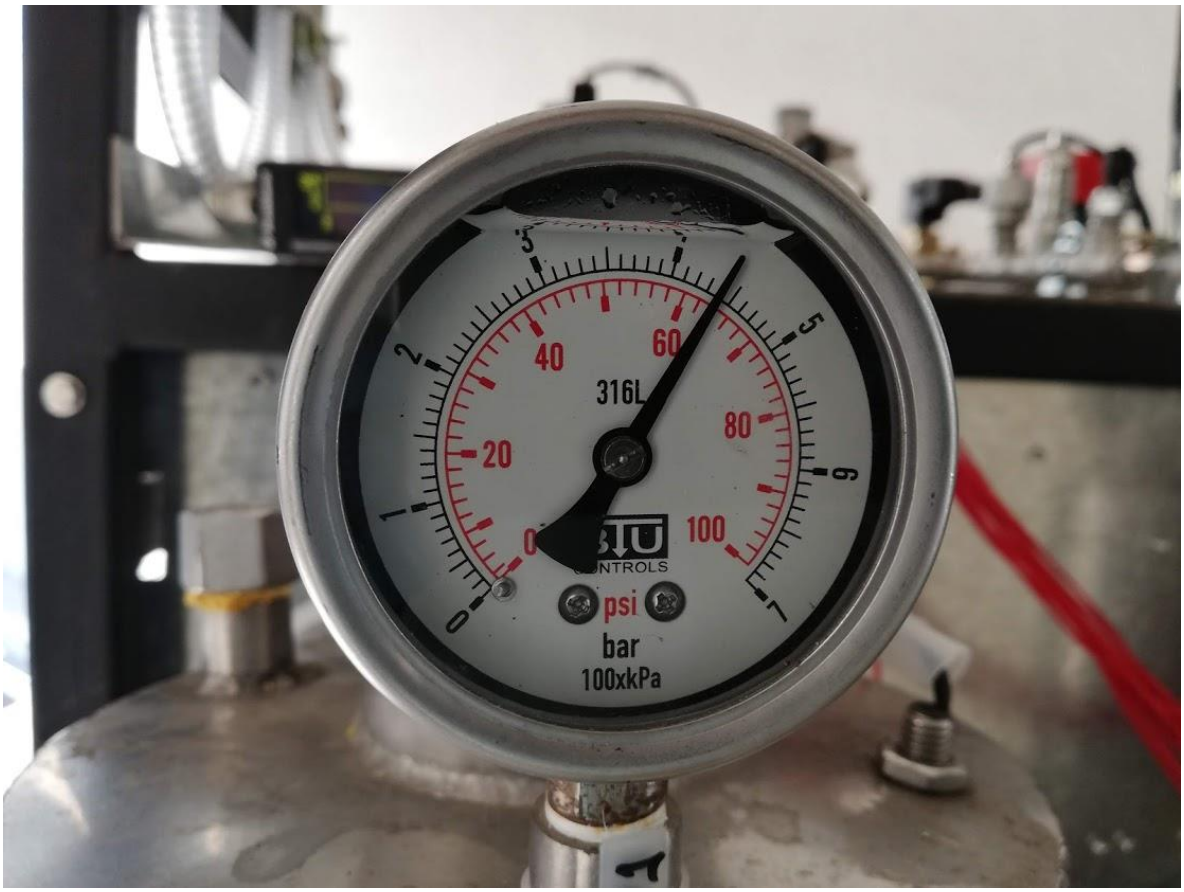


Figura 74: Presión máxima alcanzada en pruebas de presión con celda completa.

3.1.6 Prueba de rendimiento

La última prueba, con similar configuración que la anterior, consiste en monitorear el flujo de hidrógeno medido por el flujómetro Mass-View ubicado en la salida de hidrogeno durante 30 minutos, generado a una presión de 3 [bar].

Se obtiene que el electrolizador construido posee una generación de 0,1 Nm^3/h, el consumo medio calculado con mediciones de corriente y voltaje en la alimentación de la celda es de 0,84 kW, por lo tanto, el consumo general del electrolizador fabricado es el siguiente.

$$E_{electrolizador} = \frac{Potencia}{Generación} = \frac{0{,}84\ kW}{0{,}1\ [Nm^3/h]} = 8{,}4\ \left[\frac{kWh}{Nm^3}\right] \qquad (27)$$

Comparando con el consumo de energía teórico de 3,54 $[kWh/Nm^3]$ [20] para la generación de hidrógeno mediante electrólisis se obtiene el rendimiento del electrolizador.

$$\eta_{elec} = \frac{E_{teorica}}{E_{electrolizador}} * 100\% = \frac{3{,}54\left[\frac{kWh}{Nm^3}\right]}{8{,}4\left[\frac{kWh}{Nm^3}\right]} * 100\% = 42{,}1\% \qquad (28)$$

Por lo tanto, el rendimiento del electrolizador construido es de un 42,1%.

Para calcular la eficiencia de Faraday es necesario conocer la densidad de corriente por las placas de generación. Según los parámetros de generación establecidos en 1,5 V por placa y 40 A, el área de placa en donde se produce la generación es de 395,7 cm^2, por lo tanto, el generador construido posee una densidad de corriente de 100 mA/cm^2. La densidad de Faraday, utilizando los valores de f_1y f_2 del electrolizador de HYSOLAR a 60 $°C$, se calcula como.

$$\eta_f = \frac{(40/0{,}03957)^2}{200 + (40/0{,}03957)^2} * 0{,}985 = 98{,}48\ \% \qquad (29)$$

3.1.7 Prueba de concentración de electrolito

Se experimenta con la concentración de electrolito para encontrar el punto de operación de la celda, se comienza con concentración nula, es decir, solo con agua destilada, el incremento se realiza cada 0.2%pp (porcentaje en peso de hidróxido de potasio respecto al peso del agua), a medida que se toman más datos el incremento puede ser de 1%pp, luego se aumenta el paso a 5%pp sin superar la concentración máxima permitida por la membrana Zirfón que, según sus especificaciones, posee un límite máximo de 25.2%pp . Las mediciones por realizar son intensidad de corriente [A] y resistencia entre placas [ohm] respecto al aumento de concentración.

La prueba se realiza con la configuración de celda utilizada en la sección 3.1.2, en donde se configura con 4 cámaras de generación y 2 placas polarizadas, se agregan 10 litros de agua destilada con la cual se comienzan las mediciones. Se utiliza esta configuración ya que es necesario vaciar el electrolito de la celda y estanques para agregar los cristales de KOH, permitiendo la disolución completa antes de agregarla de nuevo al sistema. Las concentraciones por utilizar se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Concentraciones de electrolito para prueba de punto de operación de la celda.

$\%pp$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
	1.8	2.0	3.0	4.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0

Al realizar las mediciones con las concentraciones indicadas anteriormente, se obtienen las curvas presentadas en el Gráfico 4, curva de Intensidad de corriente [A] y de Resistencia entre placas [ohm] respecto a la concentración.

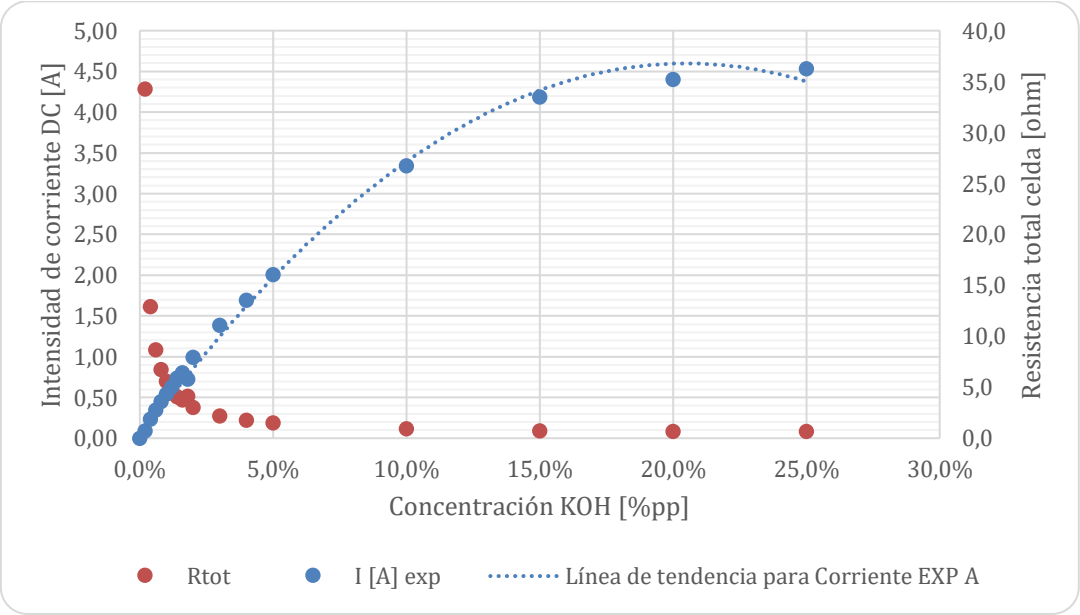


Gráfico 4: Corriente entre placas y resistencia del electrolito según variación de la concentración de KOH.

Para determinar la concentración de operación se considera lo siguiente:

- La concentración de electrolito no debe superar el $25\%pp$, ya que es el límite de operación recomendado por el fabricante de la membrana Zirfón, se considera esta concentración como el indicador de término de un ciclo de funcionamiento del equipo.
- A medida que la electrólisis se produce, se consume agua en la generación de hidrógeno y oxígeno, por lo que la concentración de electrolito dentro del sistema aumenta.
- La concentración inicial debe permitir la realización de ciclos de llenado en el orden de horas.

Se realiza una prueba de generación midiendo el flujo de hidrógeno en el tiempo para distintas concentraciones, $15, 20\ y\ 25\%$, en el Gráfico 5 se puede apreciar que la curva de flujo respecto al tiempo presenta una diferencia mínima en periodos de operación sobre los 30 minutos, lo que indica que la celda puede operar entre estos valores de concentración sin afectar la generación. Por lo tanto, se fija la concentración inicial de $15\%pp$, lo que permite la generación de los $21\ Nm^3$ requeridos con 2 rellenos de 20 litros de agua.

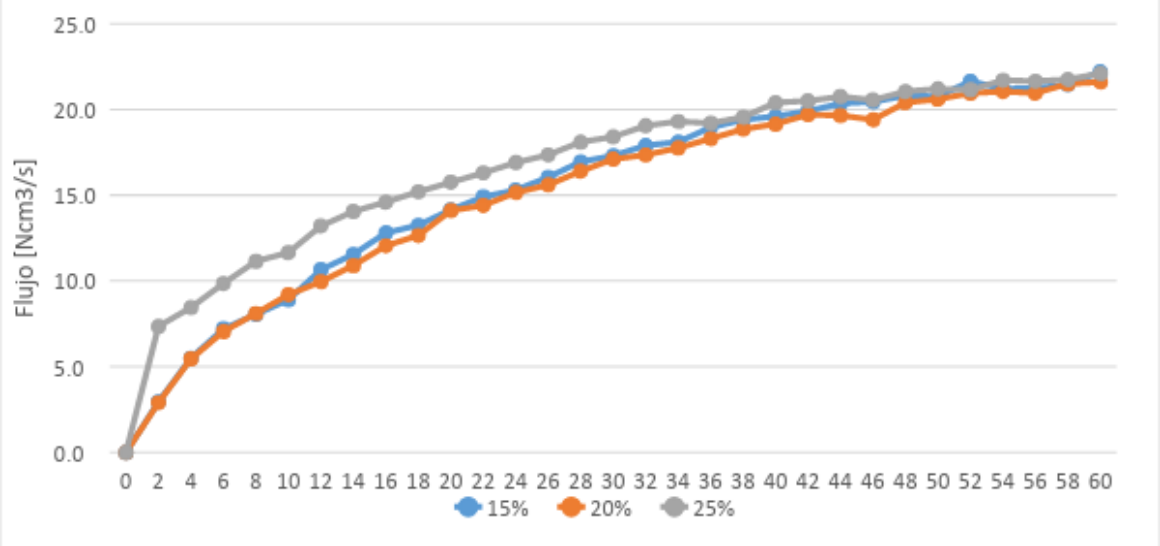


Gráfico 5: Generación de hidrógeno en tandas de 60 minutos según variación de concentración inicial de electrolito.

3.1.8 Prueba de temperatura

Se realiza una prueba con la configuración de celda completa de la sección 3.1.3, en donde se mide la temperatura del centro de la celda y de las tapas exteriores para evaluar la necesidad de un posible sistema de enfriamiento. La prueba se realiza durante 100 minutos, en donde el sistema se encuentra trabajando al 100%. En el Gráfico 6 se aprecia que la temperatura se eleva paulatinamente durante la prueba hasta alcanzar los $70°C$, dado este resultado se considera adicionar un ventilador ubicado en un costado de la celda ingresando aire fresco al conjunto y otro al costado de los estanques de acumulación extrayendo el aire caliente del sistema.

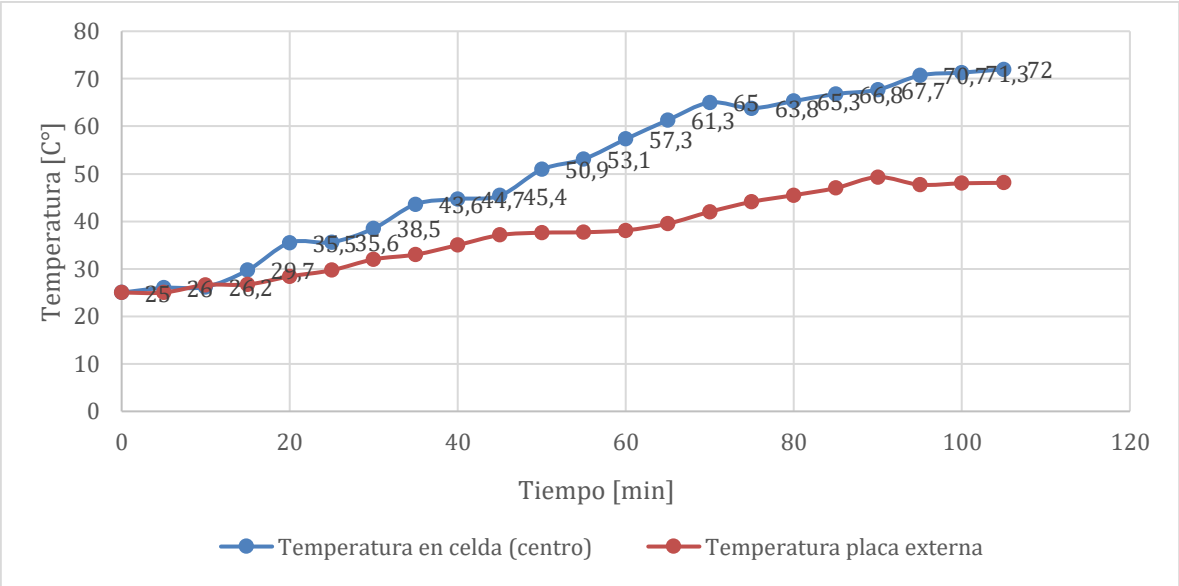


Gráfico 6: Temperatura de celda en el centro y en tapa según tiempo de funcionamiento (sin enfriamiento).

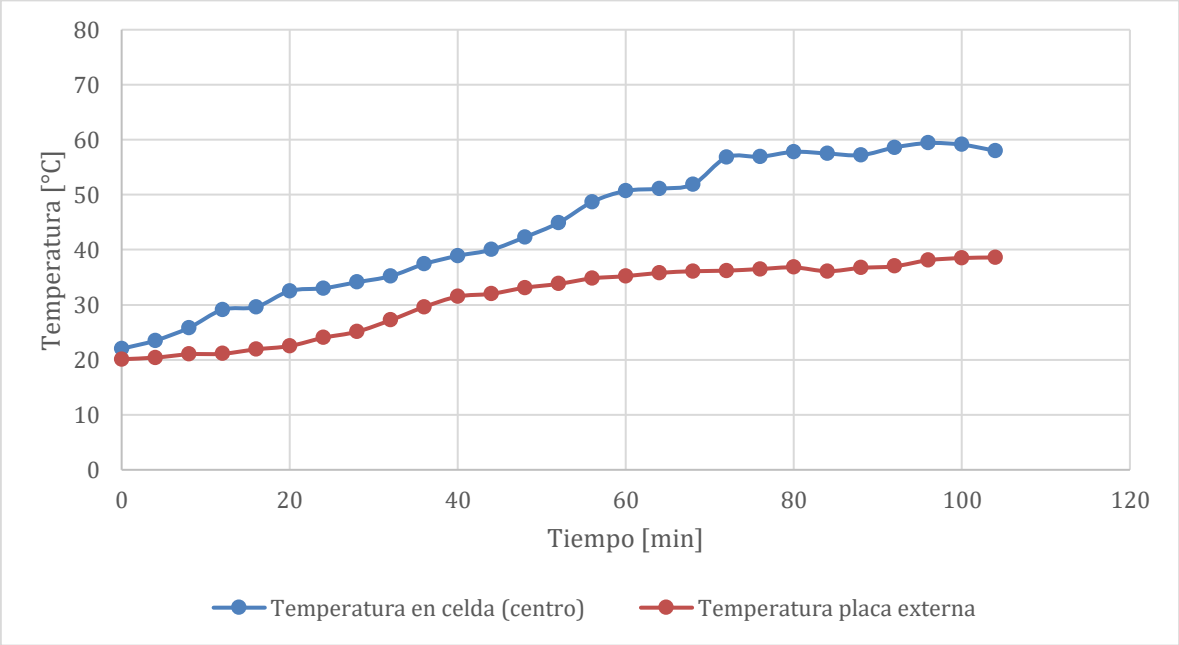


Gráfico 7: Temperatura de celda en el centro y en tapa según tiempo de funcionamiento (con enfriamiento).

3.2 Puesta en marcha

La puesta en marcha del sistema electrolizador comienza con la verificación de los componentes principales, el encendido de la fuente y regulación de la generación, para ello se describen los procedimientos de encendido, apagado y rellenado de solución electrolítica.

3.2.1 Procedimiento de encendido

Se debe realizar el procedimiento de encendido cada vez que se quiera utilizar el equipo. Los pasos son os siguientes:

- Inspección visual de la celda electrolítica: Verificar que no existan fugas de electrolito y el estado de las paredes de las cámaras de generación y tapas, si existen fugas no continuar con el encendido y avisar al personal a cargo.
- Inspección de estanques de acumulación: Verificar que todas las válvulas manuales se encuentren en la posición cerrada, las tapas superiores de los estanques cerradas y el nivel de electrolito sobre el mínimo. Abrir las válvulas manuales PVC101 y PVC102 ubicadas debajo de los estanques para llenar de electrolito la celda, si el nivel de electrolito está debajo del mínimo, abrir las tapas de llenado de los estanques con una llave de 1”, rellenar con agua destilada sin exceder el nivel máximo y cerrar las tapas superiores.
- Inspección de líneas de control: Se verifican que todas las válvulas manuales se encuentren en la posición cerrada y las conexiones de mangueras sujetas y apretadas, si existen fugas de electrolito en las conexiones, no continuar con el encendido y avisar al personal a cargo.
- Inspección de mangueras de conexión: Se verifica la totalidad de conexiones de mangueras entre celda, estanques y líneas de control procurando que estén firmes y las abrazaderas apretadas, si existen fugas de electrolito en las conexiones, no continuar con el encendido y avisar al personal a cargo.
- Inspección de conexión eléctrica de la celda: Se verifica que la celda se encuentre conectada mediante los cables positivo y negativo en los bornes de la fuente de poder y bornes de las placas polarizadas, se verifica que la polaridad concuerde con la indicada en las etiquetas y los bornes se encuentres sujetos y firmes, si los conectores no se encuentras firmen y apretado, avisar al personal a cargo antes de continuar con el procedimiento.
- Verificar que el interruptor ubicado a un costado de la fuente de poder se encuentre en posición “off”, si no lo está, moverlo a la posición “off”.

- Verificar que el botón de parada de emergencia en la parte posterior del equipo no se encuentre pulsado, si lo está, destrabar girándolo en el sentido de las manecillas del reloj.
- Girar ambas manecillas del control de la fuente de poder (Voltaje y Corriente), ubicado dentro del equipo, al mínimo, en sentido contrario al sentido de las manecillas del reloj.
- Conectar el equipo a una fuente de alimentación trifásica mediante el conector exterior de 5 puntas.
- Mover el interruptor de encendido de la fuente de poder a la posición “on”.
- Seleccionar el controlador de voltaje en el control de la fuente de poder y girar la perilla de control de corriente al máximo.
- Girar la perilla de control de voltaje hasta que el indicador muestre 21 V. La corriente mostrada en el indicador se ajusta automáticamente según las condiciones de temperatura, concentración de electrolito y cantidad de burbujas en las cámaras de generación.
- Abrir las válvulas manuales PVA101 y PVA102 ubicadas en la parte superior de los estanques de acumulación.

3.2.2 Procedimiento de apagado

Para dejar de operar el equipo, se deben seguir los siguientes pasos:

- Mover la perilla de corriente en el control de la fuente de poder al mínimo.
- Mover el interruptor de la fuente de poder en la posición “off”.
- Desconectar el equipos de la corriente.
- Cerrar las válvulas manuales PVC 101, PVC102, PVA101 y PVA102, ubicadas en la parte inferior y superior de los estanques de acumulación.
- Liberar la presión en ambas las líneas de control con las válvulas manuales PVB104 y PVB105

3.2.3 Procedimiento de llenado

Una vez alcanzado el nivel mínimo de electrolito en los estanques, se deben seguir las siguientes instrucciones:

- Realizar el procedimiento de apagado del sistema.
- Abrir las tapas superiores de ambos estanques de acumulación.
- Rellenar con agua destilada hasta alcanzar el nivel superior indicada en cada estanque de acumulación.
- Cerrar las tapas de la parte superior de los estanques de acumulación.
- Si se requiere seguir operando, realizar el procedimiento de encendido del sistema.

3.3 Problemas y fallas

- Membrana de separación no adecuada

Inicialmente se consideró utilizar una membrana denominada Nafión, se trata de una membrana polimérica de intercambio protónico con carácter ácido PEM (Proton Exchange Membranes) utilizada generalmente en electrolizadores con el mismo nombre, celdas de combustible y baterías de flujo [21].

El uso de esta membrana en un ambiente básico, como lo es el electrolito de Hidróxido de potasio KOH utilizado, provocó grave deterioro en ambos lados de la membrana (Figura 75).

Figura 75: Membrana de intercambio protónico usada inicialmente en la construcción de la celda.

Las membranas quedaron con un aspecto de quemadura, lo cual las deja inutilizables.

- Desintegración de empaque de goma

En las pruebas de parámetros eléctricos con la celda, se modifican las corrientes y diferencia de potencial de la fuente de poder para comprobar el correcto funcionamiento del conjunto electrolizador, al aumentar el voltaje por sobre el necesario para realizar la electrolisis, según la separación entre placas, el exceso de energía desintegra los empaques

de goma liberando partículas de ente en las cámaras de generación, el electrolito queda inutilizable y los conductos de paso de electrolito y gases dentro de la celda quedan tapados (Figura 76 y Figura 77).

Figura 76: Restos de desintegración de empaque de goma en placa.

Figura 77: Restos de desintegración de empaque de goma en membrana.

Se realiza el desarme de la celda y posterior limpieza de todos los componentes con agua desmineralizada. Para el armado de la celda, se realiza la adquisición de un nuevo empaque resistente a medios básicos y con mayor resistencia ambientes con mayor diferencias de potencial que el empaque utilizado anteriormente.

- Pureza del agua

La pureza del agua es fundamental para el buen funcionamiento del electrolizador y realizar el proceso de electrólisis con el menor consumo de energía posible, el uso de agua dura con altos niveles de minerales como sales de magnesio y calcio puede provocar que se genere una capa de sarro en las cámaras de generación, específicamente en placas de acero, o que reduce la generación de ambos gases.

Inicialmente se utiliza agua desmineralizada adquirida en locales comerciales en bidones de 5 litros, usada generalmente para alimentación de calderas, usos farmacéuticos, electrónica, alimentación, industrial, etc, gracias a la capacidad producir un mínimo de desechos al evaporarse y no ser conductor eléctrico. El uso de este tipo de agua en electrolizador no permite un buen funcionamiento, ya que este tipo de agua es generada por osmosis inversa, proceso que no elimina elementos no orgánicos u otros componentes que no tengan relación mineral. Al realizar pruebas de generación con agua desmineralizada, las placas polarizadas presentan una adherencia de elementos presentes en el agua (Figura 78).

Figura 78: Placas polarizadas luego de utilizar agua desmineralizada para electrolito.

La solución a este problema es utilizar agua destilada, generada por la evaporación y condensación del agua dura, este proceso elimina minerales y otras sustancias dejando casi exclusivamente los compuestos H_2O. Las pruebas con el agua destilada no presentaron residuos en placas y cámaras de generación, problemas visuales ni de generación.

- Sobrecarga eléctrica en bornes y cables

Al realizar pruebas de funcionamiento con la celda completa, y en pruebas de funcionamiento de la fuente de poder, se utiliza cable AWG 10 para la conexión de los bornes de la fuente de poder y las placas polarizadas de la celda, este cable permite como máximo $50\ A$. Tras la modificación de los parámetros eléctricos, concentración de electrolito y configuración de la celda en cada una de las pruebas, el cable utilizado muestra fallas por sobrecarga, La solución al problema es utilizar cable para máquinas de soldar de $25\ mm^2$, que permite una corriente máxima de $100\ A$, además, para una mejor conexión en la celda, se instalan golillas de cobre en los bornes de las placas polarizadas.

- Filtración de electrolito en celda

La celda a utilizar realiza el sellado de las cámaras de generación con empaques de goma comprimidas entre si al armar el equipo, anteriormente se reemplaza este sello por la

incapacidad de soportar la temperatura de operación, entre 70 y 80 °C, y el ambiente básico del electrolito. Las pruebas de presión en la celda permiten trabajar con una presión interior de 4,4 $[bar]$, sin embargo, luego de varias horas de operación se aprecian fugas de gases por la parte superior de las cámaras de generación, brotando entre los empaques de goma.

- Filtración de gases en estanques

Las pruebas de generación y acumulación de gases en estanques revelan un problema no esperado, filtración de gases hacia el ambiente por las tapas superiores que sirven para rellenar e inspeccionar el interior. Los estanques poseen conexiones de acero inoxidables con norma NPT, la principal característica de esta norma de rosca es que realiza el sellado con el mismo hilo, sin necesidad de otro tipo de sellante. Para solucionar este problema, se agrega PTFE líquido Würth en todas las roscas, este es un sellador de roscas cónicas y cilíndricas que soporta hasta 200 bar [22].

- Filtración de gases en líneas de control

De igual manera que en estanques de acumulación, las líneas de control presentan fugas de gases en conexiones roscadas, se agrega el mismo producto en la totalidad de las roscas de conexiones, válvulas y sensores.

- Inundación de electrolito en líneas de control

En las diversas pruebas de funcionamiento, se realizan aperturas y cierres de válvulas de paso manual, al realizar esta acción, sin control de la velocidad de escape de hidrógeno u oxígeno, el electrolito almacenado en los estanques de acumulación es arrastrado junto al flujo de gases hasta inundar las líneas de control, dado que el electrolito es un compuesto básico y conductor de electricidad, variados sensores presentaron problemas de funcionamiento.

3.4 Adaptación con otras tecnologías

Un electrolizador puede acoplarse a diversos equipos para aumentar y/o mejorar sus características, entre ellas se encuentra la conexión a alimentación eléctrica proveniente de fuentes renovables, como energía solar mediante una planta fotovoltaica. además, se puede adicionar al sistema dos etapas extras luego de la generación, una etapa de almacenamiento de hidrógeno y otra de generación eléctrica mediante una celda de combustible, las cuales, al

trabajar en conjunto, se comportan como una batería, entregando energía eléctrica en cualquier momento.

3.4.1 Energía solar fotovoltaica

El equipo electrolizador construido posee alimentación mediante conexión trifásica de 220V para la fuente de poder, a su vez, la fuente entrega alimentación eléctrica para entre 0 y 100 [A] y entre 0 y 48 [V] en corriente continua. La capacidad de alimentar la celda electrolítica con otras fuentes de alimentación renovables, como energía solar fotovoltaica, permite suplir la alimentación de la red eléctrica. Esta práctica se ha realizado en variadas empresas alrededor del mundo.

3.4.1.1 Sistema de producción de potencia autónomo con fotovoltaica e hidrógeno en Madrid, España.

Se realizan dos proyectos en la ciudad de Madrid con una duración de 4 años, el cual construye y prueba un sistema híbrido fotovoltaico/batería/almacenamiento de hidrógeno/celdas de combustibles, el consumo de energía promedio es de 3,6 $kWh/día$ y una demanda de potencia promedio de $150\ W$, las celdas de combustible tienen la capacidad de suministrar energía en caso de que las baterías no pudiesen proporcionar toda la energía necesaria. El objetivo de este primer proyecto es probar la fiabilidad y complicidad en el mantenimiento que requiera la configuración del sistema.

Un segundo sistema demostrado fue con generación fotovoltaica/electrolizador PEM/almacenamiento de hidrógeno con hidruro metálico/celda de combustible PEM aire-hidrógeno. El sistema básico de diseño y las especificaciones de los componentes principales son los siguientes:

- Sistema fotovoltaico: 1,5 kWp, 22 módulos, celdas tipo CIS (CuInSe2)
- Electrolizador: 1 kW, tipo PEM, 30 celdas, área del electrodo 30 cm^2.
- Almacenamiento de hidrógeno: 70 $Nm^3\ H_2$, hidruro metálico tipo AB5, 700 kgs.
- Celda de combustible: 0,4 kW, tipo PEM, 48 celdas, área del electrodo 50 cm^2.
- Batería: 48 V, 400 Ah.
- Carga eléctrica: $133 - 197\ W$.

El esquema del segundo proyecto llevado a cabo en Madrid se muestra en la Figura 79 [23].

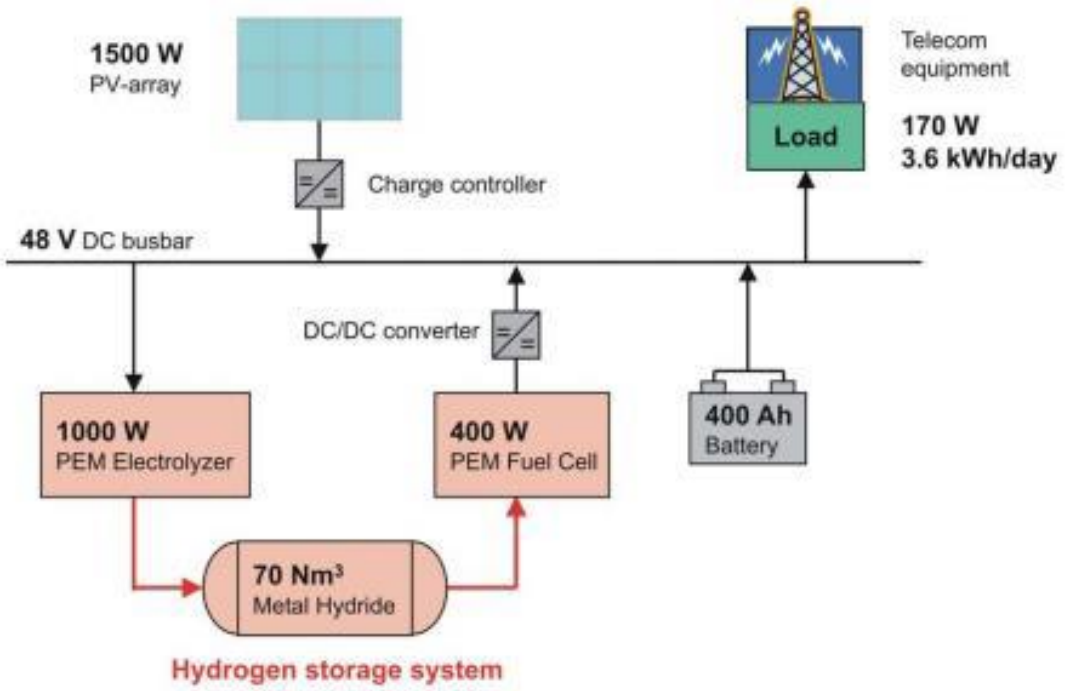


Figura 79: Sistema de producción de potencia autónomo con fotovoltaica e hidrógeno en Madrid, España.

3.4.1.2 Sistema de energía renovable basado en hidrógeno en Leicestershire, Reino Unido

A fin de demostrar y promover la sostenibilidad, con un interés especial en la energías renovables, la conversión y almacenamiento de energía, es que Tony Marmont, propietario de una granja en Beacon West, Reino Unido, instala un sistema integrado de energía renovable basado en hidrógeno, conocido como Proyecto-HARI.

La alimentación del proyecto consiste en dos turbinas eólicas, un sistema fotovoltaico y dos turbinas micro-hidroeléctricas, el generador de hidrógeno es un electrolizador alcalino, almacenamiento de hidrógeno a presión estándar y una celda de combustible PEM. El sistema básico de diseño y las especificaciones de los componentes son los siguientes (Figura 80):

- Planta fotovoltaica: 13 kWp
- Turbina eólica: $2x25\ kW = 50\ kW$
- Turbinas micro-hidroeléctricas: 3 kW
- Electrolizador alcalino: 50 kW, $8Nm^3/h$, 25 bar
- Almacenamiento de hidrógeno: 2856 Nm^3, 137 Bar
- Celda de combustible PEM: $2\ kW + 5\ kW = 7\ kW$

- Batería: 20 kWh, $NiNaCl$, 250 $°C$

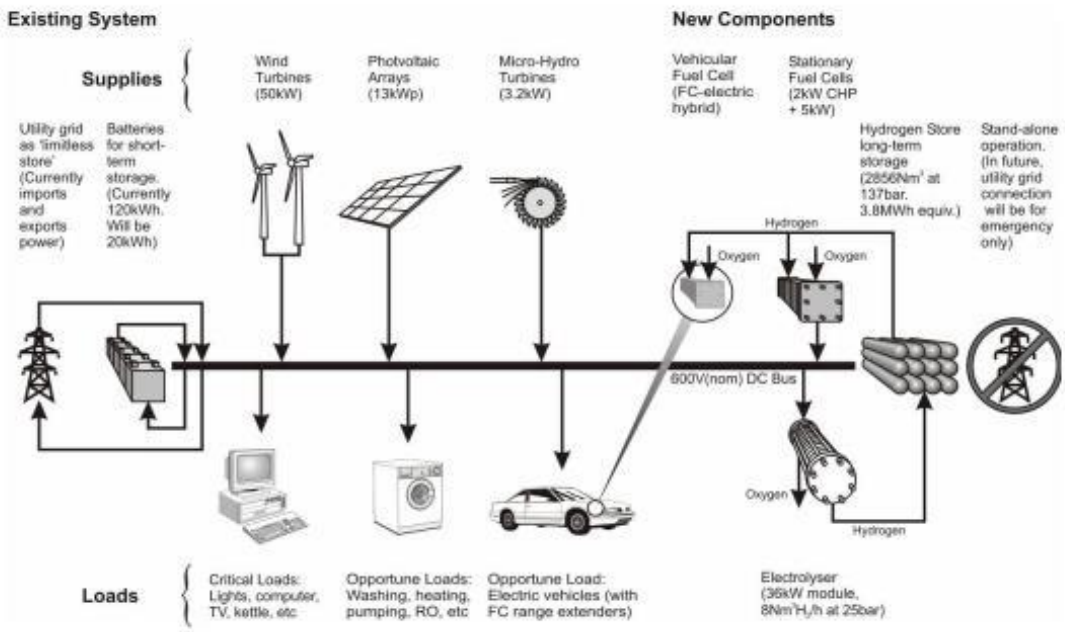


Figura 80: Sistema de energía renovable basado en hidrógeno en Leicestershire, Reino Unido

3.4.1.3 Sistema domestico solar-Hidrógeno (PV/H_2) en Brunate, Italia

El sistema de generación de Brutane posee variados componentes que permiten la generación y almacenamiento de hidrógeno de forma renovable, con posterior regeneración de electricidad mediante una celda de combustible, todo controlado para generar con el exceso de energía proveniente de la planta fotovoltaica, los componentes del sistema se describen a continuación y se muestran en la Figura 81.

- Planta fotovoltaica: 11 kWp
- Electrolizador alcalino: 1 Nm^3/h
- Compresión: compresión de hidrógeno 200 bar
- Almacenamiento: 30 Nm^3 en hidruro metálico + 90 Nm^3 en cilindros de gas
- Celda de combustible PEM: 5 kW
- Batería: 48 V, 3000 Ah

El sistema fotovoltaico está conectado al electrolizador a través de un convertidor DC/DC y al sistema eléctrico por otro convertidor DC/DC, la celda de combustible y la batería están conectadas, además, al sistema eléctrico de forma continua [23].

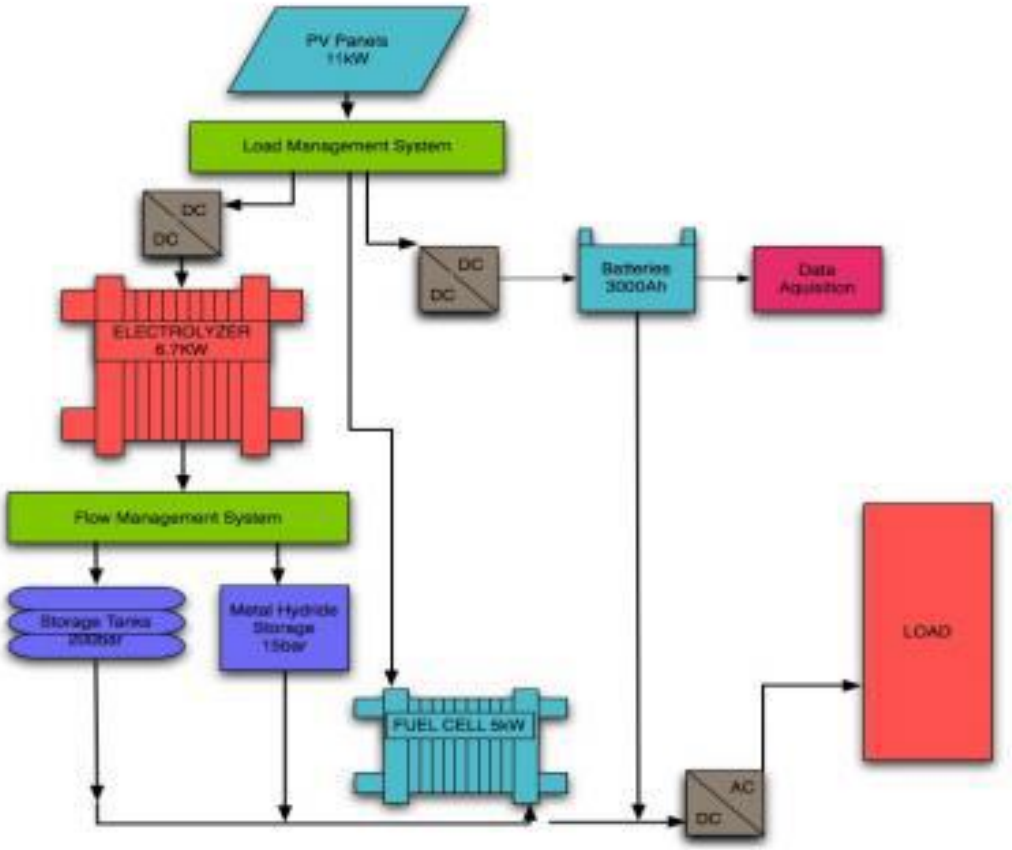


Figura 81: Sistema domestico solar-Hidrógeno (PV/H_2) en Brunate, Italia.

3.4.1.4 Estudio de rendimiento de un electrolizador acoplado a energías renovables

Luego de análisis realizados por Øystein Ulleberg para el Institute for Energy Technology, en Kjeller, Norway, en donde realiza modelamientos termodinámicos, electromecánicos y térmicos para un electrolizador alcalino, realiza un sistema de simulación, en donde acopla el electrolizador a un arreglo fotovoltaico y a una celda de combustible, con el fin de estudiar el rendimiento del sistema (Figura 82) [18]. Los parámetros del sistema son:

- Planta fotovoltaica: 42,3 kWp + 4 MPPTs (maximum power point traking)
- Electrolizador alcalino: 26 kW, 7 bar
- Compresor: H_2 de 7 a 120 bar y O_2 de 7 a 70 bar
- Almacenamiento: H_2 26,8 m^3, O_2 20 m^3
- Celda de combustible alcalina: 6 kW

- Batería: $300\ kWh, 220\ V$
- 2 convertidores DC/DC y un inversor DC/AC

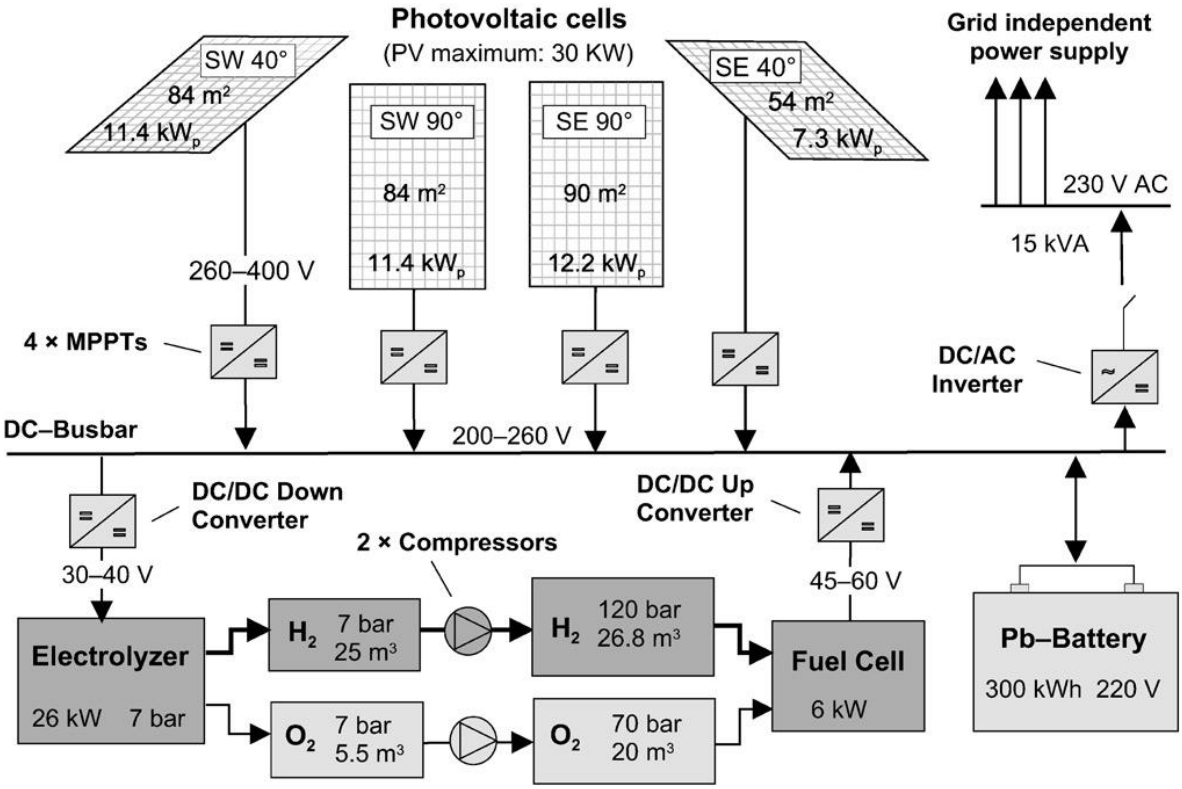


Figura 82: Estudio de rendimiento de un electrolizador acoplado a energías renovables.

3.4.2 Energía eólica

A inicios de los años 2000, ENEA Research Centre, en Casaccia, Italia, crea el primer sistema prototipo de electrolizador eólico de prueba, de esa fecha hasta el año 2008, fecha en que se realiza la demostración de este sistema en Utsira, Noruega, se han desarrollado una serie de proyectos de demostración y plantas piloto con la adaptación de la energía eólica en la producción de hidrógeno. Este sistema de demostración contempla los siguientes componentes para abastecer de electricidad a 10 hogares, el esquema de la Figura 83 muestra el sistema completo [25].

- Planta eólica: $600\ kW$
- Electrolizador: $10\ Nm^3/h$
- Almacenamiento: $2400\ Nm^3, 200\ bar$
- Motor de hidrógeno: $55\ kW$

- Celda de combustible PEM: 10 kW

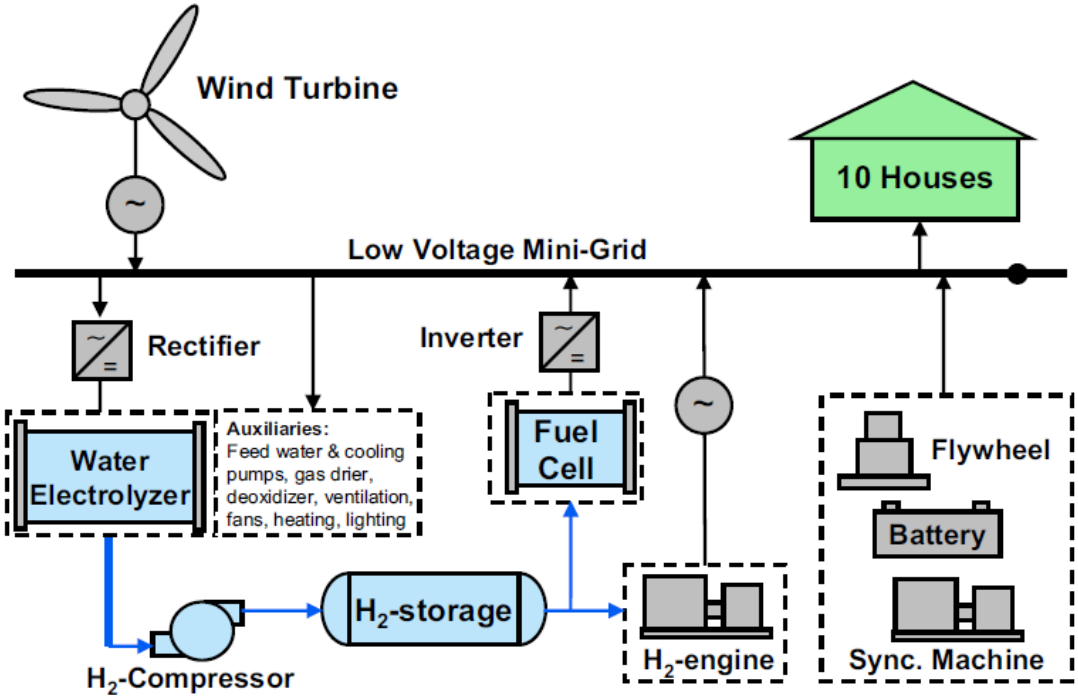


Figura 83: sistema prototipo de electrolizador eólico de prueba, Casaccia, Italia.

Este sistema proporciona de 2 a 3 días de autonomía energética total para 10 hogares de la isla.

3.4.3 Celda de combustible

Varios de los casos mostrados en la sección 3.3.1 muestran sistemas de generación de hidrógeno por electrólisis trabajando en conjunto a celdas de combustibles, indispensable en el conjunto para aprovechar de la mejor forma posible la alimentación de fuentes con aleatoriedad como lo es la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, al adicionar una etapa de acumulación, el conjunto puede trabajar como una batería, que almacena energía en forma de hidrógeno y puede transformarla en energía eléctrica sin una fuente de poder. A continuación, se presentan algunos casos en que estos elementos trabajan en conjunto.

3.4.3.1 Sistema de almacenamiento de hidrógeno en Atsugi, Japón

"El almacenamiento de electricidad en forma de hidrógeno solo es rentable y por tanto solo se puede justificar si los sistemas de almacenamiento de hidrógeno se desarrollan con

altas eficiencias energéticas" [24], esta es la base para que el almacenamiento de electricidad en forma de hidrógeno pueda desarrollarse, es por ello que el Dr. Yoshiyuki Kozawa, de la universidad de Gifu, Japón, realizó su idea original en donde utiliza un sistema de almacenamiento de hidrógeno usando un hidruro metálico, gracias a este trabajo se presenta un modelo de sistema detallado y el diseño, construcción y pruebas de un sistema de laboratorio, que posteriormente se llevó a cabo en el Centro de Desarrollo e Investigación de Ingeniería Térmica de Takasago, Kanagawa, Japón. La finalidad de este sistema es producir hidrogeno por la noche, almacenar este hidrógeno en un sistema de hidruro metálico y finamente convertirlo en electricidad en una celda de combustible durante el día, este sistema es presentado en la Figura 84.

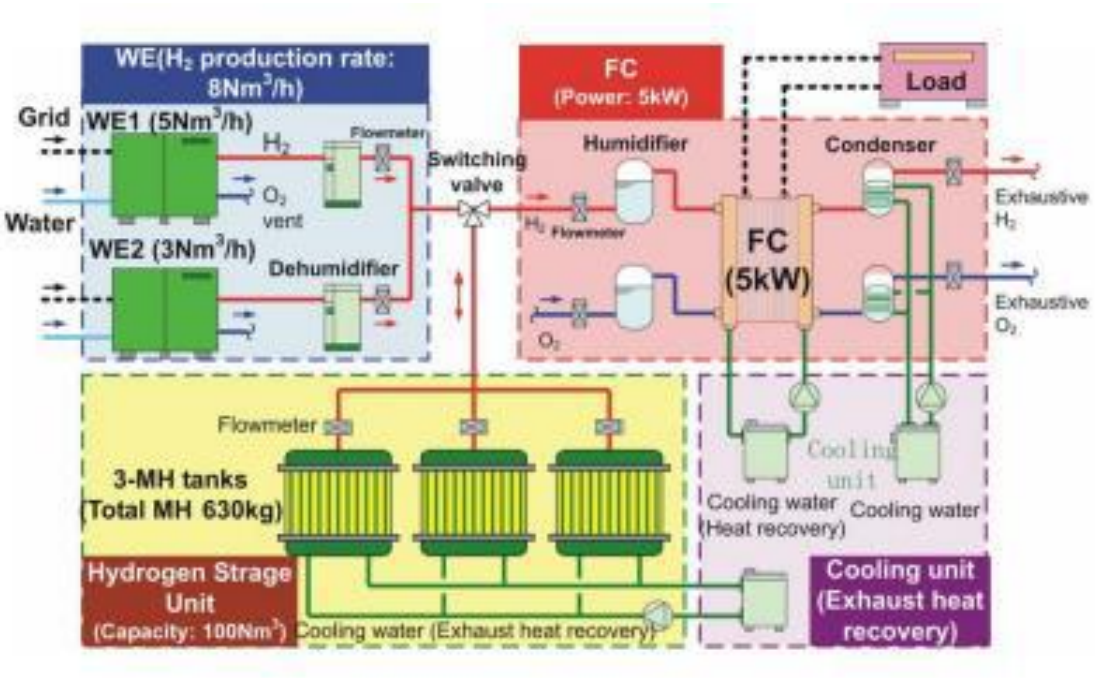


Figura 84: Sistema de almacenamiento de hidrógeno en Atsugi, Japón.

Los principales componentes del sistema de Takasago son los dos electrolizadores que generan en total 8 Nm^3/h, tres depósitos de almacenamiento de hidrógeno que consisten en hidruros metáticos del tipo AB5, con capacidad de almacenamiento de 100 Nm^3 y un peso de 210 kg cada uno, finalmente, una celda de combustible PEM de 5 kW [23].

3.5 Presentación del equipo

El equipo de electrólisis se encuentra construido y montado en la estructura, presentado en las siguientes figuras.

Figura 85: Equipo electrolizador construido y montado en estructura.

4 Conclusiones

Se ha diseñado y fabricado un electrolizador de baja potencia con generación de $100\ Nlts\ H_2/h$, ampliable a $500\ Nlts\ H_2/h$ mediante la adición de placas y cámaras de generación en el interior de la celda, sin modificación de los demás elementos del equipo.

Para la construcción del equipo electrolizador, se ha seleccionado la tecnología de celda alcalina con una potencia de $1\ kW$, debido a ser la tecnología más antigua, robusta y más usada en el mundo para la generación de hidrógeno por electrólisis. Para lograr realizar la electrólisis en agua destilada, es necesario agregar un componente que mejore la conductividad eléctrica del fluido, para ello se adiciona hidróxido de potasio en concentración de 25% peso/peso, logrando un ambiente con PH básico.

El proceso de electrolisis se realiza mediante una configuración bipolar de las placas polarizadas, con una densidad de corriente de $100\ mA/cm^2$. Esta configuración es utilizada en variados modelos de distintas marcas de electrolizadores en todo el mundo, mostrando una alta confiabilidad del sistema. Se ha documentado la selección de componentes básicos para el funcionamiento, además de los componentes de control, alimentación y seguridad que permiten la generación de hidrógeno de forma segura. Mediante la investigación teórica y mediciones realizadas en equipos de investigación en Alemania, se han establecido como parámetros de funcionamientos para la celda completa $21\ V$ y $40\ A$ a una temperatura de electrolito de $60°C$.

Se han desarrollado una variedad de pruebas de funcionamiento y seguridad de los componentes y del equipo completo, con el fin de verificar el correcto funcionamiento de componentes, sensores, actuadores y líneas de control. Del mismo modo se han documentado las fallas principales ocurridas en el transcurso del diseño, construcción y pruebas de funcionamientos, fallas que se han podido solucionar en su mayoría.

Se presenta una variedad de equipos de generación de electrólisis acoplados a tecnologías como energía solar fotovoltaica, energía eólica, micro hidroeléctricas, compresión y almacenamiento, celdas de combustible para sector residencia y electro movilidad. Estas tecnologías acopladas a la generación de hidrógeno mediante electrólisis

pueden ser consideradas para el desarrollo de un banco de pruebas para estudios sobre energías renovables no convencionales.

Este equipo electrolizador, que genera $100\ Nlts\ H_2/h$, puede ser acoplado a una celda de combustible cuya potencia ronda los 150 W, una celda de combustible de esta potencia requiere aproximadamente $114\ Nlts/h$ de hidrógeno a una presión entre $0{,}4$ a $0{,}7$ bar. Los requerimientos del sistema incluyen el flujo continuo de hidrógeno con una pureza del $99{,}95\%$, la eficiencia de la celda de combustible es de 48%. La integración de este tipo de tecnologías a una celda de electrólisis es relativamente sencilla, debido a que los requerimientos de una celda de combustible pueden ser entregados por el sistema electrolizador fabricado.

5 Recomendaciones

La fabricación del electrolizador fue realizada con la consideración de poder acceder a todos los componentes de forma sencilla, por lo que existe mucho espacio muerto en el interior, como recomendación ante la fabricación de una nueva versión es realizar una mejor gestión del espacio interior, disminuyendo el volumen y peso del equipo. Como consecuencia de esta mejora el equipo podrá ser trasladado de forma más segura y eficiente.

La celda de electrólisis tiene deficiencias cuando opera mucho tiempo a altas presiones, la más evidente es la fuga de electrolito entre las cámaras de generación y placas, debido al mal sello de los empaques de goma. Se recomienda hacer una investigación mas exhaustiva sobre sellos para ambiente con PH básico y ambientes ricos en hidrogeno y oxígeno.

El sistema de control de la fuente de poder, válvulas de control y monitorización de gases se realiza con una placa de control Arduino, debido a la complejidad de la operación, control de la fuente y diversos tipos de señales de entrada y salida, este dispositivo trabaja a máxima capacidad, por lo que la operación se ve afectada en algunos casos. Se recomienda controlar este tipo de equipos con PLC (Programmable logic controller) o similar.

Se recomienda realizar un integración tecnológica con dos etapas extras, la primera de compresión y almacenamiento de hidrógeno, para luego realizar una etapa final de

conversión energética a electricidad mediante una celda de combustible, con posibilidad de uso doméstico, comercial, industrial y/o movilidad.

6 Bibliografía

[1] Flores, A.. (octubre 7, 2013). FONDEF ID16110105 Check out our work. Octubre 20, 2018, de Hirschmann Renewable Energy Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Federico Santa María Technical University Sitio web: http://ler.usm.cl/index.php/portfolio_page/art-week-2014-malmo/

[2] International Energy Agency. (2018). Electricity Statistics Detailed, comprehensive annual data on electricity and heat. Novienbre 15, 2018, de IEA Sitio web: https://www.iea.org/statistics/electricity/

[3] Burgos, I.. (2015). Combustibles fósiles vs energías renovables. Noviembre 30, 2018, de energiasrenovablesinfo Sitio web: http://www.energiasrenovablesinfo.com/general/combustibles-fosiles-vs-energias-renovables/

[4] Vázquez, R., Salinas, F.. (2018). Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile. Alemania: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

[5] Priego, A. P., & Vargas, Á. A. (2009). Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno (Vol. 2). Retrieved from e-REdING- Biblioteca Electrónica Universidad de Sevilla: http://bibing. us. es/proyectos/abreproy/30127/fichero/Cap% C3% ADtulo.

[6] Barrientos Castillo, K. Y., Meza, B., & Jhocelú, S. (2013). Producción de hidrógeno por electrólisis alcalina utilizando electrocatalizadores de aleaciones ternarias.

[7] McPhy. (2019). Produce your hydrogen on-site, on demand, according to your specifications. enero 20, 2019, de McPhy Sitio web: https://mcphy.com/en/our-products-and-solutions/electrolyzers/

[8] Hidrógena. (2013). Generadores de hidrógeno. enero 20, 2019, de Hidrógena Sitio web: http://www.hidrogena.com/es/14-generadores-de-hidrogeno

[9] Hidrogenics. (2019). Industrial Hydrogen Generators. enero 20, 2019, de Hidrogenics Sitio web: https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/

[10] Siemens. (2019). Hydrogen Solutions. enero 20, 2019, de Siemens Sitio web: https://new.siemens.com/global/en/products/energy/renewable-energy/hydrogen-solutions.html

[11] Castillo, D. (2016). Selección electrolito y condiciones para su uso.

[12] Domínguez, J. (2002, March). Celdas de combustible. In Anales de mecánica y electricidad (pp. 14-18).

[13] Bermúdez Torres,Juan M, Hernández Nazario, Lissethy. Revista Científico-Popular de Cubasolar, abril-junio 2011, no.54, p.42-44. ISSN:1028-9925

[14] Modica, G., Giuffre, L., Montoneri, E., Pozzi, V., Tempesti, E. Electrolytic separators from asbestos cardboard: a flexible technique to obtain reinforced diaphragms or ion-selective membranes. Int. J. Hydrogen Energy 8 (1983), 419–435.

[15] Gab-Jin, Hwang, Soo-Gon, Lim, Soo-Yeon, Bong, Cheol-Hwi, Ryu, Ho-Sang, Choi. Preparation of anion exchange membrane using polyvinyl chloride (PVC) for alkaline water electrolysis. Korean J. Chem. Eng 32 (2015), 1896-1901.

[16] Zirfon Perl UTP 500, Separator membrane for alkaline water electrolysis, AFGA.

[17] Terraflex. (2013). Manguera reforzada con alambre. marzo 2, 2019, de Terraflex hoses and compounds Sitio web: http://es.terraflexhoses.com/terra_product/manguera-reforzada-con-alambre/

[18] Ulleberg, Ø. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. International journal of hydrogen energy, 28(1), 21-33.

[19] Hug W, Divisek J. Mergel J. Seeger W and Steeb H (1992). Highly efficient advanced alkaline electrolyzer for solar operation. Int. Journal Hydrogen Energy, 17,699-705.

[20] Moseley, P. T., & Garche, J. (Eds.). (2014). Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing. Newnes.

[21] Nafion NR211 nad NR212 Ion Exchange Materials, Solution Cast Menbranes, FuelCellStore.

[22] PTFE Líquido, WÜRTH.

[23] Ulleberg, Ø., Ito, H., Maack, M. H., Ridell, B., Miles, S., Kelly, N., ... Stewart, E. (2007). Hydrogen Demonstration Project Evaluations: FINAL REPORT for IEA – International Energy Agency HIA – Hydrogen Implementing Agreement Task 18: Integrated Systems Evaluation Subtask B: Demonstration Project Evaluations. [S.I.].

[24] González Besa, Y. (2016). Producción de hidrógeno a partir de energía solar fotovoltaica. Análisis de sensibilidad de parámetros de diseño.

[25] Ulleberg, Ø., Nakken, T., & Ete, A. (2010). The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. International Journal of Hydrogen Energy, 35(5), 1841-1852.

[26] Shigley, J. E. (2006). Diseño en ingenieria mecanica 8va edicion.

[27] Manual de instrucciones Mass-View ® Series, Bronkhorst ®.

[28] Cau, G., Cocco, D., Petrollese, M., Kær, S. K., & Milan, C. (2014). Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system. Energy Conversion and Management, 87, 820-831.

7 Anexos

Anexo A. Hoja de datos de seguridad NCh 2245 Of. 2015 hidrógeno

Versión / Edición:	Fecha:	Eml: W. Pérez	Rev.: P. Vera	Apr.: R. Keller
HDS-H2-00	25/01/2016			

HIDRÓGENO

SECCIÓN 1 - IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y DE LA EMPRESA

Identificación del Producto Químico:	Hidrógeno
Nombres Comunes:	Hidrógeno
Simbología Química del Producto:	H_2
Usos Recomendados:	Industrial en general.
Restricciones de Uso:	Sin datos disponibles.
Nombre del Proveedor:	INDURA S.A.
Dirección:	Las Américas Nº 585, Cerrillos, Santiago, Chile
Teléfono:	(56-22) 5303000
Teléfono de emergencia:	800 800 505
Fax:	(56-22) 530 33 33
E-mail:	info@indura.net
Web:	www.indura.net

Nota: Este documento es aplicable a todos los grados de pureza.

SECCIÓN 2 - IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Clasificación Según NCh 382: Clase 2, División 2.1

Distintivo Según NCh 2190:

Clasificación Según SGA: Gases Inflamables – Categoría 1 H220: Gas extremadamente inflamable. Gases a presión – Gas disuelto. H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

Etiqueta SGA:

Señal Según NCh 1411/4:

Clasificación Específica:	No aplicable.
Distintivo Específico:	No aplicable.
Descripción de Peligros:	Gas extremadamente inflamable, el cual se encuentra sometido a presión. En caso de calentamiento puede explotar.
Descripción de Peligros Específicos:	No aplicable.
Otros Peligros:	Gas a alta presión. Puede causar asfixia rápida. Extremadamente inflamable. Puede formar mezclas explosivas con el aire. Existe riesgo de ignición inmediata y de explosión en mezclas con aire en concentraciones que exceden al límite de inflamabilidad. Evitar inhalación de gases.

SECCIÓN 3 - COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia Pura:

Denominación Química Sistemática:	Hidrógeno
Nombre Común o Genérico:	Hidrógeno
Número CAS:	1333-74-0
Rango de Concentración:	100% (proporción de volumen).

Mezcla de Gases: No aplicable.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Denominación Química Sistemática:			
Nombre Común o Genérico:			
Número CAS:			
Rango de Concentración:			

SECCIÓN 4 - MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: En caso de dificultad respiratoria, suministrar oxígeno. Salir al aire libre. Si la respiración es dificultosa o se detiene, proporcione respiración asistida. Si se detiene el corazón, el personal capacitado debe comenzar de inmediato la reanimación cardio-pulmonar. Buscar asistencia médica inmediata.

Contacto con la piel: No aplicable.

Contacto con los ojos: No aplicable.

Ingestión: La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

Efectos agudos previstos: La exposición a atmósferas con deficiencia de oxígeno puede causar los siguientes síntomas: Vértigo, Salivación excesiva, Nauseas, Vómitos, Perdida de movilidad, Inconciencia y puede llegar hasta la muerte.

Efectos retardados previstos: Sin datos disponibles.

Síntomas/efectos más importantes: La exposición a atmósferas con deficiencia de oxígeno puede causar los siguientes síntomas: Vértigo, Salivación excesiva, Nauseas, Vómitos, Perdida de movilidad, Inconciencia y puede llegar hasta la muerte.

Protección de quienes brindas los primeros auxilios: Se sugiere que en actuaciones frente a emergencias se cuente con monitor de atmósferas, esto para evaluar la presencia de gases inflamables (Hidrógeno) y las concentraciones de oxígeno. Si las concentraciones de oxígeno son inferiores a un 19,5 %, se recomienda que el personal de emergencia este dotado de equipos de respiración autónomo.

Notas para el médico tratante: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 5 - MEDIDAS PARA COMBATE CONTRA INCENDIOS

Agentes de extinción: Usar medios de extinción adecuados para el incendio.

Agentes de extinción inapropiados: Dióxido de carbono (CO_2).

Productos que se forman en la combustión y degradación térmica: La combustión incompleta puede formar monóxido de carbono.

Peligros específicos asociados: Ante la exposición al calor intenso o fuego, el cilindro se vaciara rápidamente y/o se romperá violentamente. Mantener los envases y los alrededores fríos con agua pulverizada. Inflamable por electricidad estática. Arde con llama invisible. El gas es más ligero que el aire y puede acumularse en las partes altas de espacios cerrados.

Métodos específicos de extinción: Extinguir el incendio solo cuando la fuga de gas pueda ser detenida. Si es posible, cortar la fuente de gas y dejar que el incendio se extinga por sí solo. Se puede producir la reignición espontánea. Alejarse del envase y enfriarlo con agua desde un lugar protegido. Mantener fríos los cilindros adyacentes mediante pulverización con gran cantidad de agua hasta que el fuego se extinga por sí solo.

Precauciones para el personal de emergencia: En espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma. Vestimenta y equipo de protección estándar para bomberos.

Equipos de protección personal para el combate del fuego: Vestimenta estándar de bomberos (incluido equipo de respiración autónomo).

SECCIÓN 6 - MEDIDAS PARA CONTROLAR DERRAMES O FUGAS

Precauciones personales: Evacuar el personal a zonas seguras. Retirar todas las fuentes de ignición del área.

Equipo de protección: Vestimenta estándar de bomberos (incluido equipo de respiración autónomo).

Procedimiento de emergencia: Nunca entrar en un espacio confinado u otra área, donde la concentración del gas inflamable es superior al 10% de su nivel inferior de inflamabilidad. Ventilar la zona y realizar monitoreos atmosféricos permanentes.

Precauciones para la protección del medio ambiente: No descargar dentro de ningún lugar donde se acumulación pudiera ser peligrosa. No debe liberarse en el medio ambiente. Impedir nuevos escapes o derrames de forma segura.

Métodos y material para la contención: Ventilar la zona. Acercarse cuidadosamente a las áreas sospechosas de haber fugas.

Métodos y materiales de limpieza: No aplicable.

Medidas adicionales de prevención de desastres: Aumentar la ventilación en el área de liberación del gas y controlar las concentraciones. Si la fuga tiene lugar en el cilindro o en su válvula, llamar al número de emergencia de Indura S.A. Si la fuga tiene lugar en la instalación del usuario, cerrar la válvula del cilindro, ventear la presión con seguridad y purgar el cilindro con gas inerte antes de intentar realizar reparaciones.

SECCIÓN 7 - MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación

Precauciones para la manipulación segura: Puede incendiarse si la válvula se abre en contacto con el aire. Disponer de ventilación adecuada. Proteger los cilindros contra daños físicos; no tirar, no rodar, ni dejar caer. La temperatura en las áreas de almacenamiento no debe exceder los 50ºC. Los gases comprimidos o líquidos criogénicos sólo deben ser manipulados por personas con experiencia y debidamente capacitadas. Antes de usar el producto, identificarlo leyendo la etiqueta. Antes del uso del producto se deben conocer y entender sus características así como los peligros relacionados con las mismas. En caso de que existan dudas sobre los procedimientos del uso correcto de un gas concreto, ponerse en contacto con el proveedor. No quitar ni alterar las etiquetas entregadas por el proveedor para la identificación del contenido de los cilindros. Para la manipulación de cilindros se deben usar, también para distancias cortas, carretillas destinadas al transporte de cilindros. No quitar el protector de seguridad de la válvula hasta que el cilindro no esté sujeto a la pared, mesa de trabajo o plataforma, y listo para su uso. Para quitar las protecciones demasiado apretadas u oxidadas usar una llave inglesa ajustable. Antes de conectar el envase comprobar la adecuación de todo el sistema de gas, especialmente los indicadores de presión y las propiedades de los materiales. Antes de conectar el envase para su uso, asegurar que se ha protegido contra la aspiración de retorno del sistema al envase. Asegurar que todo el sistema de gas es compatible con las indicaciones de presión y con los materiales de construcción. Asegurarse antes del uso de que no existan fugas en el sistema de gas. Usar los equipos de regulación y de presión adecuados en todos los envases cuando el gas es transferido a sistemas con una presión menor que la

del envase. No insertar nunca un objeto (p.ej. llave, destornillador, palanca, etc.) a las aberturas del protector de la válvula. Tales acciones pueden deteriorar la válvula y causar una fuga. Abrir la válvula lentamente. Si el usuario ve cualquier problema durante la manipulación de la válvula del cilindro, debe interrumpir su uso y ponerse en contacto con el proveedor. Cerrar la válvula del envase después de cada uso y cuando esté vacío, incluso si está conectado al equipo. Nunca intente reparar o modificar las válvulas de un envase o las válvulas de seguridad. Debe de comunicarse inmediatamente al proveedor el deterioro de cualquier válvula. Cerrar la válvula después de cada uso y cuando esté vacía. Sustituir los protectores de válvulas o tapas y los protectores de los envases tan pronto como el envase sea desconectado. No someta los recipientes a sacudidas mecánicas anormales. Nunca intente levantar el cilindro/envase por el protector de la válvula. No usar envases como rodillos o soportes, o para cualquier otro propósito que no sea contener el gas, tal como ha sido suministrado. Nunca crear un arco voltaico en un cilindro de gas comprimido o hacer que el cilindro forme parte de un circuito eléctrico. No fumar durante la manipulación de productos o cilindros Nunca re-comprimir el gas o la mezcla de gases sin consultarlo previamente con el proveedor. Nunca intente transferir gases de un cilindro / envase a otro. Usar siempre válvulas anti-retorno en las tuberías. Purgar el aire del sistema antes de introducir el gas. Al devolver el cilindro instalar el tapón protector de la válvula o tapón protector de fugas. Nunca usar fuego directo o calentadores eléctricos para aumentar la presión en el envase. Los envases no deben ser sometidos a temperaturas superiores a los 50ºC (122ºF). Asegúrese que el equipo está adecuadamente conectado a tierra.

Medidas operacionales y técnicas: Los recipientes deben ser separados en el área de almacenamiento según las distintas categorías (p.e.: inflamable, tóxico, etc.) y conforme a la reglamentación local. Manténgase lejos de materias combustibles. Todo equipo eléctrico en áreas de almacenamiento debe ser compatible con los materiales inflamables almacenados. Los envases con gases inflamables deben ser almacenados lejos de otros materiales combustibles. Donde sea necesario, los envases de oxígeno y oxidantes deben ser separados de los gases inflamables por una separación resistente al fuego.

Otras precauciones: Información no disponible.

Prevención del contacto: Información no disponible.

Almacenamiento

Condiciones para el almacenamiento seguro: Los envases deben ser almacenados en un lugar especialmente construido y bien ventilado, preferiblemente al aire libre. Tener en cuenta todas las leyes y requisitos locales sobre el almacenamiento de envases. Los envases almacenados deben ser controlados periódicamente en cuanto a su estado general y fugas. Proteger los envases almacenados al aire libre contra la corrosión y las condiciones atmosféricas extremas. Los envases no deben ser almacenados en condiciones que puedan acelerar la corrosión. Los envases deben ser almacenados en posición vertical y asegurados para prevenir las caídas. Las válvulas de los contenedores deben estar bien cerradas y donde sea necesario, las salidas de las válvulas deben ser protegidas con tapas. Los protectores de las válvulas o tapas deben estar en su sitio. Mantener los envases herméticamente cerrados en un lugar fresco y bien ventilado. Los envases deben ser almacenados en lugares libres de riesgo de incendio y lejos de fuentes del calor e ignición. Los cilindros llenos se deben separar de los vacíos. No permitir que la temperatura de almacenamiento alcance los 50ºC (122 °F). Prohibido fumar en las zonas de almacenamiento o durante la manipulación de productos o los envases. Colocar señales "Se prohíbe fumar y usar el fuego abierto" en las áreas de almacenamiento. La cantidad almacenada de gases inflamables o tóxicos debe ser mínima. Devolver los envases una vez que se desocupen.

Medidas técnicas: Cumplir con legislación y normativa aplicable al almacenamiento de sustancias peligrosas.

Sustancias y mezclas incompatibles: Manténgase lejos de materiales combustibles. Todo equipo eléctrico en áreas de almacenamiento debe ser compatible con los materiales inflamables almacenados. Los envases con gases inflamables deben ser almacenados lejos de otros materiales combustibles. Donde sea necesario, los envases de oxígeno y comburentes deben estar separados de los gases inflamables por una separación resistente al fuego.

Material de envase y /o embalaje: El Hidrógeno se almacena de forma segura dentro de cilindros.

SECCIÓN 8 - CONTROL DE EXPOSICIÓN - PROTECCIÓN PERSONAL

Parámetros para control (Aplicable a Chile)

Límite permisible ponderado (LPP): No disponible.

Límite permisible absoluto (LPA): No disponible.

Límite permisible temporal (LPT): No disponible.

Elementos de Protección Personal

Protección respiratoria: Las concentraciones altas que pueden causar asfixia son inflamables y no se aconseja permanecer expuesto a ellas.

Protección de manos: Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases.

Protección de Ojos: Se aconseja el uso de gafas de seguridad durante la manipulación de cilindros.

Protección de la piel y el cuerpo: Considerar en casos especiales el uso de prendas de seguridad resistentes a llama. Además durante la manipulación de cilindros se aconseja el uso de zapatos con protección al metatarso.

Medidas de ingeniería: Es necesario garantizar la ventilación natural o a prueba de explosiones de manera que el gas inflamable no alcance su límite inferior de explosión.

SECCIÓN 9 - PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
Estado físico	Gas comprimido. Gas incoloro.	
Olor	Sin olor.	
pH	No aplicable	
Temperatura de fusión	-259,2	°C
Temperatura de ebullición	-259,9	°C
Punto de inflamación	No aplicable.	°C
Límite superior e inferior de explosión e inflamabilidad	75 % (limite superior de inflamabilidad) 4 % (limite inferior de inflamabilidad)	V
Presión de vapor	No aplicable.	Psia a 20°C
Solubilidad en agua	No disponible	
Densidad relativa del vapor	0,07 (aire=1)	

Temperatura de auto ignición	560	°C	
Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles		
Viscosidad	No aplicable		
Peso molecular	2,02	g/mol	
Densidad	Sin datos disponibles		
Volumen específico	11,9830	M3/kg a 21 °C	

SECCIÓN 10 - ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química: Estable en condiciones normales.

Reacciones peligrosas: Consulte las secciones sobre posibilidad de reacciones peligrosas y/o materiales incompatibles.

Condiciones que se deben evitar: Los cilindros no deben ser expuestos a fuentes de calor, llamas o chispas. Puede formar mezclas inflamables con el aire y agentes oxidantes.

Materiales incompatibles: Comburentes, incluido el oxígeno.

Productos de la descomposición peligrosos: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 11 - INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda (LD50 y LC50): No hay datos disponibles.

Irritación/ corrosión cutánea: Sin datos disponibles.

Lesiones oculares graves / irritación ocular: Sin datos disponibles.

Sensibilización respiratoria o cutánea: A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la perdida de la consciencia o de la movilidad. La victima puede no haberse dado cuenta de la asfixia. La asfixia puede causar la inconsciencia tan inadvertida y rápidamente que la victima puede ser incapaz de protegerse.

Mutagenicidad de células reproductoras/in vitro: No hay datos disponibles sobre este producto.

Carcinogenicidad: Sin datos disponibles.

Toxicidad reproductiva: Sin datos disponibles.

Peligro de inhalación: Puede causar efectos anestésicos. A elevadas concentraciones puede causar asfixia. Los síntomas pueden incluir la perdida de la consciencia o de la movilidad. La victima puede no haberse dado cuenta de la asfixia.

Distribución: Sin datos disponibles.

Patogenicidad e infecciosidad aguda: Sin datos disponibles.

Neurotoxicidad: Sin datos disponibles.

Inmunotoxicidad: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 12 - INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Ecotoxicidad (EC, IC y LC): No hay datos disponibles sobre este producto.

Persistencia y degradabilidad: Sin datos disponibles.

Potencial bioacumulativo: No hay datos disponibles sobre este producto.

Movilidad en suelo: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 13 - CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL

Residuos: Contactar al proveedor si es necesaria información y asesoramiento. Devolver el producto no usado al proveedor en el cilindro original. No descargar en áreas donde hay riesgo de que se forme una mezcla explosiva con el aire. El gas residual debe ser quemado a través de un quemador adecuado que disponga de anti retroceso de llama.

Envase y embalaje contaminados: Devolver el cilindro al proveedor.

Material contaminado: Devolver el cilindro al proveedor.

SECCIÓN 14 - INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

	Modalidad de transporte		
	Terrestre	**Marítima**	**Aérea**
Regulaciones	ADR – DS 298	IMDG	IATA
Número UN	1049	1001	1001
Designación oficial de transporte	Hidrógeno Comprimido	Hydrogen, Compressed	Hidrógeno Comprimido
Clasificación de peligro primario NU	2.1	2.1	2.1
Clasificación de peligro secundario NU	-	-	-
Grupo de embalaje/envase	-	-	-
Peligros ambientales	No	No	No
Precauciones especiales	Inflamable	Inflamable	Inflamable

SECCIÓN 15 - INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Regulaciones Nacionales (Chile):

D.S. 298 "Reglamenta Transporte de Cargas Peligrosas por Calles y Caminos".
D.S. 43 "Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas".
NCh 2190Of. 2003 "Sustancias peligrosas – Marcas para información de riesgos".
NCh 382Of.2013 "Terminología y clasificación general de las sustancias peligrosas".

Regulaciones Internacionales:

Nota: El receptor debería verificar la posible existencia de regulaciones locales aplicables al producto químico.

SECCIÓN 16 - OTRAS INFORMACIONES

Control de cambios: En cada revisión se consignara si es adecuado el control de cambios.

Abreviaturas y acrónimos:
LC 50 – Concentración letal para el 50% de una población de pruebas.
LD 50 – Dosis letal para el 50% de una población de pruebas (dosis letal media).
NU – Organización de las Naciones Unidas.
ADR – Acuerdo relativo al transporte terrestre.
IMDG – Código marítimo internacional para el transporte de sustancias peligrosas.
IATA – Asociación internacional de transporte aéreo.

Referencias:

La información aquí entregada fue obtenida de fuentes confiables. Sin embargo, dado que la interpretación de esta información y el uso de los productos escapan del control del proveedor, INDURA S.A. no asume responsabilidad alguna por este concepto, recayendo ésta en forma exclusiva del usuario, quien deberá determinar las condiciones de uso seguro del producto.

Algunos peligros son aquí descritos, sin embargo, no se garantiza que sean los únicos que existan, por lo que al manipular los productos se debe proceder con cautela y preocupación.

INDURA S.A. de acuerdo a su sistema de gestión y a la normativa nacional vigente, revisará y actualizará las Hojas de Datos de Seguridad cada 3 años.

Anexo B. Hoja de datos de seguridad NCh 2245 Of. 2015 oxígeno

Versión / Edición:	Fecha:	Eml: W. Pérez	Rev.: P. Vera	Apr.: R. Keller
HDS-OXIG-00	04/02/2016			

OXÍGENO

SECCIÓN 1 - IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y DE LA EMPRESA

Identificación del Producto Químico:	Oxígeno
Nombres Comunes:	Oxígeno
Simbología Química del Producto:	O2
Usos Recomendados:	Industrial en general, aplicaciones en área salud.
Restricciones de Uso:	Sin datos disponibles.
Nombre del Proveedor:	INDURA S.A.
Dirección:	Las Américas Nº 585, Cerrillos, Santiago, Chile
Teléfono:	(56-22) 5303000
Teléfono de emergencia:	800 800 505
Fax:	(56-22) 530 33 33
E-mail:	info@indura.net
Web:	www.indura.net

Nota: Este documento es aplicable a todos los grados de pureza.

SECCIÓN 2 - IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Clasificación Según NCh 382: Clase 2, División 2.2

Distintivo Según NCh 2190:

Clasificación Según SGA: Gases oxidantes – categoría 1 H270: Puede provocar o agravar un incendio; comburente.
Gases a presión – categoría H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión en caso de calentamiento.

Etiqueta SGA:

Señal Según NCh 1411/4:

Clasificación Específica:	No aplicable.
Distintivo Específico:	No aplicable.
Descripción de Peligros:	Gas a alta presión.
Descripción de Peligros Específicos:	Almacenar en lugar bien ventilado.
Otros Peligros:	Gas oxidante. Acelera la combustión vigorosamente. Mantener lejos de aceites, lubricantes y materiales combustibles. Puede reaccionar violentamente con materiales combustibles. Gas a alta presión. Utilice un dispositivo para evitar el reflujo en las tuberías. Utilizar solo en un equipo acorde a la presión del contenedor. Cerrar la válvula después de cada uso y cuando este vacía. Lea y siga las instrucciones de la hoja de datos de seguridad antes de su uso.

SECCIÓN 3 - COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Sustancia Pura:

Denominación Química Sistemática:	Oxígeno
Nombre Común o Genérico:	Oxígeno
Número CAS:	7782-44-7
Rango de Concentración:	100% (proporción de volumen).

Mezcla de Gases: No aplicable.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Denominación Química Sistemática:			
Nombre Común o Genérico:			
Número CAS:			
Rango de Concentración:			

SECCIÓN 4 - MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación: Retirar a la víctima a un área no contaminada llevando colocado el equipo de respiración autónoma. Mantener a la víctima caliente y en reposo. Si la respiración es dificultosa o se detiene, proporcione respiración asistida. En caso de complicaciones médicas, trasladar a centro asistencial de salud más cercano.

Contacto con la piel: No aplicable.

Contacto con los ojos: No aplicable.

Ingestión: La ingestión no está considerada como una vía potencial de exposición.

Efectos agudos previstos: Sin datos disponibles.

Efectos retardados previstos: Sin datos disponibles.

Síntomas/efectos más importantes: Sin datos disponibles.

Protección de quienes brindas los primeros auxilios: Se sugiere que en actuaciones frente a emergencias se cuente con monitor de atmósferas, esto para evaluar la presencia de concentraciones de oxígeno.

Notas para el médico tratante: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 5 - MEDIDAS PARA COMBATE CONTRA INCENDIOS

Agentes de extinción: Se pueden utilizar todos los medios de extinción conocidos.

Agentes de extinción inapropiados: Sin datos disponibles.

Productos que se forman en la combustión y degradación térmica: Sin datos disponibles.

Peligros específicos asociados: Ante la exposición al calor intenso o fuego, el cilindro se vaciará rápidamente y/o se romperá violentamente. Oxidante. Mantiene la combustión vigorosamente. Puede reaccionar violentamente con materiales combustibles. Algunos materiales no inflamables en el aire, pueden ser inflamables con la presencia de un oxidante. Alejarse del envase y enfriarlo con agua desde un lugar protegido. Mantener los cilindros fríos mediante pulverización de gran cantidad de agua hasta que el fuego se apague. Si es posible, detener el caudal de producto.

Métodos específicos de extinción: Alejarse del envase y enfriarlo con agua desde un lugar protegido. Mantener fríos los cilindros adyacentes mediante pulverización con gran cantidad de agua hasta que el fuego se extinga por sí solo.

Precauciones para el personal de emergencia: En espacios confinados utilizar equipos de respiración autónoma. Vestimenta y equipo de protección estándar para bomberos.

Equipos de protección personal para el combate del fuego: Vestimenta estándar de bomberos (incluido equipo de respiración autónomo).

SECCIÓN 6 - MEDIDAS PARA CONTROLAR DERRAMES O FUGAS

Precauciones personales: Ventilar la zona y realizar monitoreo de atmósferas antes de ingresar al área.

Equipo de protección: Vestimenta estándar de bomberos (incluido equipo de respiración autónomo).

Procedimiento de emergencia: Nunca entrar en un espacio confinado u otra área, donde la concentración de oxígeno pueda ser inferior al 19,5% o superior al 23%. Frente a emergencias con gases además de monitorear la atmósfera circundante, se recomienda utilizar en todo momento protección respiratoria del tipo equipo de respiración autónomo.

Precauciones para la protección del medio ambiente: Impedir nuevos escapes o derrames de forma segura.

Métodos y material para la contención: Ventilar la zona. Acercarse cuidadosamente a las áreas sospechosas de haber fugas.

Métodos y materiales de limpieza: Como la sustancia se encuentra en estado gaseoso, solo se recomienda ventilar la zona.

Medidas adicionales de prevención de desastres: Aumentar la ventilación en el área de liberación del gas y controlar las concentraciones. Si la fuga tiene lugar en el cilindro o en su válvula, llamar al número de emergencia de Indura S.A. Si la fuga tiene lugar en la instalación del usuario, cerrar la válvula del cilindro, ventear la presión con seguridad y purgar el cilindro con gas inerte antes de intentar realizar reparaciones.

SECCIÓN 7 - MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación

Precauciones para la manipulación segura: Los cilindros deben ser almacenados en posición vertical con el tapón de protección de la válvula colocado y bien protegido contra caídas o vuelcos. Usar el equipo indicado para cilindros a presión. Proteger los cilindros contra daños físicos; no tirar, no rodar, ni dejar caer. La temperatura en las áreas de almacenamiento no debe exceder los 50ºC. Los gases comprimidos o líquidos criogénicos sólo deben ser manipulados por personas con experiencia y debidamente capacitadas. Antes de usar el producto, identificarlo leyendo la etiqueta. Antes del uso del producto se deben conocer y entender sus características así como los peligros relacionados con las mismas. En caso de que existan dudas sobre los procedimientos del uso correcto de un gas concreto, ponerse en contacto con el proveedor. No quitar ni alterar las etiquetas entregadas por el proveedor para la identificación del contenido de los cilindros. Para la manipulación de cilindros se deben usar, también para distancias cortas, carretillas destinadas al transporte de cilindros. No quitar el protector de seguridad de la válvula hasta que el cilindro no esté sujeto a la pared, mesa de trabajo o plataforma, y listo para su uso. Para quitar las protecciones demasiado apretadas u oxidadas usar una llave inglesa ajustable. Antes de conectar el envase comprobar la adecuación de todo el sistema de gas, especialmente los indicadores de presión y las propiedades de los materiales. Antes de conectar el envase para su uso, asegurar que se ha protegido contra la aspiración de retorno del sistema al envase. Asegurar que todo el sistema de gas es compatible con las indicaciones de presión y con los materiales de construcción. Asegurarse antes del uso de que no existan fugas en el sistema de gas. Usar los equipos de regulación y de presión adecuados en todos los envases cuando el gas es transferido a sistemas con una presión menor que la del envase. No insertar nunca un objeto (p.ej. llave, destornillador, palanca, etc.) a las aberturas del protector de la válvula. Tales acciones pueden deteriorar la válvula y causar una fuga. Abrir la válvula lentamente. Si el usuario ve cualquier problema durante la manipulación de la válvula del cilindro, debe interrumpir su uso y ponerse en contacto con el proveedor. Cerrar la válvula del envase después de cada uso y cuando esté vacío,

incluso si está conectado al equipo. Nunca intente reparar o modificar las válvulas de un envase o las válvulas de seguridad. Debe de comunicarse inmediatamente al proveedor el deterioro de cualquier válvula. Cerrar la válvula después de cada uso y cuando esté vacía. Sustituir los protectores de válvulas o tapones y los protectores de los envases tan pronto como el envase sea desconectado. No someta los recipientes a sacudidas mecánicas anormales. Nunca intente levantar el cilindro / envase por el protector de la válvula. No usar envases como rodillos o soportes, o para cualquier otro propósito que no sea contener el gas, tal como ha sido suministrado. Nunca crear un arco voltaico en un cilindro de gas comprimido o hacer que el cilindro forme parte de un circuito eléctrico. No fumar durante la manipulación de productos o cilindros Nunca re-comprimir el gas o la mezcla de gases sin consultarlo previamente con el proveedor. Nunca intente transferir gases de un cilindro / envase a otro. Usar siempre válvulas anti-retorno en las tuberías. Al devolver el cilindro instalar el tapón protector de la válvula o tapón protector de fugas. Nunca usar fuego directo o calentadores eléctricos para aumentar la presión en el envase. Los envases no deben ser sometidos a temperaturas superiores a los 50ºC (122ºF).

Medidas operacionales y técnicas: Los recipientes deben ser almacenados en un lugar especialmente construido y bien ventilado, preferiblemente al aire libre. Se deben almacenar los envases llenos de tal manera que los más antiguos sean usados en primer lugar. Tener en cuenta todas las leyes y requisitos locales sobre almacenamiento de sustancias peligrosas. Proteger los envases almacenados al aire libre contra la corrosión y las condiciones atmosféricas extremas. Cumplir con la legislación local relacionada con el almacenamiento de sustancias peligrosas.

Otras precauciones: Información no disponible.

Prevención del contacto: Información no disponible.

Almacenamiento

Condiciones para el almacenamiento seguro: Los envases deben ser almacenados en un lugar especialmente construido y bien ventilado, preferiblemente al aire libre. Tener en cuenta todas las leyes y requisitos locales sobre el almacenamiento de envases. Los envases almacenados deben ser controlados periódicamente en cuanto a su estado general y fugas. Proteger los envases almacenados al aire libre contra la corrosión y las condiciones atmosféricas extremas. Los envases no deben ser almacenados en condiciones que puedan acelerar la corrosión. Los envases deben ser almacenados en posición vertical y asegurados para prevenir las caídas. Las válvulas de los contenedores deben estar bien cerradas y donde sea necesario, las salidas de las válvulas deben ser protegidas con tapones. Los protectores de las válvulas o tapones deben estar en su sitio. Mantener los envases herméticamente cerrados en un lugar fresco y bien ventilado. Los envases deben ser almacenados en lugares libres de riesgo de incendio y lejos de fuentes del calor e ignición. Los cilindros llenos se deben separar de los vacíos. No permitir que la temperatura de almacenamiento alcance los 50ºC (122 ºF). Prohibido fumar en las zonas de almacenamiento o durante la manipulación de productos o los envases. Colocar señales "Se prohíbe fumar y usar el fuego abierto" en las áreas de almacenamiento. La cantidad almacenada de gases inflamables o tóxicos debe ser mínima. Devolver los envases una vez que se desocupen.

Medidas técnicas: Cumplir con legislación y normativa aplicable al almacenamiento de sustancias peligrosas.

Sustancias y mezclas incompatibles: El Oxígeno puede presentar incompatibilidades si se almacena junto con materiales inflamables o combustibles, se recomienda mantenerlos almacenados a una distancia mínima de 6 metros o construir muros con resistencia al fuego de 120 minutos entre los almacenamientos.

Material de envase y /o embalaje: El Oxígeno se almacena de forma segura dentro de cilindros, el gas se encuentra sometido a presión.

SECCIÓN 8 - CONTROL DE EXPOSICIÓN - PROTECCIÓN PERSONAL

Parámetros para control (Aplicable a Chile)

Límite permisible ponderado (LPP): No disponible.

Límite permisible absoluto (LPA): No disponible.

Límite permisible temporal (LPT): No disponible.

Elementos de Protección Personal

Protección respiratoria: Para casos de actuación frente a emergencias, se recomienda utilizar equipo de respiración autónomo.

Protección de manos: Usar guantes de trabajo al manejar envases de gases.

Protección de Ojos: Se aconseja el uso de gafas de seguridad durante la manipulación de cilindros.

Protección de la piel y el cuerpo: Durante el manejo de cilindros se recomienda la utilización de zapatos con protección en el metatarso.

Medidas de ingeniería: Asegurar una ventilación adecuada, especialmente en locales cerrados.

SECCIÓN 9 - PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
Estado físico	Gas comprimido. Gas incoloro.	
Olor	Ninguno(a)	
pH	No aplicable	
Temperatura de fusión	-219	°C
Temperatura de ebullición	-183	°C
Punto de inflamación	No aplicable	
Límite superior e inferior de explosión e inflamabilidad	No aplicable	
Presión de vapor	No aplicable	
Solubilidad en agua	0,039	g/l
Densidad relativa del vapor	1,1	Aire = 1
Temperatura de autoignición	Sin datos disponibles	
Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles	
Viscosidad	No aplicable	
Peso molecular	32	g/mol
Densidad relativa	0,0013	g/cm3 a 21°C
Volumen específico	0,7540	M3/kg a 21 °C

SECCIÓN 10 - ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química: Estable en condiciones normales.

Reacciones peligrosas: Sin datos disponibles.

Condiciones que se deben evitar: Sin datos disponibles.

Materiales incompatibles: Materiales inflamables y combustibles, materiales orgánicos; evitar grasas, aceites.

Productos de la descomposición peligrosos: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 11 - INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda (LD50 y LC50): No hay datos disponibles.

Irritación/ corrosión cutánea: Sin datos disponibles.

Lesiones oculares graves / irritación ocular: Sin datos disponibles.

Sensibilización respiratoria o cutánea: Sin datos disponibles.

Mutagenicidad de células reproductoras/in vitro: No hay datos disponibles sobre este producto.

Carcinogenicidad: Sin datos disponibles.

Toxicidad reproductiva: Sin datos disponibles.

Peligro de inhalación: Sin datos disponibles.

Distribución: Sin datos disponibles.

Patogenicidad e infecciosidad aguda: Sin datos disponibles.

Neurotoxicidad: Sin datos disponibles.

Inmunotoxicidad: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 12 - INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Ecotoxicidad (EC, IC y LC): No hay datos disponibles sobre este producto.

Persistencia y degradabilidad: Sin datos disponibles.

Potencial bioacumulativo: No hay datos disponibles sobre este producto.

Movilidad en suelo: Sin datos disponibles.

SECCIÓN 13 - CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL

Residuos: Contactar al proveedor si es necesaria información y asesoramiento. Devolver el producto no usado al proveedor en el cilindro original.

Envase y embalaje contaminados: Devolver el cilindro al proveedor.

Material contaminado: Devolver el cilindro al proveedor.

SECCIÓN 14 - INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

	Modalidad de transporte		
	Terrestre	**Marítima**	**Aérea**
Regulaciones	ADR – DS 298	IMDG	IATA
Número UN	1072	1072	1072
Designación oficial de transporte	Oxígeno comprimido	Oxygen, Compressed	OXYGEN, COMPRESSED
Clasificación de peligro primario NU	2.2	2.2	2.2
Clasificación de peligro secundario NU	-	-	-
Grupo de embalaje/envase	-	-	-
Peligros ambientales	No	No	NO
Precauciones especiales	-	-	-

SECCIÓN 15 - INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Regulaciones Nacionales (Chile):

D.S. 298 "Reglamenta Transporte de Cargas Peligrosas por Calles y Caminos".

D.S. 43 "Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas".

NCh 2190Of. 2003 "Sustancias peligrosas – Marcas para información de riesgos".

NCh 382Of.2013 "Terminología y clasificación general de las sustancias peligrosas".

Regulaciones Internacionales:

Nota: El receptor debería verificar la posible existencia de regulaciones locales aplicables al producto químico.

SECCIÓN 16 - OTRAS INFORMACIONES

Control de cambios: En cada revisión se consignara si es adecuado el control de cambios.

Abreviaturas y acrónimos:

LC 50 – Concentración letal para el 50% de una población de pruebas.

LD 50 – Dosis letal para el 50% de una población de pruebas (dosis letal media).

NU – Organización de las Naciones Unidas.

ADR – Acuerdo relativo al transporte terrestre.

IMDG – Código marítimo internacional para el transporte de sustancias peligrosas.
IATA – Asociación internacional de transporte aéreo.

Referencias:

La información aquí entregada fue obtenida de fuentes confiables. Sin embargo, dado que la interpretación de esta información y el uso de los productos escapan del control del proveedor, INDURA S.A. no asume responsabilidad alguna por este concepto, recayendo ésta en forma exclusiva del usuario, quien deberá determinar las condiciones de uso seguro del producto. Algunos peligros son aquí descritos, sin embargo, no se garantiza que sean los únicos que existan, por lo que al manipular los productos se debe proceder con cautela y preocupación. INDURA S.A. de acuerdo a su sistema de gestión y a la normativa nacional vigente, revisara y actualizara las Hojas de Datos de Seguridad cada 3 años.

Anexo C. Hoja de seguridad Hidróxido de potasio KOH

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
HIDROXIDO DE POTASIO

Rótulo NFPA

Rótulos UN

Fecha Revisión: 15/08/2012

SECCIÓN 1: PRODUCTO QUÍMICO E IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

Nombre del Producto:	HIDROXIDO DE POTASIO
Sinónimos:	Hidrato de potasio; Potasa caústica; Lejía.
Fórmula:	KOH
Número Interno:	
Número UN:	1813
Clase UN:	8 9.2
Compañía que desarrolló la Hoja de Seguridad:	Esta hoja de datos de seguridad es el producto de la recopilación de información de diferentes bases de datos desarrolladas por entidades internacionales relacionadas con el tema. La alimentación de la información fue realizada por el Consejo Colombiano de Seguridad, Carrera 20 No. 39 - 62. Teléfono (571) 2886355. Fax: (571) 2884367. Bogotá, D.C. - Colombia.
Teléfonos de Emergencia:	

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE INGREDIENTES

COMPONENTES

Componente	CAS	TWA	STEL	%
Hidróxido de Potasio	1310-58-3	N.R. (ACGIH 2004)	C 2 mgm3 (ACGIH 2004)	85-100

Uso: Elaboración de jabón; blanqueador; elaboración de ácido oxálico y sales potásicas; reactivo en química analítica; medicina (caústico); cerillas; grabados; en alimentos, en forma de álcali; electrólito en baterías alcalinas de almacenaje y algunas pilas de combustible; absorbente de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno; reactivo de laboratorio.

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

VISIÓN GENERAL SOBRE LAS EMERGENCIAS:

Apariencia: Sólido blanco a amarillo. ¡Peligro! Corrosivo. Reacciona con el agua. Nocivo si se ingiere. Causa severas quemaduras de piel y ojos. Produce quemaduras severas de tracto respiratorio y digestivo. El producto es destructivo para todos los tejidos corporales.

EFECTOS ADVERSOS POTENCIALES PARA LA SALUD:

Inhalación: El polvo o niebla, puede causar síntomas en el tracto respiratorio, posiblemente incluye tos, sofocación, dolor en la nariz, boca y garganta. Lesiones en el tabique nasal y quemaduras en las membranas mucosas. Si las cantidades inhaladas son grandes, se puede presentar edema pulmonar, a menudo con un periodo latente de 5 a 72 horas. Los síntomas pueden incluir tensión en el pecho, disnea, salivación espumosa, cianosis y desvanecimiento.

Ingestión: Quemaduras severas en los labios, lengua, boca, garganta, esófago y estómago, puede producir vómito con sangre y mucosa, severo dolor abdominal. La caída rápida de la presión sanguínea indica efecto gástrico y perforación del esófago. El daño del estómago y esófago puede avanzar por 2 o 3 semanas. La muerte puede ocurrir por peritonitis después de un mes de la ingestión. Cuando el paciente se recupera de los efectos inmediatos, contracción del esófago puede ocurrir semanas, meses o varios años después.

Piel:	El contacto directo con solución al 4% puede causar sensación irritación severa en horas siguientes al contacto. La extensión del daño depende de la duración del contacto. Si no es removido de la piel puede causar úlceración. Se presentan dolor y quemaduras en general.
Ojos:	El contacto directo con el sólido o soluciones pueden causar dolor, quemaduras posiblemente severas. El grado de daño depende de la concentración y duración del contacto, puede causar edema, destrucción y opacificación del epitelio corneal e iritis.
Efectos crónicos:	Inhalación: Dependiendo de la concentración y duración de la exposición, repetida o prolongada puede causar inflamación y cambios ulcerativos en la boca y posiblemente malestares gastrointestinales y bronquiales, daño pulmonar. Piel: Contacto repetido o prolongado puede causar dermatitis. Ojos: Contacto repetido o prolongado en bajos niveles puede causar conjuntivitis. Ingestión: N.R.

SECCIÓN 4: PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS

Inhalación:	Trasladar al aire fresco. Si no respira administrar respiración artificial (En lo posible evitar el método boca a boca). Si respira con dificultad suministrar oxígeno. Mantener la víctima abrigada y en reposo. Buscar atención médica inmediatamente.
Ingestión:	Lavar la boca con agua. Si está consciente, suministrar abundante agua. No inducir el vómito, si éste se presenta inclinar la víctima hacia adelante. Si está inconsciente no dar a beber nada. Buscar atención médica inmediatamente.
Piel:	Retirar la ropa y calzado contaminados. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón, mínimo durante 15 minutos. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica inmediatamente.
Ojos:	Lavar con abundante agua, mínimo durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Si la irritación persiste repetir el lavado. Buscar atención médica.
Nota para los médicos:	Después de proporcionar los primeros auxilios, es indispensable la comunicación directa con un médico especialista en toxicología, que brinde información para el manejo médico de la persona afectada, con base en su estado, los síntomas existentes y las características de la sustancia química con la cual se tuvo contacto.

SECCIÓN 5: MEDIDAS EN CASO DE INCENDIO

Punto de inflamación (ºC): N.A

Temperatura de autoignición (ºC): N.A

Límites de inflamabilidad (%V/V): N.R.

Peligros de incendio y/o explosión:

No es combustible, pero el contacto con agua o humedad puede generar suficiente calor para encender los materiales combustibles.
Los materiales corrosivos en contacto con metales y agua pueden generar hidrógeno el cual es inflamable. Los contenedores pueden explotar al someterse a calentamiento. Durante un incendio se forman gases tóxicos y corrosivos.

Medios de extinción:

Polvo químico seco, dióxido de carbono, agua en forma de rocío o espuma. Elegir el agente adecuado según el tipo de fuego de los alrededores. No se recomienda emplear agua en grandes chorros.

Productos de la combustión:

Óxidos de potasio.

Precauciones para evitar incendio y/o explosión:

Evitar la exposición al calor o altas temperaturas. Proteger contra la humedad y ventilar el área. Evitar el contacto con materiales incompatibles. Mantener alejado de productos combustibles. Los equipos eléctricos, de iluminación y ventilación deben ser a prueba de corrosión.

Instrucciones para combatir el fuego:

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Retirar los contenedores expuestos al fuego si es posible.

SECCIÓN 6: MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL

Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Estar a favor del viento. Usar equipo de protección personal. Ventilar el área. Eliminar toda fuente de ignición. Usar agua en forma de rocío para reducir la acumulación de vapores. El material sólido puede barrerse y recogerse. Neutralizar los residuos y lavar el área con agua. Las soluciones pueden ser neutralizadas con ácidos como el acético o clorhídrico. Lave hacia un drenaje para su recuperación y tratamiento final. Lave la zona con abundante agua.

SECCIÓN 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Manejo: Usar siempre protección personal así sea corta la exposición o la actividad que realice con el producto. No permita que el material alcance temperaturas superiores a los 360ºC. Mantener estrictas normas de higiene, no fumar, ni comer en el sitio de trabajo. Usar las menores cantidades posibles. Conocer en dónde está el equipo para la atención de emergencias. Leer las instrucciones de la etiqueta antes de usar el producto. Rotular los recipientes adecuadamente. No usar agua en el área de trabajo. Si va a hacer reaccionar con agua se recomienda adicionar lentamente el hidróxido de potasio al agua y no lo contrario, dado que se puede reaccionar violentamente.

Almacenamiento: Lugares ventilados, frescos, secos y señalizados. Lejos de fuentes de calor e ignición. Separado de materiales incompatibles. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados. Inspeccione periódicamente las áreas de almecenamiento para detectar daños y fugas en los contenedores. Almacenar los contenedores por debajo del nivel de los ojos en caso de ser posible. Restringir el acceso a personas no autorizadas. Almacenar en el área correspondiente a corrosivos. Mantener protegido de la humedad.

SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCIÓN PERSONAL

Controles de ingeniería: Ventilación local y general, para asegurar que la concentración no exceda los límites de exposición ocupacional. Considerar la posibilidad de encerrar el proceso. Garantizar el control de las condiciones del proceso. Disponer de duchas y estaciones lavaojos.

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Protección de los ojos y rostro: Utilizar gafas protectoras contra productos químicos y/o un protector de cara completo donde el contacto sea posible.

Protección de piel: Guantes, overol, delantal o protector de calzado según la operación que se esté realizando.
Materiales resistentes: Buenos: Caucho de butilo, caucho natural, neopreno, PVC, nitrilo, neopreno/estireno/butadieno caucho (SBR), SBR. Regulares/malos: Viton, poliuretano.

Protección respiratoria: Utilizar protector de cara completo, con respirador con filtro para partículas o polvo, dependiendo de los límites de exposición durante la jornada laboral.

Protección en caso de emergencia: Equipo de respiración autónomo (SCBA) y ropa de protección TOTAL.

SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Apariencia, olor y estado físico:	Sólido en fragmentos, terrones, barras, lentejas o escamas con fractura cristalina o rombohedral, sin olor, de color blanco - amarillo claro, delicuescente.
Gravedad específica (Agua=1):	2.044
Punto de ebullición (ºC):	1320
Punto de fusión (ºC):	360
Densidad relativa del vapor (Aire=1):	N.A.
Presión de vapor (mm Hg):	1 mm Hg / 719ºC
Viscosidad (cp):	N.R.
pH:	13.5 (Solución 0.1 M).
Solubilidad:	Apreciable en agua (>10%). Soluble en alcohol y glicerina, insoluble en amoniaco y éter.

SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad química: Estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manipulación. Absorbe

rapidamente humedad y dióxido de carbono del aire.

Condiciones a evitar: Calor, llamas, fuentes de ignición, contacto con el agua e incompatibles.

Incompatibilidad con otros materiales: La reacción con agua puede generar suficiente calor para encender materiales combustibles. Con ácidos fuertes: puede ocurrir reacción violenta con liberación de calor y presión que podrá explotar el contenedor. Con metales: su reacción puede producir hidrógeno que es inflamable. Con materiales combustibles, materiales orgánicos, zinc, aluminio, estaño, dióxido de carbono; componentes organohalógenados: puede reaccionar para formar espontáneamente componentes combustibles. Con anhidrido maléico y componentes orgánicos nitro y cloro puede reaccionar explosivamente.

Productos de descomposición peligrosos: Hidrógeno, Monóxido de carbono, Óxidos de potasio.

Polimerización peligrosa: No ocurrirá.

SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

DL50 (oral, rata) = 273 mg/Kg
DL50 (oral, rata macho) = 365 mg/Kg; severa irritación en piel de humano = 50 mg/24 horas
DL50 (piel, conejo) = 5 mg/24 horas.
El producto se ha clasificado como no carcinogeno por ACGIH, NIOSH, ATP e IARC. Es investigado por efectos mutagénicos.
No hay información disponible sobre , teratogenicidad, neurotoxicidad y efectos reproductivos.

SECCIÓN 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Hidróxido de potasio: TLm: 80 ppm/Pez mosquito/ 24 hr./ Agua dulce.
No existe información relacionada con efectos al medio ambiente, bioacumulación en los seres vivos, demanda de oxigeno, biodegradabilidad y persistencia en el ambiente.

SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES DE DISPOSICIÓN

Debe tenerse presente la legislación ambiental local vigente relacionada con la disposición de residuos para su adecuada eliminación.

SECCIÓN 14: INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Etiqueta blanco y negro con el número 8 y la leyenda "Corrosivo". No transporte con sustancias explosivas, sólidos que liberan gases inflamables en contacto con el agua, comburentes, peróxidos orgánicos, materiales radiactivos, ni alimentos.
Etiqueta blanca y negra con el número 9 y la leyenda: Sustancia peligrosa para el medio ambiente.

SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

1. Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito Terrestre. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

2. Decreto 1609 del 31 de Julio de 2002, Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.

3. Ministerio de Transporte. Resolución número 3800 del 11 de diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

4. Los residuos de esta sustancia están considerados en: Ministerio de Salud. Resolución 2309 de 1986, por la cual se hace necesario dictar normas especiales complementarias para la cumplida ejecución de las leyes que regulan los residuos sólidos y concretamente lo referente a residuos especiales.

SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES

La información relacionada con este producto puede no ser válida si es usado en combinación con otros materiales o en otros procesos. Es responsabilidad del usuario la interpretación y la aplicación de esta información para su uso particular.

Bibliografía

Anexo D. Nomenclatura completa de válvula y sensores en líneas de control.

Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción

ET98	Transmisor de tensión de la fuente de poder	FVA102	Válvula de flujo gas oxígeno
IT98	Transmisor de corriente de la fuente de poder	FVC102	Válvula de flujo electrolito oxígeno
TZ99	Ventilador del gabinete	LHS102	Sensor de nivel alto estanque oxígeno
TZ100	Ventilador de la celda	LLS102	Sensor de nivel bajo estanque oxígeno
FC100	Fuente de poder / Controlador de flujo de la celda	TT102	Sensor de temperatura línea oxígeno
TTA100	Sensor de temperatura A de la celda	TE102	Transmisor de tensión de sensor TT102
TTB100	Sensor de temperatura B de la celda	PT102	Sensor de presión línea oxígeno
TEA100	Transmisor de tensión de sensor TTA100	XT102	Sensor de presencia de hidrógeno en línea de oxígeno
TEB100	Transmisor de tensión de sensor TTB100	PVA102	Válvula motorizada línea oxígeno
PI101	Manómetro estanque hidrógeno	PVB102	Válvula solenoide línea oxígeno controlado
FVA101	Válvula de flujo gas hidrógeno	PVZ102	Motor válvula PVA102
FVC101	Válvula de flujo electrolito hidrógeno	FT103	Flujómetro salida de hidrógeno
LHS101	Sensor de nivel alto estanque hidrógeno	MT103	Sensor de humedad salida de hidrógeno
LLS101	Sensor de nivel bajo estanque hidrógeno	PT103	Sensor de presión salida de hidrógeno
TT101	Sensor de temperatura línea hidrógeno	FVA103	Válvula manual salida de hidrógeno
MT101	Sensor de humedad línea hidrógeno	FVB103	Válvula anti-retorno salida de hidrógeno
PT101	Sensor de presión línea hidrógeno	PVA104	Válvula solenoide escape hidrógeno
PVA101	Válvula motorizada línea hidrógeno	PVB104	Válvula manual escape hidrógeno
PVB101	Válvula solenoide línea hidrógeno	PVC104	Válvula solenoide escape hidrógeno controlado
PVZ101	Motor válvula PVA101	PVA105	Válvula solenoide escape oxígeno
PI102	Manómetro estanque oxígeno	PVB105	Válvula manual escape oxígeno

Anexo E. Factores de par de torsión.

Tabla 12: Factores de par de torsión K para empleo en Ecuación 14.

Condición del perno	K
Sin recubrimiento, acabado negro	0,30

Galvanizado	0,20
Lubricado	0,18
Con recubrimiento de cadmio	0,16
Con Anti-Seize Bowman	0,12
Con tuercas Bowman-Grip	0,09

Anexo F. Esfuerzos mecánicos en tapas.

El diagrama de cuerpo libre de las tapas se presenta en la Figura 49, tomando en cuenta la fuerza calculada anteriormente que resisten los pernos de sujeción, se considera está carga sobre las tapas.

$$F_i = 15141\ lbf = 6868\ kgf \tag{30}$$

Se consideran las cargas distribuidas generadas por los pernos en compresión (q_1) y la sección de las cámaras de generación de acrílico (q_2), el realizar la sumatoria de fuerzas en el diagrama de cuerpo libre se obtiene la relación entre las cargas distribuídas.

$$q_1 = \frac{Fuerza\ aplicada}{Distancia\ aplicada} = \frac{6868\ kgf}{40\ mm} = 171{,}7\ kgf/mm \tag{31}$$

$$q_1 * 40 * 2 = q_2 * 30 * 2 \rightarrow q_2 = \frac{4}{3} q_1 \tag{32}$$

Rango de aplicación: $0 \leq x \leq 10\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: V = 0 \tag{33}$$

$$\sum M: M = 0 \tag{34}$$

Rango de aplicación: $10 \leq x \leq 50\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: -V - q_1(x - 10) = 0 \tag{35}$$

$$V = -q_1(x - 10) \tag{36}$$

$$\sum M: M + q_1(x-10)\frac{(x-10)}{2} = 0 \tag{37}$$

$$M = -\frac{q_1}{2}(x^2 - 20x + 100) \tag{38}$$

Rango de aplicación: $50 \leq x \leq 80\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: -V - q_1 * 40 + q_2(x-50) = 0 \tag{39}$$

$$V = \frac{4q_1}{3}(x-80) \tag{40}$$

$$\sum M: M + q_1 * 40(x-30) - q_2(x-50)\frac{(x-50)}{2} = 0 \tag{41}$$

$$M = \frac{2}{3}q_1(x^2 - 160x + 4300) \tag{42}$$

Rango de aplicación: $80 \leq x \leq 320\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: -V - q_1 * 40 + q_2 * 30 = 0 \tag{43}$$

$$V = 0 \tag{44}$$

$$\sum M: M + q_1 * 40(x-30) - q_2 * 30(x-65) = 0 \tag{45}$$

$$M = -q_1 * 1400 \tag{46}$$

Rango de aplicación: $320 \leq x \leq 350\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: -V - q_1 * 40 + q_2 * 30 + q_2(x-320) = 0 \tag{47}$$

$$V = \frac{4q_1}{3}(x-320) \tag{48}$$

$$\sum M: M + q_1 * 40(x-30) - q_2 * 30\ (x-65) - q_2(x-320)\frac{(x-320)}{2} = 0 \tag{49}$$

$$M = \frac{2}{3} q_1 (x^2 - 640x + 100300) \tag{50}$$

Rango de aplicación: $350 \leq x \leq 390\ mm$

*Diagrama

$$\sum F: -V - q_1 * 40 + q_2 * 30 + q_2 * 30 - q_1(x - 350) = 0 \tag{51}$$

$$V = -q_1(x - 390) \tag{52}$$

$$\sum M: M + q_1 * 40(x - 30) - q_2 * 30\ (x - 65) - q_2 * 30(x - 335) + q_1(x - 350)\frac{(x - 350)}{2} = 0 \tag{53}$$

$$M = \frac{-q_1}{2}(x^2 - 780x + 152100) \tag{54}$$

Rango de aplicación: $390 \leq x \leq 400\ mm$

*Diagrama

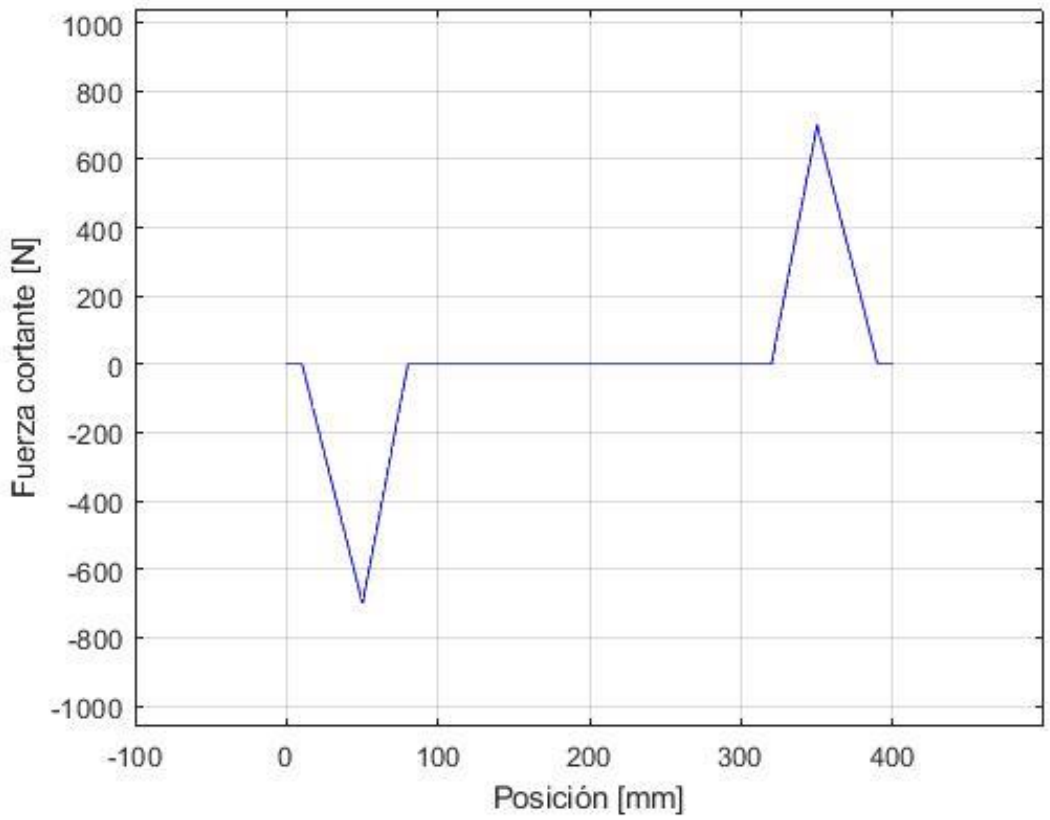
$$\sum F: -V - q_1 * 40 + q_2 * 30 + q_2 * 30 - q_1 * 40 = 0 \tag{55}$$

$$V = 0 \tag{56}$$

$$\sum M: M + q_1 * 40(x - 30) - q_2 * 30\ (x - 65) - q_2 * 30(x - 335) + q_1 * 40(x - 370) = 0 \tag{57}$$

$$M = 0 \tag{58}$$

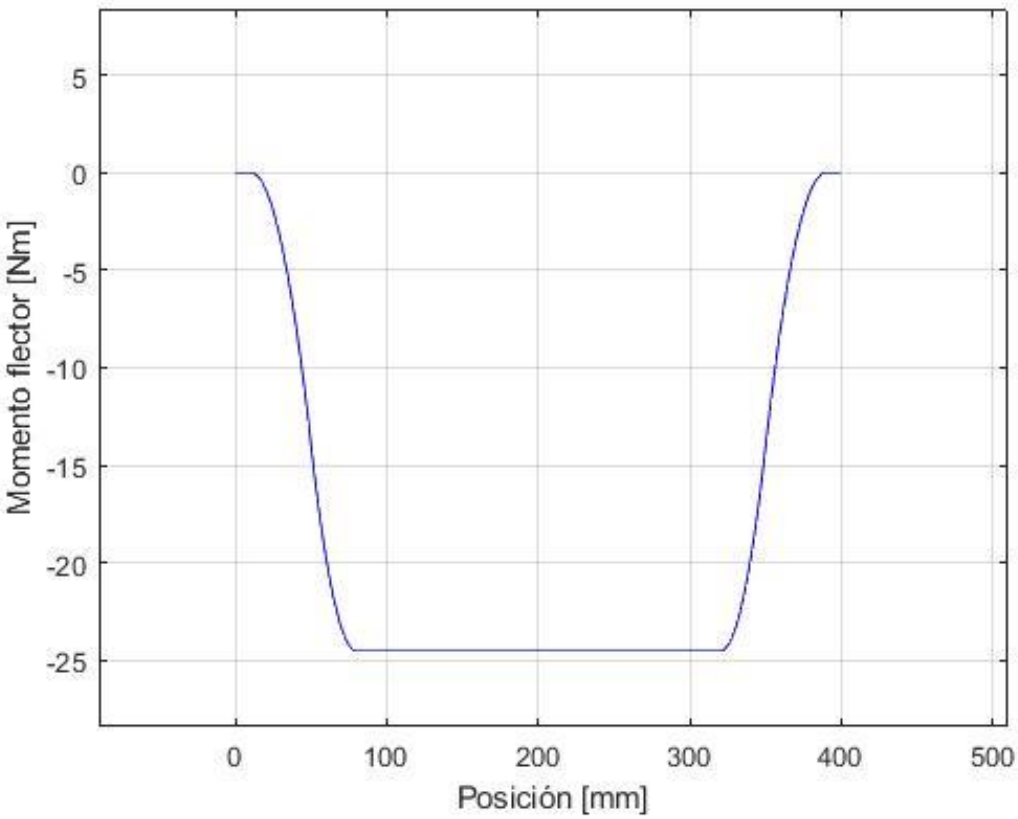
Diagrama fuerza cortante



Máximo valor:

- $-700\ N; x = 50\ mm$
- $700\ N; x = 350\ mm$

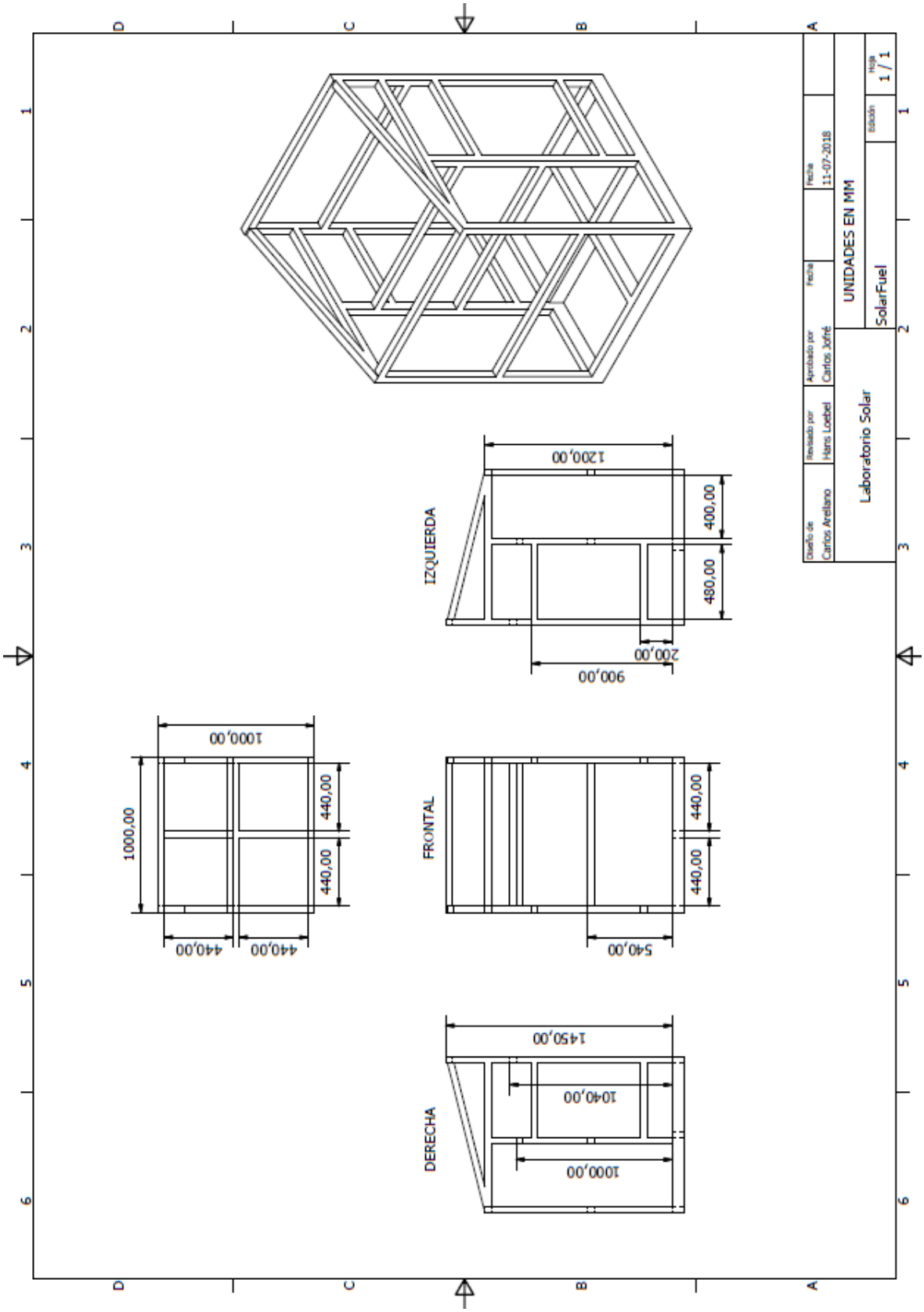
Diagrama momento flector

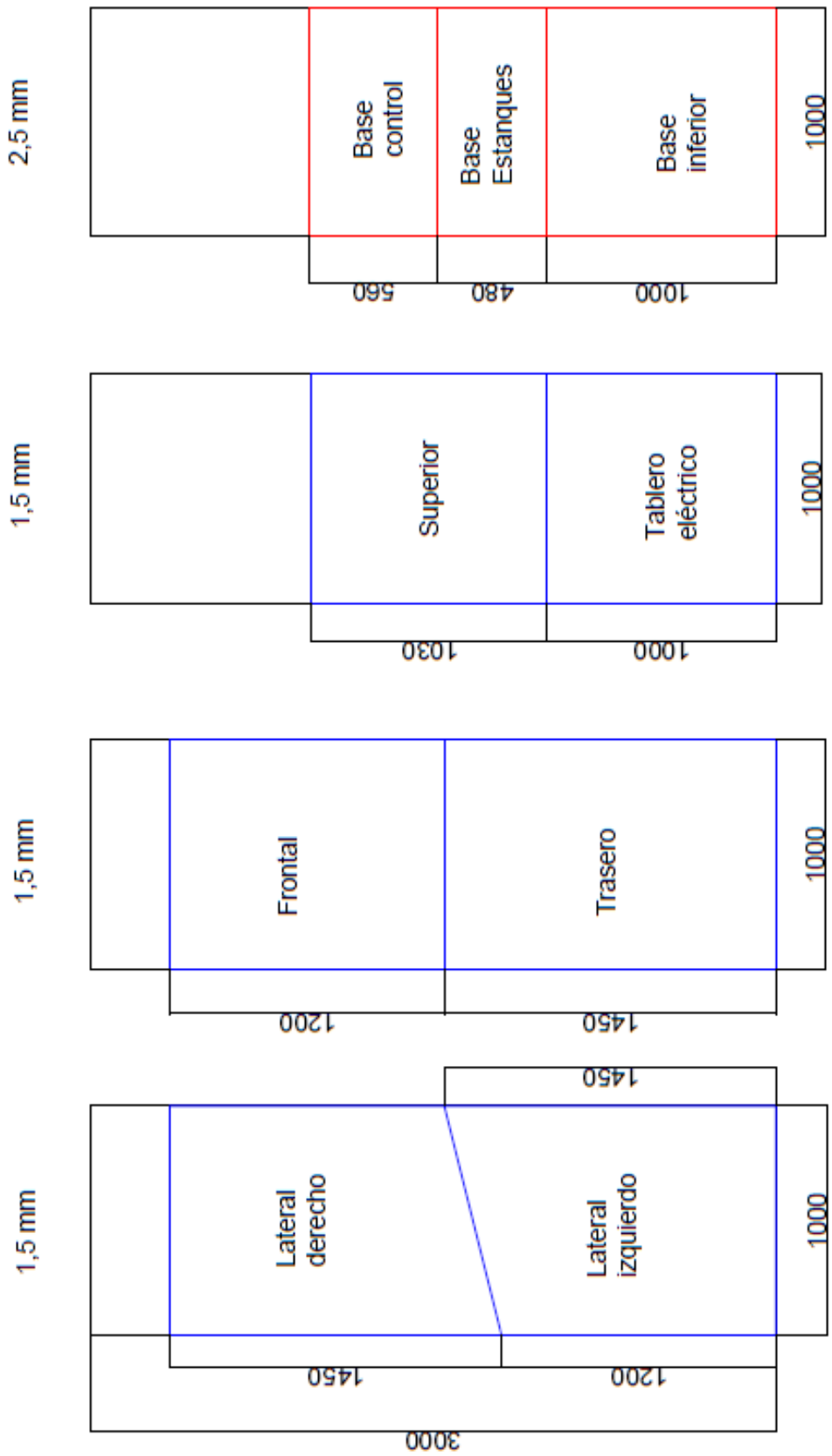


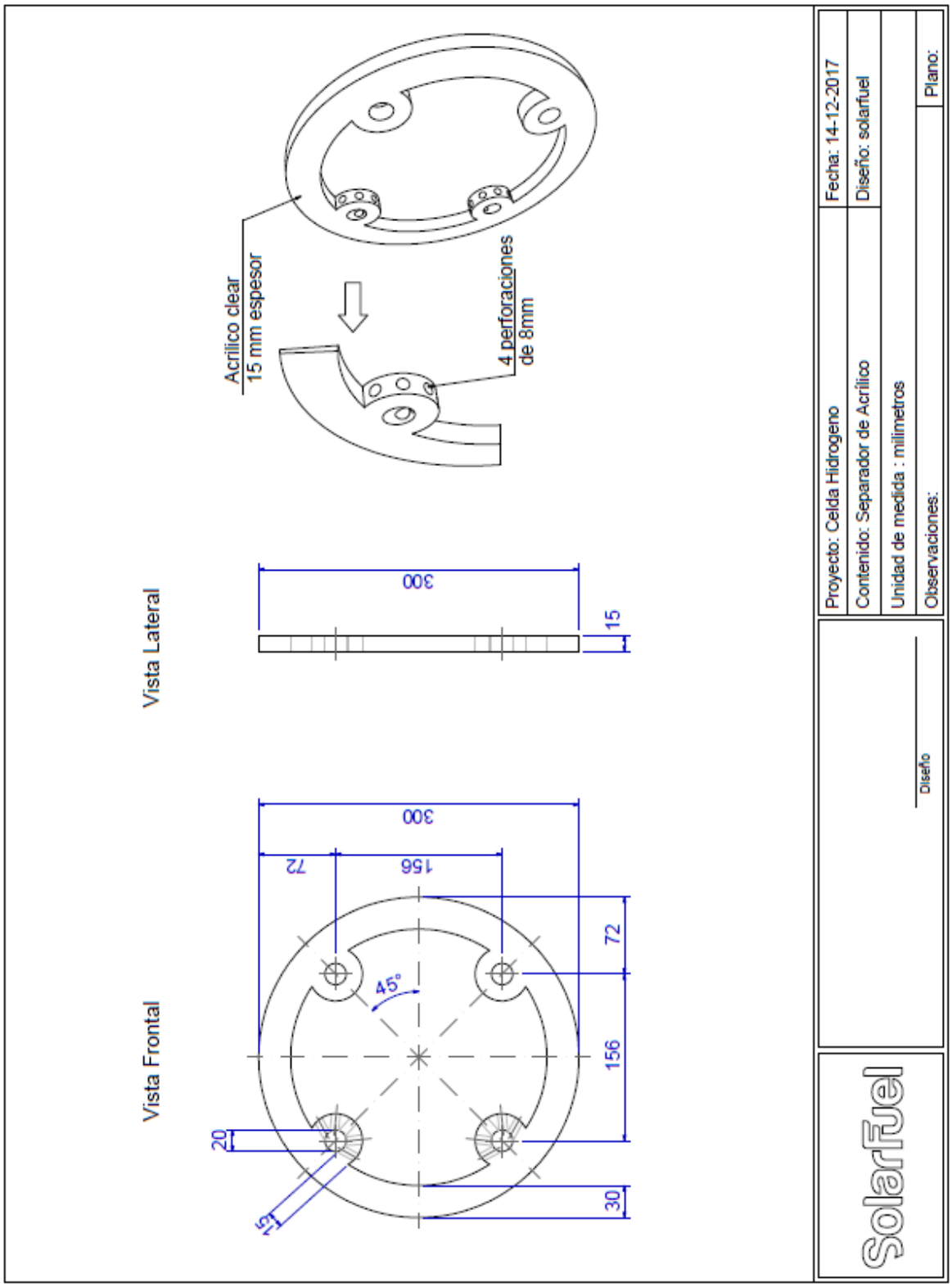
Máximo valor:

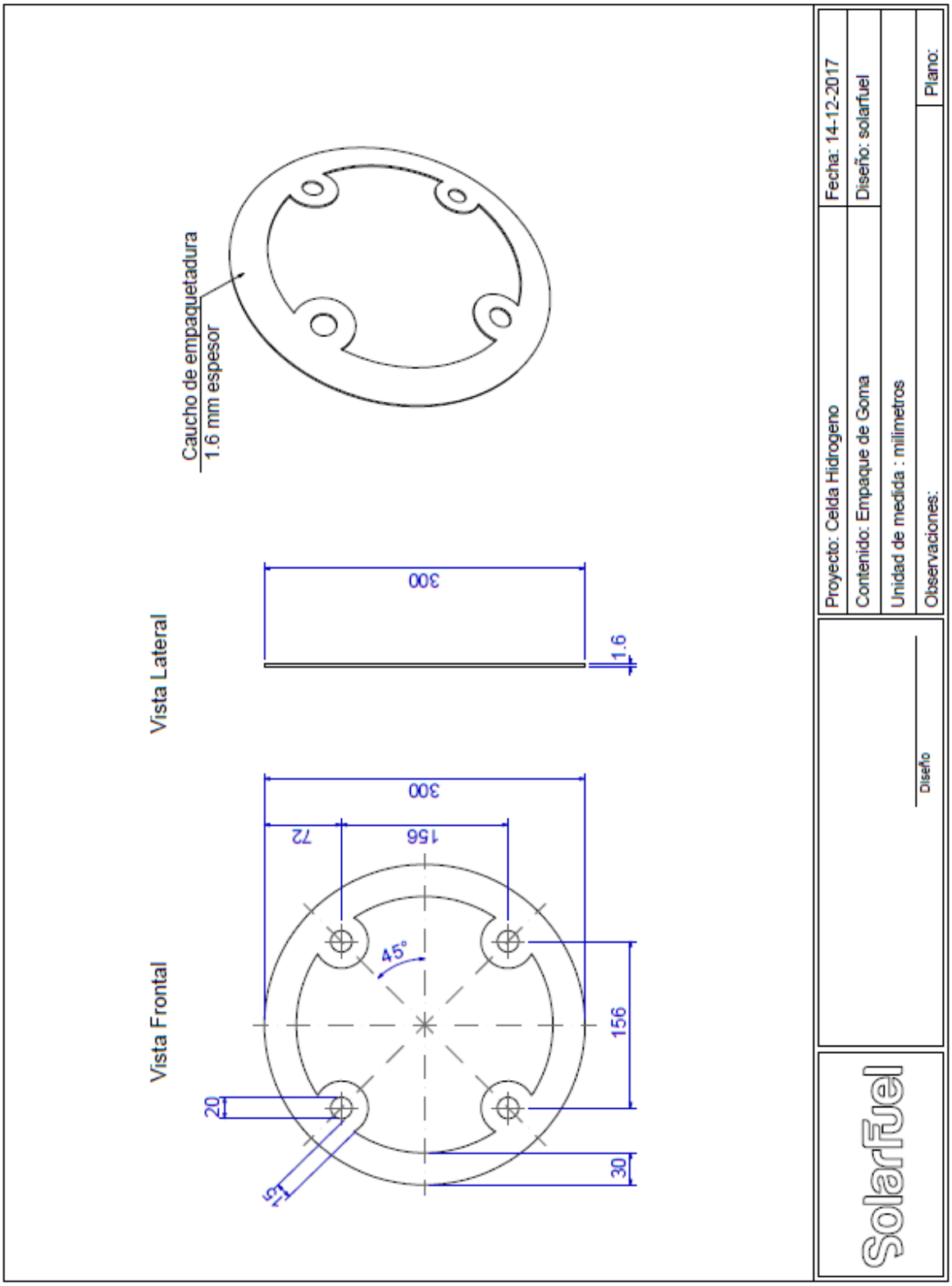
- $-24{,}5\ Nm;\ 80 \leq x \leq 320\ mm$

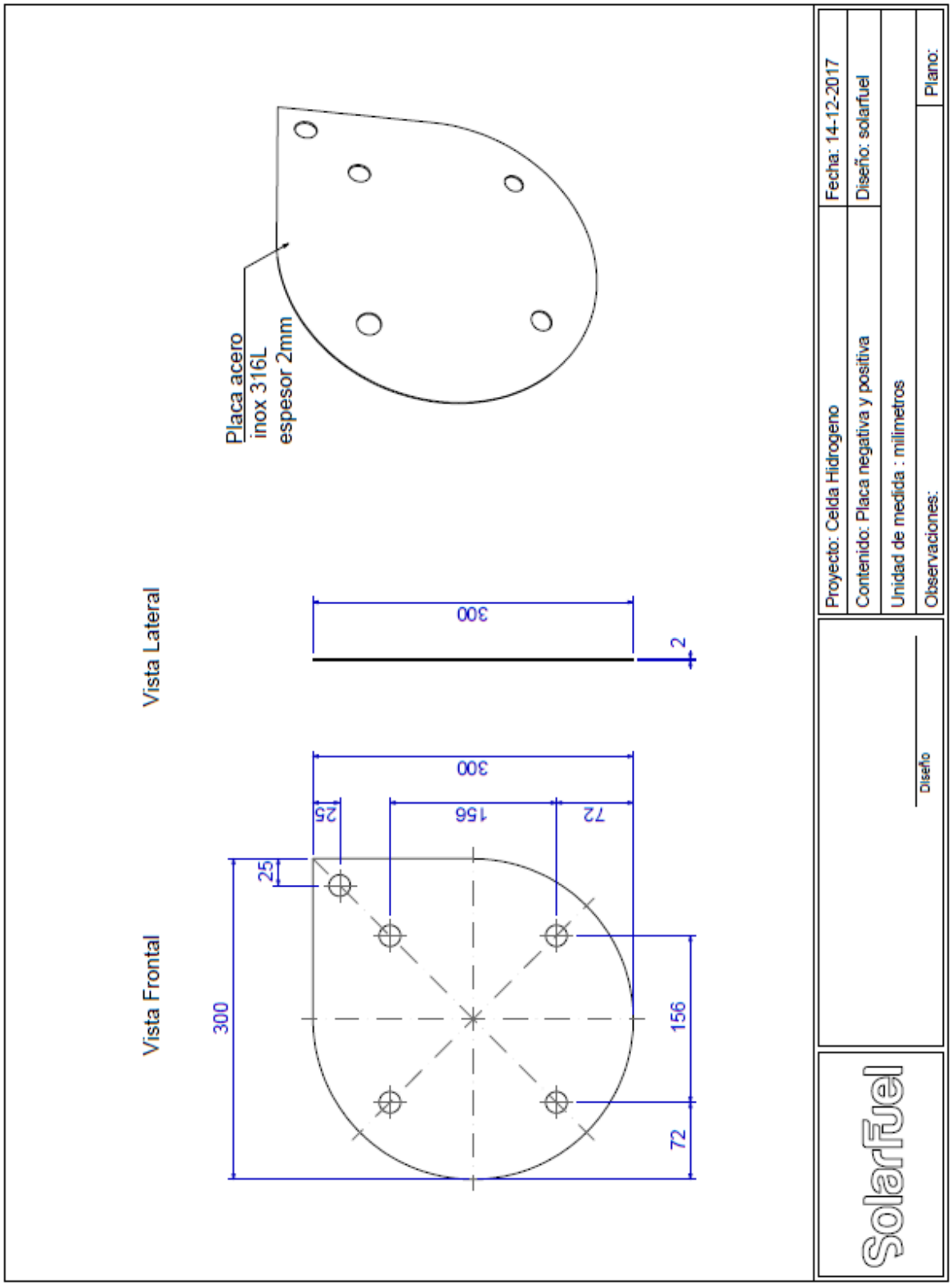
Anexo G. Planos de fabricación

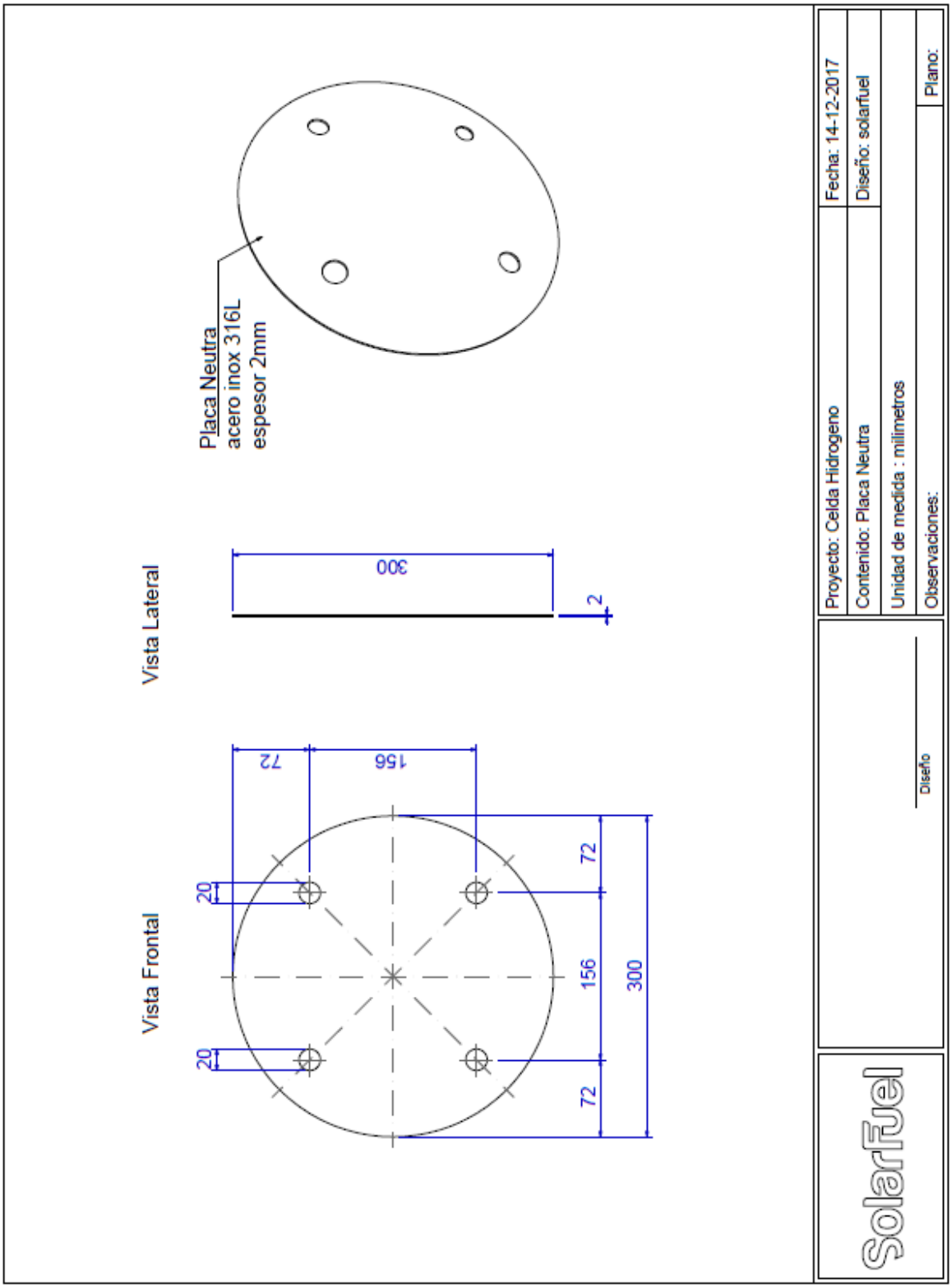

IZQUIERDA
1200,00
400,00
480,00
200,00
900,00
FRONTAL
440,00
440,00
540,00
DERECHA
1450,00
1040,00
1000,00
1000,00
1000,00
440,00
440,00
440,00
Diseño de
Carlos Arellano
Revisado por
Hans Loebel
Aprobado por
Carlos Jofré
Fecha
Fecha
11-07-2018
UNIDADES EN MM
Laboratorio Solar
SolarFuel
Escala
Hoja
1 / 1

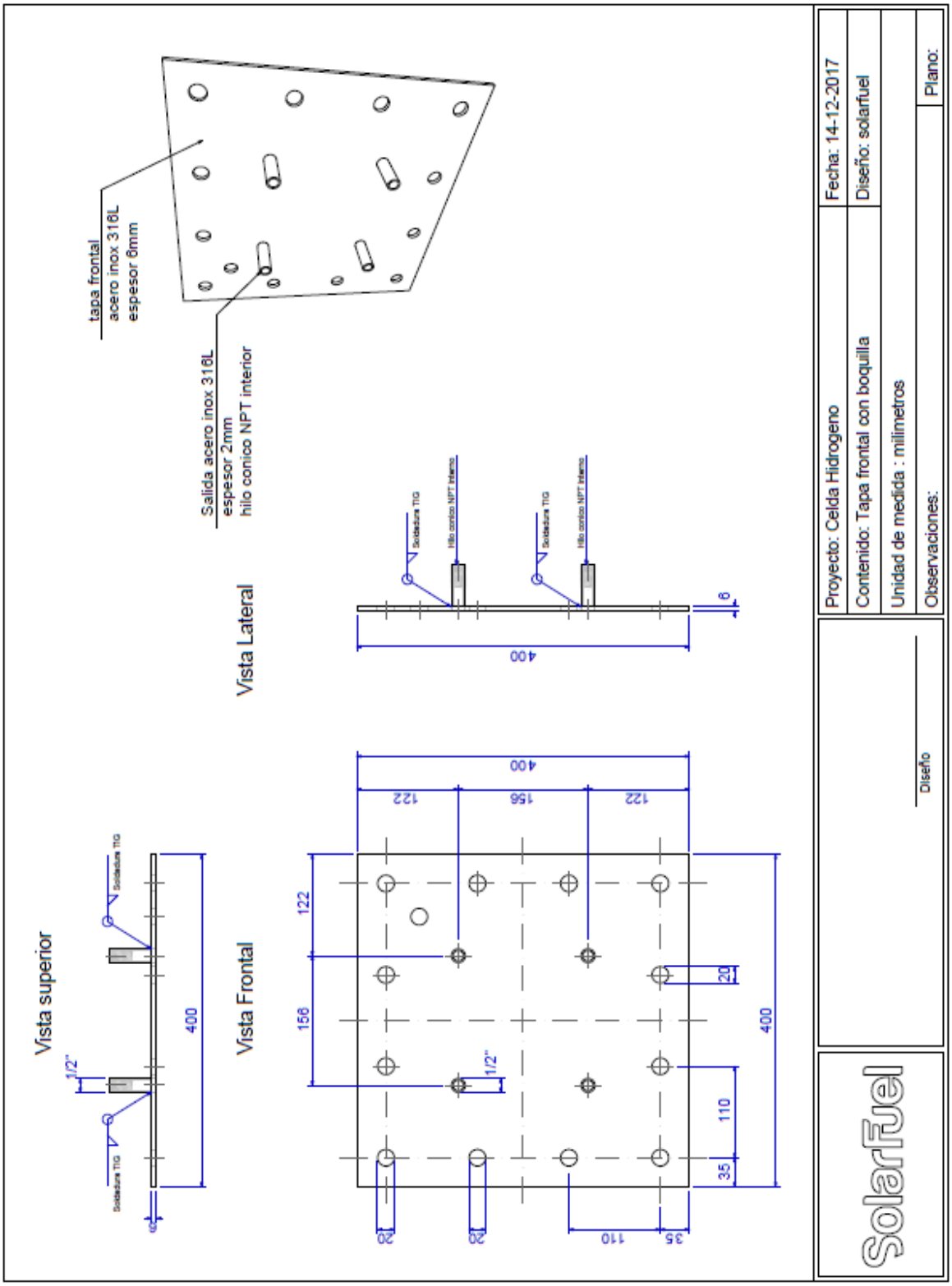

2,5 mm
Base control
Base Estanques
Base inferior
1000
560
480
1000
1,5 mm
Superior
Tablero eléctrico
1000
1030
1000
1,5 mm
Frontal
Trasero
1000
1200
1450
1,5 mm
Lateral derecho
Lateral izquierdo
1000
1450
1450
1200
3000

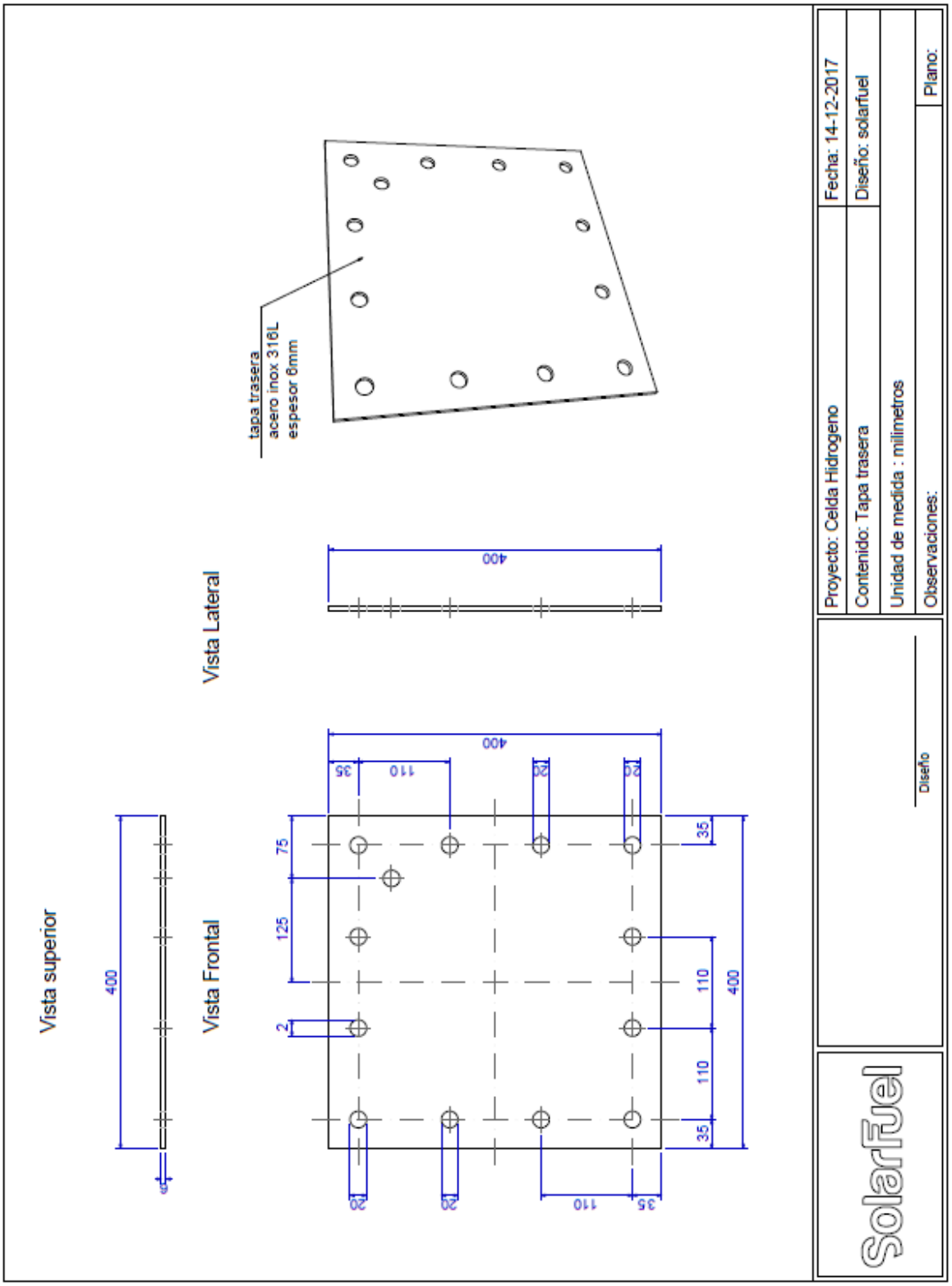

Vista Frontal
Vista Lateral
Acrílico clear
15 mm espesor
4 perforaciones
de 8mm
300
15
300
156
72
45°
72
156
30
20
5
Proyecto: Celda Hidrogeno
Fecha: 14-12-2017
Contenido: Separador de Acrílico
Diseño: solarfuel
Unidad de medida : milímetros
Observaciones:
Plano:
Diseño
SolarFuel

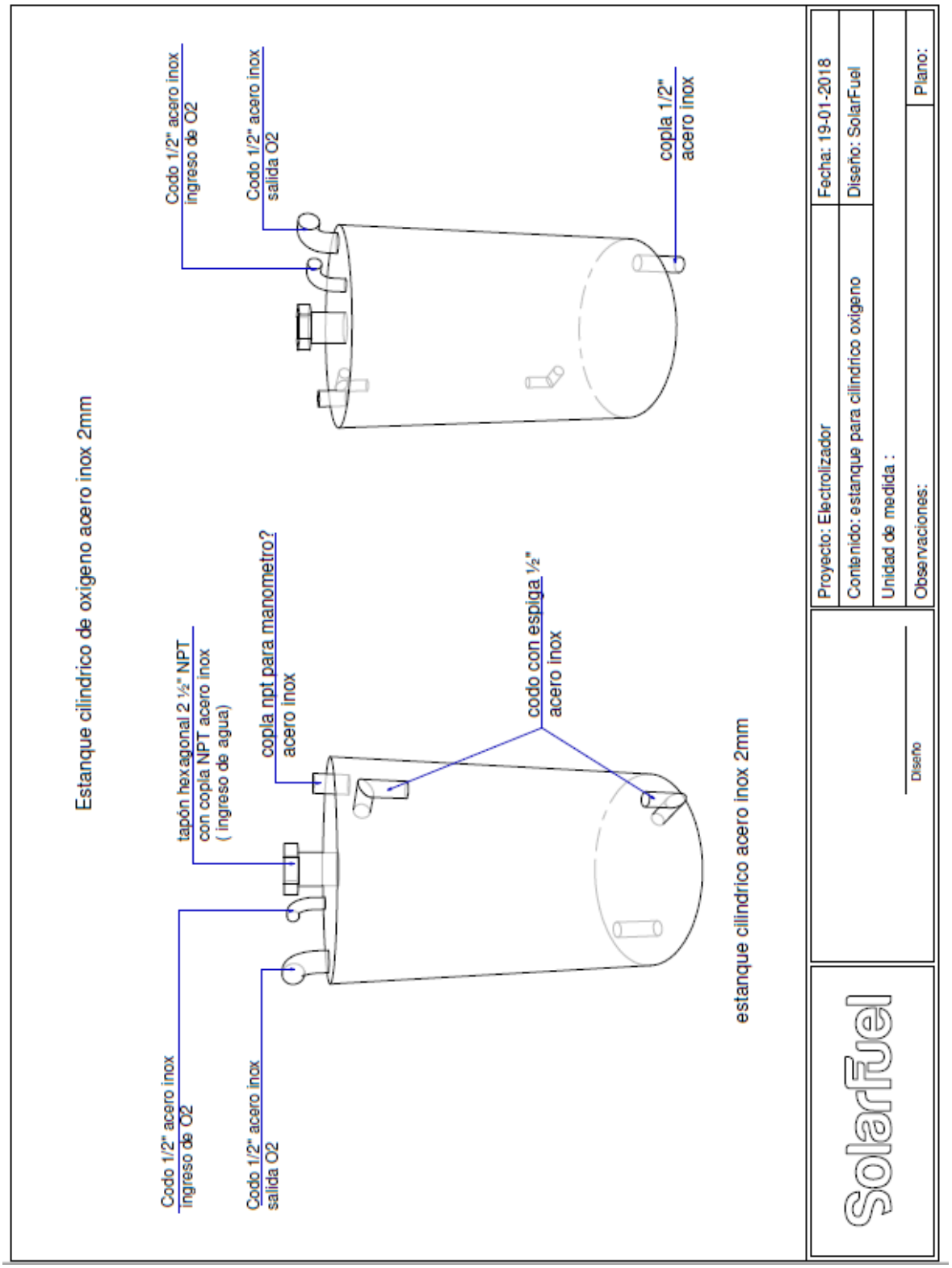

Caucho de empaquetadura
1.6 mm espesor
Vista Lateral
300
1.6
Vista Frontal
300
72
156
45°
156
20
30
15
Proyecto: Celda Hidrogeno
Contenido: Empaque de Goma
Unidad de medida : milimetros
Observaciones:
Fecha: 14-12-2017
Diseño: solarfuel
Plano:
Diseño
SolarFuel


Vista Frontal
Vista Lateral
Placa acero
inox 316L
espesor 2mm
300
25
25
156
72
300
156
72
300
2
Proyecto: Celda Hidrogeno
Fecha: 14-12-2017
Contenido: Placa negativa y positiva
Diseño: solarfuel
Unidad de medida : milimetros
Observaciones:
Plano:
Diseño
SolarFuel


Vista Frontal
Vista Lateral
Placa Neutra
acero inox 316L
espesor 2mm
20
20
72
156
72
156
72
300
300
2
Proyecto: Celda Hidrogeno
Contenido: Placa Neutra
Unidad de medida : milimetros
Observaciones:
Fecha: 14-12-2017
Diseño: solarfuel
Plano:
Diseño
SolarFuel


tapa frontal
acero inox 316L
espesor 6mm
Salida acero inox 316L
espesor 2mm
hilo conico NPT interior
Vista Lateral
Vista superior
Vista Frontal
Soldadura TIG
Hilo conico NPT interior
1/2"
400
122
156
20
110
35
6
Proyecto: Celda Hidrogeno
Contenido: Tapa frontal con boquilla
Unidad de medida : milimetros
Observaciones:
Fecha: 14-12-2017
Diseño: solarfuel
Plano:
Diseño
SolarFuel


Vista superior
Vista Frontal
Vista Lateral
tapa trasera
acero inox 316L
espesor 6mm
400
75
125
2
110
35
20
Proyecto: Celda Hidrogeno
Fecha: 14-12-2017
Contenido: Tapa trasera
Diseño: solarfuel
Unidad de medida : milimetros
Observaciones:
Plano:
Diseño
SolarFuel


Estanque cilindrico de oxigeno acero inox 2mm
Codo 1/2" acero inox
ingreso de O2
Codo 1/2" acero inox
salida O2
tapón hexagonal 2 ½" NPT
con copla NPT acero inox
(ingreso de agua)
copla npt para manometro?
acero inox
codo con espiga ½"
acero inox
Codo 1/2" acero inox
ingreso de O2
Codo 1/2" acero inox
salida O2
copla 1/2"
acero inox
estanque cilindrico acero inox 2mm
SolarFuel
Diseño
Proyecto: Electrolizador
Contenido: estanque para cilindrico oxigeno
Unidad de medida :
Observaciones:
Fecha: 19-01-2018
Diseño: SolarFuel
Plano: