

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DEMOSTRATIVA PARA  
LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA  
ELECTRÓLISIS DEL AGUA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO**

JAVIER IGNACIO VERMEERSCH ARMIJO

**PROFESOR GUÍA:  
ERNESTO BIANCHI SOUTER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MELANIE COLET LAGRILLE  
LUIS VARGAS DÍAZ**

SANTIAGO DE CHILE

2018



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO.

POR: Javier Vermeersch Armijo

FECHA: ENERO 2018

PROFESOR GUÍA: Ernesto Bianchi Souter

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DEMOSTRATIVA PARA LA  
PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LA ELECTRÓLISIS DEL AGUA

Durante el siguiente documento se muestra el proceso de construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis de agua potable a temperatura y presión ambiente. En conjunto de lo anterior, se propone diseñar e implementar un sistema capaz de separar y almacenar el hidrógeno y oxígeno. Para esto se considera la toma de las variables involucradas: diferencia de potencial en los bornes de la celda, corriente que circula por la celda y el volumen de hidrógeno y oxígeno producido.

El sistema está compuesto por la celda encargada de hacer la electrólisis, un estanque encargado de almacenar el hidrógeno, otro estanque encargado de almacenar el oxígeno, una toma de agua potable y una llave de paso encargada del llenado simultáneo de la celda y los estanques.

La estructura de la celda se construye en acrílico de 10 mm de espesor. Esta está constituida por 2 partes principales:

- Parte superior: encargada de proporcionar separadores para los electrodos, una entrada para el ingreso del agua y un sistema encargado de separar los gases.
- Parte inferior: encargada de proporcionar una salida del agua, soportar la estructura, soportar los electrodos y proporcionar de un sistema eléctrico para la alimentación de la celda.

Para el almacenamiento de los gases se utilizan estanques llenos de agua: al momento de ser producido el hidrógeno y el oxígeno, éstos desplazan al agua contenida en los estanques.

Se le realizaron dos pruebas a la celda, para determinar los dos tipos de eficiencias que interesan para este trabajo: eléctrica y térmica. Este concepto mide el cociente entre la energía que se puede recuperar del sistema en función de la energía utilizada para su producción. La eficiencia eléctrica considera que se recupera dicha energía en forma de electricidad, mientras que la eficiencia térmica contempla que se puede recuperar en la combustión del hidrógeno. Los resultados fueron los siguientes:

- En la primera prueba se inyectan 3,2 [A] y 3,15 [V] en los bornes de la celda, en la cual se obtuvo una eficiencia eléctrica del 43,8% y una eficiencia térmica del 51,9%.
- En la segunda prueba se inyectan 8,7 [A] y 4,2 [V] en bornes de la celda, en la cual se obtuvo una eficiencia eléctrica del 33,4% y una eficiencia térmica del 39,6%.



## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivo general .....	2
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Alcance .....	2
2.	Marco Teórico .....	3
2.1.	Estado natural .....	3
2.2.	Formas de producción del hidrógeno .....	4
2.3.	Propiedades físicas del hidrógeno .....	8
2.3.1.	Energía de formación y entalpía del vapor de agua.....	8
2.3.2.	Tensión mínima de electrólisis del agua.....	9
2.4.	Ley de los gases ideales.....	10
3.	Planos y construcción de una celda demostrativa y estanques de acumulación.....	12
3.1.	Esquema de principios.....	12
3.1.1.	Electrolizador.....	13
3.1.2.	Estanques .....	28
3.1.3.	Desagüe .....	32
3.1.4.	Conexiones .....	32
3.2.	Planos y fotos .....	33
3.3.	Problemas técnicos y constructivos.....	41
3.3.1.	Abertura de la celda.....	41
3.3.2.	Abertura de los estanques .....	41
3.3.3.	Curvatura de la pieza A .....	42
3.3.4.	Explosión de los estanques .....	42
4.	Generación de hidrógeno a partir de agua potable .....	43
4.1.	Medición de parámetros eléctricos y volumen producido.....	43
5.	Conclusiones.....	47
5.1.	Trabajo futuro .....	47
6.	Bibliografía.....	49

## Índice de tablas

Tabla 2-1: Propiedades físicas del hidrógeno molecular [1] .....	3
Tabla 2-2: Propiedades del hidrógeno comparadas con otros combustibles [1] .....	4
Tabla 3-1: Descripción de las piezas para cada estanque .....	28
Tabla 4-1: Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 3,2 A .....	44
Tabla 4-2: Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 8,6 A .....	45
Tabla 4-3: Media y desviación estándar para las diferentes tipos de eficiencia .....	46

## Índice de figuras

Figura 2-1: Formas comunes de producción de hidrógeno [3].....	5
Figura 2-2: Principio básico de la producción de hidrógeno por electrólisis .....	7
Figura 3-1: Esquema general de funcionamiento .....	13
Figura 3-2: Forma de armar los pernos para asegurar los acrílicos.....	14
Figura 3-3: Esquema de la vista frontal parte inferior de la celda.....	14
Figura 3-4: Esquema de la vista lateral parte inferior de la celda .....	15
Figura 3-5: Esquema de la vista frontal parte superior de la celda.....	15
Figura 3-6: Esquema de la vista lateral parte superior de la celda .....	16
Figura 3-7: Esquema pieza A (celda) .....	17
Figura 3-8: Esquema pieza B (celda) .....	17
Figura 3-9: Esquema pieza C (celda) .....	18
Figura 3-10: Esquema pieza D (celda) .....	18
Figura 3-11: Esquema pieza E2 (celda).....	19
Figura 3-12: Esquema pieza F (celda).....	19
Figura 3-13: Separador .....	20
Figura 3-14: Esquema pieza E1 (celda).....	20
Figura 3-15: Esquema pieza G (celda) .....	21
Figura 3-16: Esquema pieza H (celda) .....	21
Figura 3-17: Pieza dentada .....	21
Figura 3-18: Cajón fijador .....	21
Figura 3-19: Fijador para separadores .....	21
Figura 3-20: Perforación pieza C .....	22
Figura 3-21: Perforación pieza D .....	23
Figura 3-22: Perforaciones pieza E1 .....	23
Figura 3-23: Perforaciones pieza H frontal .....	23
Figura 3-24: Perforaciones pieza H posterior.....	23
Figura 3-25: Pieza A con las piezas B, C y F encajadas .....	24
Figura 3-26: Forma de armar los soportes de la celda.....	26
Figura 3-27: Fijador para los electrodos.....	26
Figura 3-28: Forma de colocar los fijadores de los electrodos.....	26
Figura 3-29: Terminal de los pernos eléctricos .....	27

Figura 3-30: Estructura de 11 fijadores con su respectivo terminal .....	27
Figura 3-31: Cortes de acrílico de 2 mm para cajón fijador .....	27
Figura 3-32: Electrodo de acero inoxidable .....	28
Figura 3-33: Esquema de estanque .....	29
Figura 3-34: Esquema pieza D (estanque).....	29
Figura 3-35: Esquema pieza E (estanque) .....	30
Figura 3-36: Perforación pieza A (estanques) .....	30
Figura 3-37: Perforación pieza G (estanques) .....	30
Figura 3-38: Seguros para los estanques .....	31
Figura 3-39: Ubicación de los seguros .....	31
Figura 3-40: Espigas de la parte superior de la celda .....	33
Figura 3-41: Espiga en L .....	33
Figura 3-42: Parte superior de la celda.....	34
Figura 3-43: Parte inferior de la celda .....	34
Figura 3-44: Celda terminada.....	35
Figura 3-45: Llave superior de los estanques .....	35
Figura 3-46: Estanque.....	36
Figura 3-47: Desagüe .....	36
Figura 3-48: Brazo de la llave cuádruple unido a una manguera .....	37
Figura 3-49: Sistema de la llave .....	37
Figura 3-50: Sistema conector-tubo-conector. ....	37
Figura 3-51: Llave cuádruple .....	37
Figura 3-52: Montaje final del sistema de producción de hidrógeno .....	38
Figura 3-53: Proyecto de corte de plancha de 10 mm .....	39
Figura 3-54: Proyecto de corte de plancha de 5 mm .....	40
Figura 3-55: Proyecto de corte de plancha de 2 mm .....	40
Figura 3-56: Diseño de unión antiguo y nuevo .....	41
Figura 3-57: Estanque sin seguros (izquierda) y estanque con seguros (derecha) .....	42
Figura 3-58: Vista lateral de Pieza A de 2 mm de espesor (izq.) y Piezas A de 5 mm de espesor (der.) .....	42
Figura 4-1: Gráfico de la eficiencia en función de la energía inyectada para la prueba a 3,2 A y 3,15 V .....	45

Figura 4-2: Gráfico de la eficiencia en función de la energía inyectada para la prueba a 8,7 A y 4,2 V .....	46
--	----



# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Es imperativo que como sociedad, establezcamos los cambios necesarios en nuestras matrices productivas para poder hacer frente al cambio climático que vivimos actualmente. Para esto, es necesario comprender que la emisión de gases de efecto invernadero es el principal factor que contribuye a incrementar los efectos del cambio climático. La producción de energía a partir de combustibles fósiles y quema de carbón genera grandes cantidades de monóxido y dióxido de carbono, los cuales son los gases de efecto invernadero.

Las energías renovables no convencionales (ERNC) son un buen sustituto a las centrales térmicas, ya que se alimentan con energías de costo marginal muy bajo, con una huella de carbono despreciable. Uno de los grandes problemas de las energías renovables como la eólica, solar fotovoltaica e hidráulica de pasada, es que los momentos en que hay viento, sol o agua, no necesariamente coinciden con la demanda, razón por la cual es necesario almacenarla, al igual como se hace con la leña, el gas y el petróleo. Como solución alternativa, el hidrógeno permite almacenar energía. Se propone como solución el electrolizador alimentado con energía solar y agua.

El electrolizador es un equipo que mediante la electrólisis es capaz de generar hidrógeno y oxígeno gaseoso a partir de agua líquida utilizando como fuente de energía la electricidad. Dichos gases son almacenados mediante diferentes métodos para luego ser utilizados en diferentes aplicaciones:

- Producción de calor mediante la combustión del hidrógeno.
- Generación de energía eléctrica mediante la celda de combustible.

Lo ideal sería el utilizar fuentes de energía renovable (solar fotovoltaica, eólica, hidráulica de pasada, etc.) para alimentar dicho electrolizador, y así disminuir la huella de carbono generada actualmente en la industria de los hidrocarburos.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Construir una celda de laboratorio con miras a demostrar la factibilidad técnica y práctica de generar hidrógeno gaseoso, para la acumulación ERNC y su posterior aplicación como fuente de energía eléctrica y/o calórica.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir una estructura capaz de soportar la presión del agua y que permita observar claramente las reacciones ocurridas.
- Diseñar y construir dos estanques: uno para el hidrógeno y otro para el oxígeno.
- Diseñar y construir un sistema eléctrico, el cual debe llevar la potencia eléctrica desde los bornes de la celda hacia los electrodos.
- Determinar y medir empíricamente las variables energéticas y físicas involucradas en la obtención de hidrógeno.
- Determinar los niveles de pérdidas energéticas del sistema.

## **1.3. Alcance**

Este proyecto será abordado de una forma similar a los proyectos de ingeniería.

- Durante la etapa de ingeniería de proyecto se realizan los cálculos, ideas y análisis de los prototipos de electrolizador.
- No se realiza estudio de la factibilidad económica, debido a que el proyecto es de carácter demostrativo.
- La ingeniería básica y de detalle se realiza para el diseño de la celda.
- No se realiza una licitación como tal, pero se efectúa un proceso en el cual se busca financiamiento por parte del departamento de ingeniería eléctrica de la FCFM.
- Se efectúa la construcción y puesta en marcha de la celda. Incluyendo las pruebas necesarias para determinar el funcionamiento de esta misma.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Estado natural

El hidrógeno es un elemento que a condiciones normales (25 °C y 101,3 kPa) es un gas incoloro, sin olor, sin sabor, no tóxico, inflamable e insoluble en agua, el cual no se encuentra presente en la tierra de manera natural en su forma de  $H_2$ . A pesar de lo anterior, este elemento representa una gran cantidad de materia en la tierra, ya que este se encuentra presente en el planeta acoplado a otros elementos formando diferentes tipos de moléculas, como agua ( $H_2O$ ), derivados del petróleo (Benceno  $C_6H_6$ , poli-cloruro de vinilo  $C_2H_3Cl$ , etc.), amoníaco ( $NH_3$ ), bicarbonato de sodio ( $NaHCO_3$ ), entre muchos otros compuestos orgánicos. Las principales propiedades físicas del hidrógeno molecular se presentan en la Tabla 2-1. [1]

Tabla 2-1: Propiedades físicas del hidrógeno molecular [1]

Parámetro	Valor	Unidad
Peso molecular	$2,016 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot mol^{-1}$
Punto de fusión	13,96	K
Punto de ebullición	14	K
Densidad a 4,2 K (sólido)	89	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 20,4 K (líquido)	71	$kg \cdot m^{-3}$
Densidad a 0°C y 101,3 kPa (gaseoso)	$8,99 \cdot 10^{-2}$	$kg \cdot m^{-3}$
Conductividad térmica (a 25 °C)	$1,842 \cdot 10^{-1}$	$W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
Calor bruto de combustión (a 25 °C y 101,3 kPa)	$2,6504 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Calor neto de combustión (a 25 °C y 101,3 kPa)	$2,4192 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Temperatura de auto-ignición	858	K
Límite de inflamabilidad en oxígeno <sup>1</sup>	4-94	%
Límite de inflamabilidad en aire	4-74	%

Dentro de las propiedades del  $H_2$  se destaca el calor producido al ser combustionado en presencia del oxígeno, liberando  $1,4 \cdot 10^{-8} [J \cdot kg^{-1}]$ , formando agua y sin emitir gases derivados del carbono (a diferencia de la mayoría de las tecnologías actuales de combustión). [1]

---

<sup>1</sup> El límite de inflamabilidad inferior es la mínima concentración de hidrógeno (en aire u oxígeno) para que este se pueda inflamar. El límite de inflamabilidad superior es la máxima concentración de hidrógeno (en aire u oxígeno) para que este se pueda inflamar

Tabla 2-2: Propiedades del hidrógeno comparadas con otros combustibles [1]

Combustible	Densidad energética gravimétrica		Densidad energética volumétrica		Límite de inflamabilidad <i>vol %</i>	Fracción de calor en forma de radiación <i>vol %</i>
	$MJ \cdot kg^{-1}$	$kWh \cdot kg^{-1}$	$MJ \cdot l^{-1}$	$kWh \cdot l^{-1}$		
Hidrógeno a 20 MPa	120	33,3	2,1	0,58	-	-
Hidrógeno líquido	120	33,33	8,4	2,33	18,3-59	17-25
Metanol	19,7	5,36	15,7	4,36	6-36	17
Petróleo	42	11,36	31,5	8,75	1,1-3,3	30-42
Diésel	45,3	12,58	35,5	9,86	0,6-7,5	-
Kerosene	43,5	12,08	31	8,6	0,7-5	-

En la Tabla 2-2 se muestran los diferentes límites y propiedades energéticas que poseen los combustibles más utilizados y el del hidrógeno. Se observa que el hidrógeno:

1. Posee una densidad energética por unidad de masa mucho mayor a cualquier otro combustible.
2. Es el que posee la menor densidad energética por unidad de volumen, a temperatura y presión normal.
3. Posee un mayor límite inferior de inflamabilidad.
4. Posee un mayor límite superior de inflamabilidad.

## 2.2. Formas de producción del hidrógeno

La electrolisis del agua es uno de los procesos más importantes para la producción de hidrógeno, pero existen otras tecnologías que también son utilizadas comúnmente en la industria. Las más comunes son: [2]

- a) Reformado por vapor del gas natural.
- b) Descomposición catalítica del gas natural.
- c) Oxidación parcial de aceites pesados.
- d) Gasificación del carbón.
- e) Ciclos termoquímicos puros e híbridos.
- f) Procesos fotoquímicos, foto-electroquímicos y fotobiológicos.

Los procesos previamente nombrados se pueden clasificar de acuerdo a la fuente primaria de energía y al proceso involucrado, como se aprecia en la Figura 2-1.

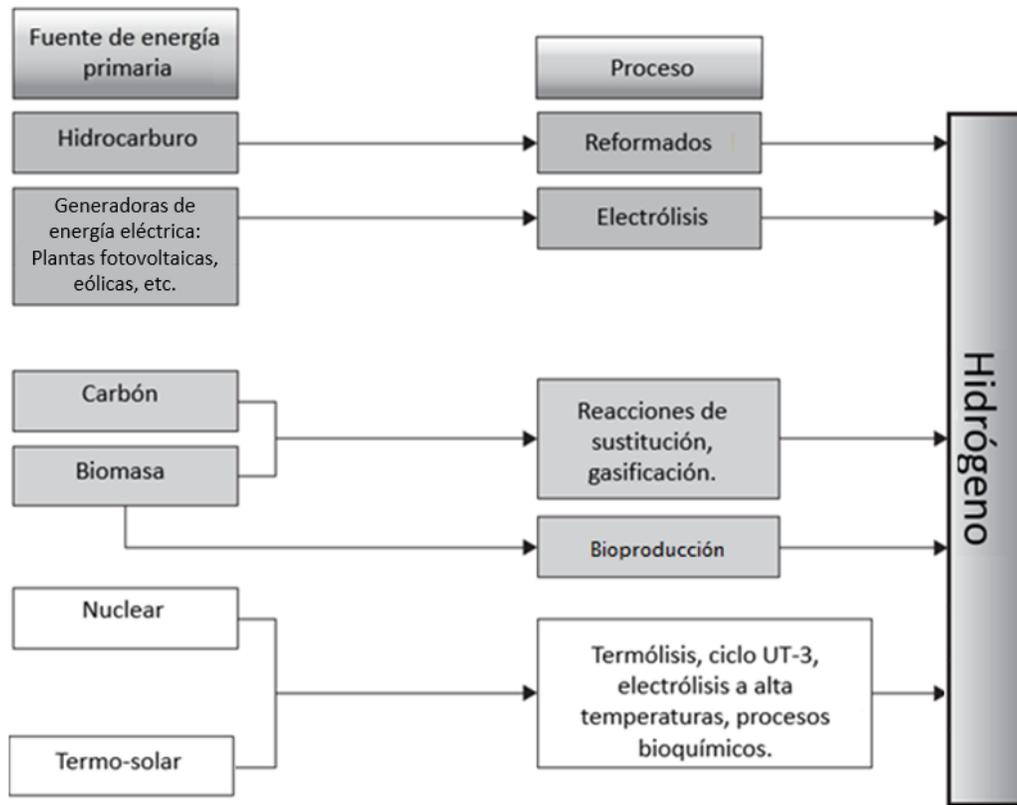


Figura 2-1: Formas comunes de producción de hidrógeno [3]

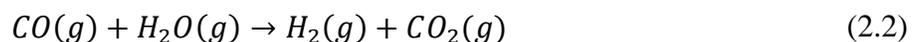
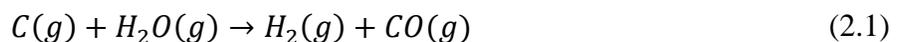
Como se menciona en el punto 2.1, el hidrógeno no se encuentra presente en la naturaleza, y solo se encuentra en las moléculas de los hidrocarburos y en las moléculas de agua. A continuación se presentan las formas más comunes de producción de hidrógeno a partir de hidrocarburos y agua.

a) A partir de hidrocarburos

Existen varios tipos de reacciones con hidrocarburos, las cuales utilizan agua y otros componentes para así separar los hidrógenos presentes en los hidrocarburos o en el agua.

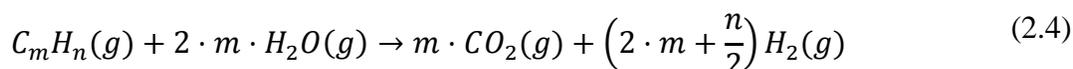
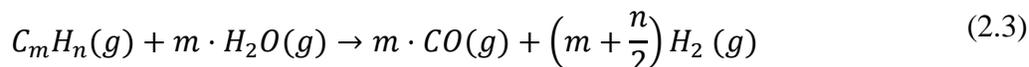
1. Gasificación del carbón

Proceso que consiste en gasificar el carbón a temperaturas superiores a los 1.000 °C y juntarlo con agua, de esta forma se va a producir una reacción de sustitución, en la que se va a formar  $CO$  y  $H_2$ . Después de esto, el monóxido de carbono se mezcla con agua en un segundo reactor a 400 °C, formando  $CO_2$  y  $H_2$ . [4]



## 2. Reformado de vapor de gas natural (SR)

El SR es uno de los procesos más utilizados con una mayor eficiencia de operación y menores costos asociados a la producción. Utiliza hidrocarburos ligeros, como el metano u otros para producir monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno siguiendo las siguientes ecuaciones: [5]



Los procesos utilizados con mayor frecuencia en la industria se muestran en las ecuaciones (2.5) y (2.6): [6]



El proceso de SR en general consta de 2 etapas:

- a. En la primera se mezcla el hidrocarburo con vapor de agua en un reactor catalítico, formándose monóxido de carbono e hidrógeno, y en una menor proporción dióxido de carbono, como se puede ver en la ecuación (2.5)
- b. En la segunda etapa, dado que se posee monóxido de carbón, este se hace reaccionar con vapor de agua en otro reactor catalítico, lo que produce dióxido de carbono e hidrógeno, como se puede ver en la ecuación (2.6)

### b) A partir de agua

Se puede producir hidrógeno a partir de agua de 2 formas diferentes: utilizando calor (termólisis) o energía eléctrica (electrólisis).

#### 1. Termólisis

La termólisis es el proceso en el cual se eleva la temperatura del agua por sobre los 2.227 °C, para romper los enlaces de la molécula  $H_2O$ . Este proceso se lleva a cabo cuando el agua entra en contacto con una superficie a alta temperatura y la energía calórica provoca la disociación en oxígeno e hidrógeno molecular, los cuales deben ser separados rápidamente, debido a que la reacción es reversible y provoca fuertes explosiones. [7]



Para la separación del hidrógeno en estas condiciones se pueden emplear varios métodos, entre ellos se puede mencionar: [7]

- Separación a baja temperatura: se disminuye abruptamente la temperatura de los gases para estabilizarlos.
- Membranas refractarias de micro-poros que realicen una separación selectiva de las moléculas.
- Electroforesis: proceso en el que se genera un gradiente potencial eléctrico en conjunto de una membrana semipermeable para separar las moléculas de oxígeno de las de hidrógeno.
- Se utilizan membranas hechas de una aleación de paladio con plata para aislar el hidrógeno de los demás componentes a bajas temperaturas. Dichas membranas deben estar diseñadas de tal forma de que adsorban solamente
- Centrifugado de las moléculas: al colocar moléculas de hidrógeno y oxígeno en un estanque que, rota a una velocidad angular constante, las moléculas más pesadas (en este caso  $O_2$ ) se mueven hacia la periferia del cilindro, mientras que las más livianas ( $H_2$ ) quedan en un lugar más centrado. [8]

## 2. Electrólisis

Proceso electroquímico en el cual se sumergen 2 electrodos en una solución acuosa llevando un potencial eléctrico que provoca la separación del hidrógeno y el oxígeno. Esto se debe a que el campo eléctrico externo (provocado por la diferencia de tensión entre los electrodos) es mayor al campo eléctrico (molecular) lo que provoca la ruptura del enlace covalente del agua. Un esquema de la electrólisis se puede observar en la Figura 2-2.

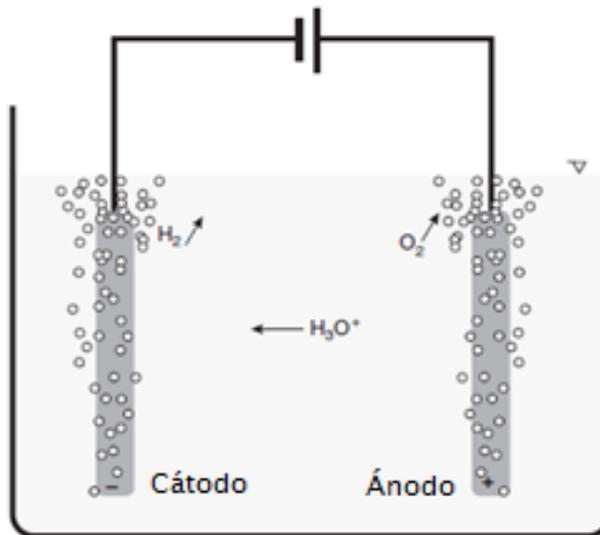
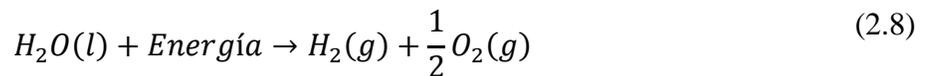


Figura 2-2: Principio básico de la producción de hidrógeno por electrólisis

Dados los procesos de producción antes vistos, se puede notar que tanto la gasificación del carbón, como el SR y la termólisis utilizan temperaturas superiores a los 800°C, por lo que:

- Se necesitan equipamientos adecuados, los cuales son muy costosos.
- Se necesita un combustible que proporcione la energía, lo que aumenta la huella de carbono del proyecto.

Por lo que quedarían descartados para la producción de hidrógeno a baja escala.

## 2.3. Propiedades físicas del hidrógeno

### 2.3.1. Energía de formación y entalpía del vapor de agua

La electrolisis del agua es un proceso en el cual se disocia la molécula de agua en sus componentes fundamentales, hidrógeno y oxígeno. Esto sucede cuando se cumplen ciertas condiciones de diferencia de potencial, temperatura, pH, presión, conductividad del agua, entre otras. Dadas unas condiciones de los factores mencionados, se tendrá que, al aplicar un campo eléctrico superior a un umbral, el enlace entre los átomos de hidrógeno y oxígeno de la molécula de agua, se rompe. [1]

En condiciones normales (25 °C y 101,3 kPa) el agua es líquida y tanto el  $H_2$  como el  $O_2$  son gaseosos, por lo que para calcular la energía necesaria para que se produzca la electrolisis, es necesario considerar la entalpía de disociación ( $H_d^o$ ) necesaria para pasar de agua líquida a gaseosa y después disociar sus moléculas.

Teniendo en consideración que la entalpía de disociación del agua líquida es 285,84 [ $kJ \cdot mol^{-1}$ ], su entropía es  $\Delta S_d^o(H_2O(l)) = 163,15 [J \cdot mol^{-1}K^{-1}]$ , y utilizando la ecuación de energía libre de Gibbs mostrada en (2.9), se puede determinar la energía que se debe suministrar al sistema a temperatura y presión normal la cual es mostrada en la ecuación (2.10).

$$\Delta H = \Delta G + T \cdot \Delta S \quad (2.9)$$

Donde:

$\Delta H$  Es la entalpía

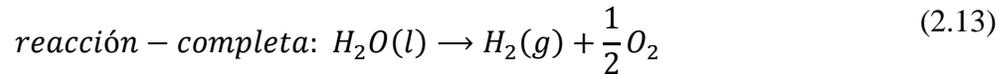
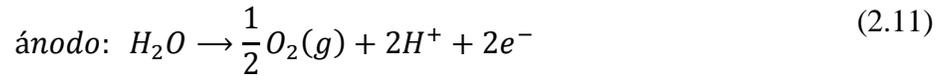
$\Delta G$  Es la energía libre de Gibbs

$T$  Es la temperatura (en Kelvin)

$\Delta S$  Es la entropía

$$\Delta G_d^o(H_2O(l)) = \Delta H_d^o(H_2O(l)) - T \cdot \Delta S_d^o(H_2O(l)) = 237,22 [kJ \cdot mol^{-1}] \quad (2.10)$$

La termodinámica indica que la reacción de disociación del agua es una reacción no espontánea, en consecuencia, se debe inyectar energía para que esta se produzca. Esta energía se inyecta en forma de electricidad, por lo que para la realización de una electrolisis se debe determinar la tensión en los electrodos necesaria para que comience la reacción. Para esto, se analiza las semi-reacciones de oxidación (2.11), de reducción (2.12) y posteriormente la reacción completa (2.13) [1]:



Las reacciones (2.11) y (2.12) son llamadas reacción de evolución del oxígeno (OER: *Oxygen Evolution Reaction*) y reacción de evolución del hidrógeno (HER: *Hydrogen Evolution Reaction*) respectivamente. [1]

Para determinar la cantidad de energía que puede entregar el hidrógeno, se necesita conocer la entalpía de evaporación del agua (ecuación(2.14)), la cual se muestra en la ecuación (2.15).



$$\Delta S_d^\circ(H_2O(vap)) = 44,1 [kJ \cdot mol^{-1}] \quad (2.15)$$

### 2.3.2. Tensión mínima de electrólisis del agua

Desde el punto de vista electroquímico, de acuerdo al primer principio de la termodinámica, la cantidad de electricidad ' $nFE$ ' necesaria para dividir 1 mol de agua de la reacción (2.13) es igual a la energía libre de Gibbs ( $\Delta G_d$ ) presentada en la ecuación (2.16).

$$\Delta G_d - n \cdot F \cdot E = 0 \quad (2.16)$$

Donde n es el número de electrones intercambiados durante la reacción, F es la constante de Faraday ( $96.485 C \cdot mol^{-1}$ ) y E es la cantidad de energía eléctrica utilizada para producir la reacción vista en (2.13). Dada la dependencia existente entre la energía libre de Gibbs y la entalpía mostrada en (2.17), se definen dos diferentes tensiones eléctricas para caracterizar las electrólisis del agua mostradas en (2.18) y (2.19).

$$\Delta G_d(T, P) = \Delta H_d(T, P) - T\Delta S_d(T, P) \quad (2.17)$$

- Tensión de electrolisis de energía libre  $E(T, P)$

$$E^\circ(T, P) = \frac{\Delta G_d^\circ(T, P)}{nF} \quad (2.18)$$

- Tensión de entalpía o termo-neutral  $U(T, P)$

$$U^\circ(T, P) = \frac{\Delta H_d^\circ(T, P)}{nF} \quad (2.19)$$

Para determinar la tensión necesaria para producir la electrolisis, se debe definir cada una de estas tensiones:

$$\Delta G_d^\circ(H_2O) = 237,22 [kJ \cdot mol^{-1}] \Rightarrow E^\circ = \frac{\Delta G_d^\circ(T, P)}{nF} \approx 1,23[V] \quad (2.20)$$

$$\Delta H_d^\circ(H_2O) = 285,84 [kJ \cdot mol^{-1}] \Rightarrow U^\circ = \frac{\Delta H_d^\circ(T, P)}{nF} \approx 1,48[V] \quad (2.21)$$

Estas tensiones sirven para determinar rangos de operación en el proceso de electrólisis. Si los bornes de la celda poseen una diferencia de potencial

- Menor que  $E^\circ$ , entonces la electrólisis no se produce.
- Mayor que  $E^\circ$  y menor que  $V^\circ$ , la reacción va a comenzar pero no va a haber la suficiente energía eléctrica para mantener la termicidad del sistema.
- Mayor que  $V^\circ$ , entonces se producirá la reacción y la potencia eléctrica va a ser capaz de mantener la temperatura del sistema.

Utilizando la ecuación (2.20) y la conversión de unidades de  $3,6 [kJ \cdot W^{-1}h^{-1}]$ , se calcula la cantidad de energía en 1 mol de hidrógeno:  $65,89 [W \cdot h]$ .

## 2.4. Ley de los gases ideales

Dado que al realizar la electrólisis del agua líquida se produce hidrógeno y oxígeno gaseosos, los cuales se comportan como gases ideales a condiciones normales, se procede a estudiar su comportamiento.

Las leyes de los gases ideales se resumen en las 3 relaciones siguientes:

Ley de Boyle:  $V \propto \frac{1}{P}$  (a  $n$  y  $T$  constantes)

Ley de Charles:  $V \propto T$  (a  $n$  y  $P$  constantes)

Ley de Avogadro:  $V \propto n$  (a  $P$  y  $T$  constantes)

Al combinar estas 3 ecuaciones se obtiene la ecuación de los gases ideales, la cual describiría el comportamiento de los gases ideales:

$$V \propto \frac{nT}{P} \quad (2.22)$$

$$V = R \cdot \frac{nT}{P} \quad (2.23)$$

Dado esto, se procede a colocar un mol de un gas ideal ( $H_2, N_2, O_2, Cl_2, etc.$ ) a  $0^\circ C$  y a  $101,325 [kPa]$  de presión, y se muestra experimentalmente que ocupa un volumen de  $22,414 [l]$ , por lo que  $R$  vendría siendo: [9]

$$R = \frac{P \cdot V}{n \cdot T} \quad (2.24)$$

$$R = \frac{101,325 [kPa] \cdot 22,414 [l]}{1[mol] \cdot 273,15[K]} = 8314,4 [kPa \cdot l \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (2.25)$$

### 3. Planos y construcción de una celda demostrativa y estanques de acumulación

Durante la siguiente sección se muestran los elementos diseñados y construidos para crear un sistema capaz de generar hidrógeno a partir de agua potable, teniendo en consideración los parámetros constructivos mostrados a continuación:

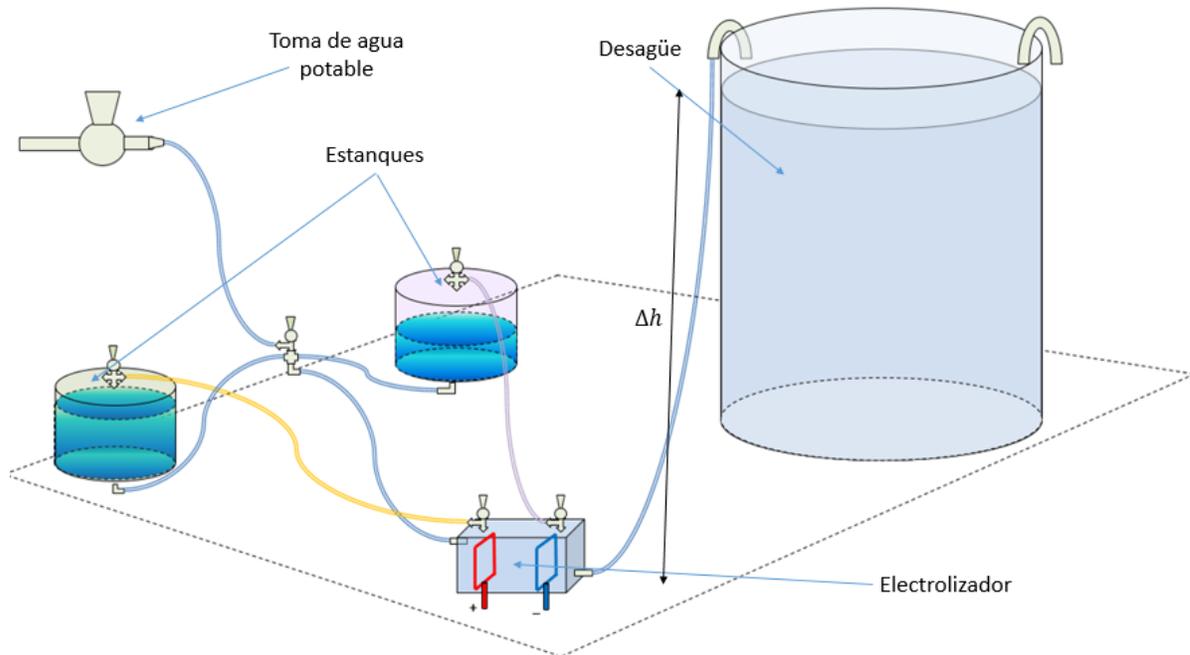
Producción de hidrógeno:	1 [ $mol \cdot h^{-1}$ ]
Entalpía de formación:	237,22 [ $kJ \cdot mol^{-1}$ ]
Energía en 1 mol de $H_2$ :	65,89 [ $W \cdot h$ ]
Tensión para comenzar la electrólisis:	1,23 [ $V$ ]

#### 3.1. Esquema de principios

Lo primero es idear un sistema a grandes rasgos, el cual sea capaz de generar y almacenar hidrógeno y oxígeno. El sistema se compone de 4 elementos fundamentales:

1. Electrolizador: dispositivo capaz de generar hidrógeno y oxígeno a partir de agua, utilizando el proceso de la electrólisis.
2. Estanque de hidrógeno: Estructura volumétrica encargada de almacenar el hidrógeno producido.
3. Estanque de oxígeno: Estructura volumétrica encargada de almacenar el oxígeno producido.
4. Estanque de desagüe: Estructura volumétrica encargada de recibir el agua evacuada producto de la presión que se genera al generar hidrógeno y oxígeno.

La configuración inicial de estos elementos, las conexiones que van a tener entre ellos y la toma de agua se muestra en la Figura 3-1.



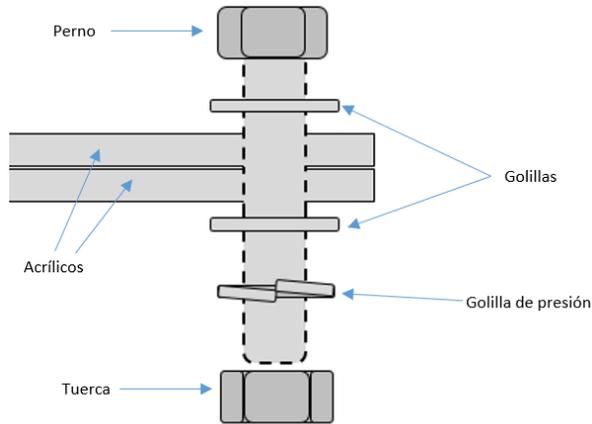
**Figura 3-1: Esquema general de funcionamiento**

Cada elemento del sistema será descrito de manera independiente para así proporcionar una lectura más ordenada del proyecto.

### **3.1.1. Electrolizador**

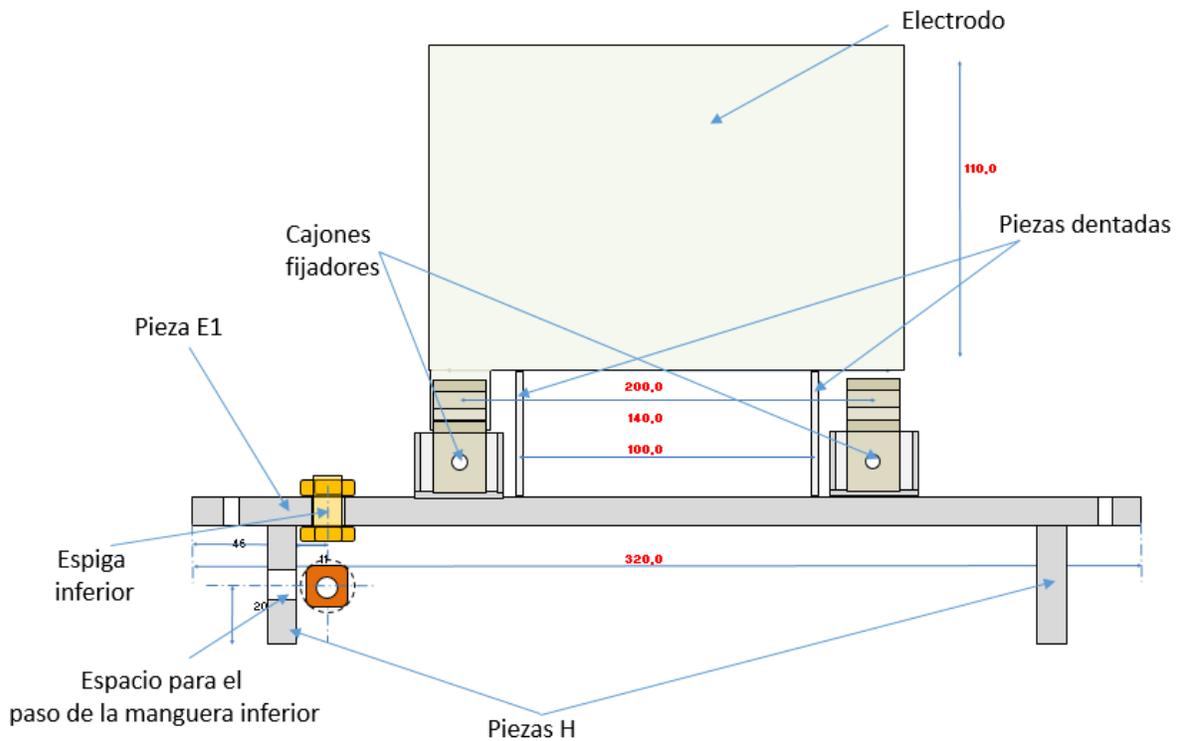
El electrolizador está construido con piezas de acrílico de 10 mm de espesor. Consta de 2 partes (superior e inferior), que son unidas por 22 pernos con sus respectivas golillas y tuercas (como muestra la Figura 3-2).

La parte superior (vista en la Figura 3-5 y en la Figura 3-6) es la encargada de proporcionar separadores para los electrodos, una espiga de bronce para la entrada del agua, y hacer la separación de los gases. La parte inferior (vista en la Figura 3-3 y en la Figura 3-4) es la encargada de proporcionar una espiga de bronce para conectar al desagüe, soportar la estructura, soportar los electrodos y proporcionar de un sistema eléctrico para la alimentación de la celda.



**Figura 3-2: Forma de armar los pernos para asegurar los acrílicos**

Los esquemas de la parte inferior se muestra en la Figura 3-3 y la Figura 3-4, y los esquemas de la parte superior se muestra en la Figura 3-5 y la Figura 3-6.



**Figura 3-3: Esquema de la vista frontal parte inferior de la celda**

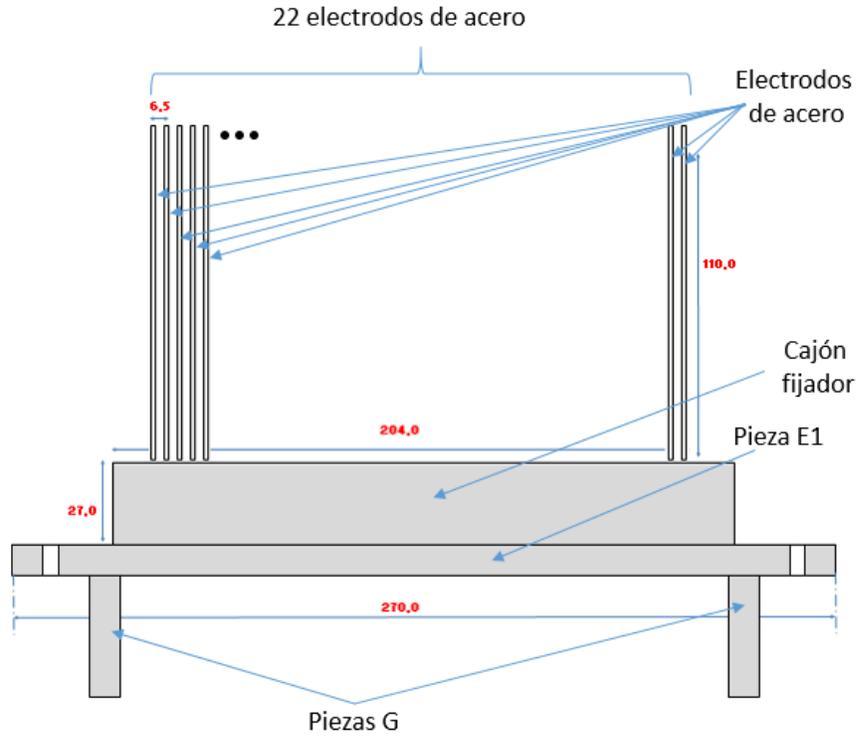


Figura 3-4: Esquema de la vista lateral parte inferior de la celda

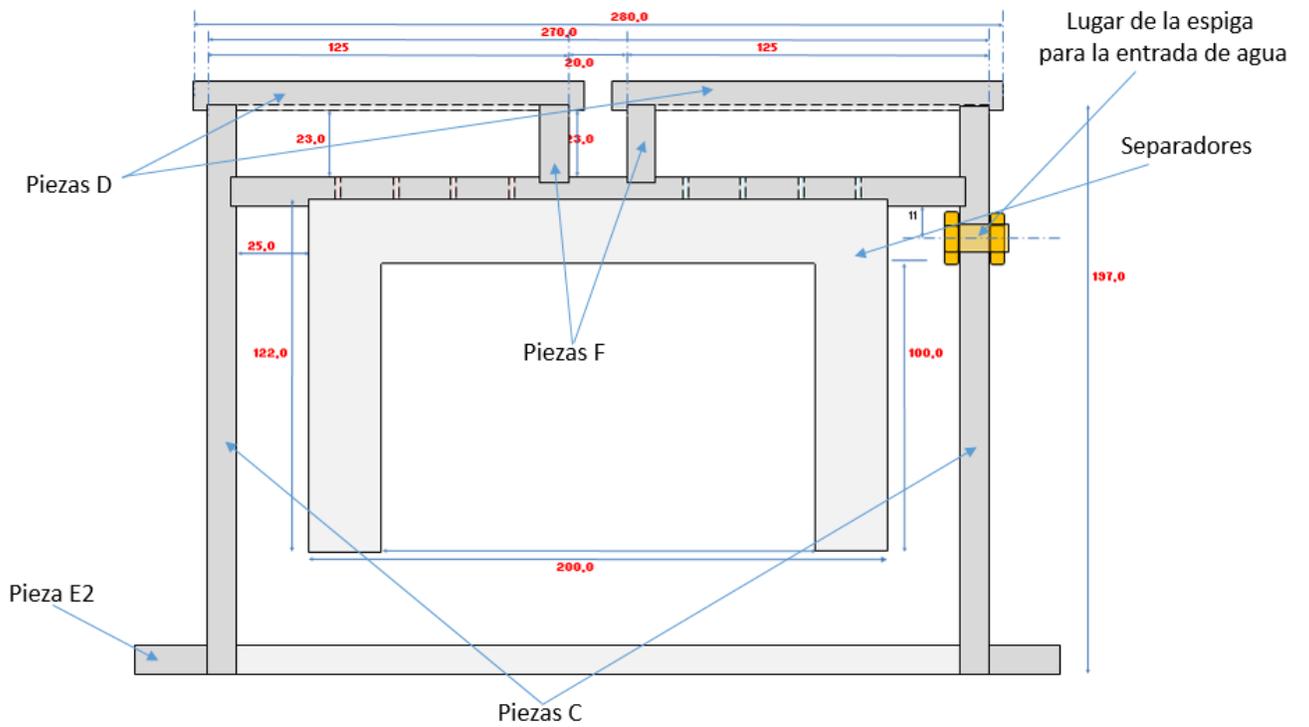
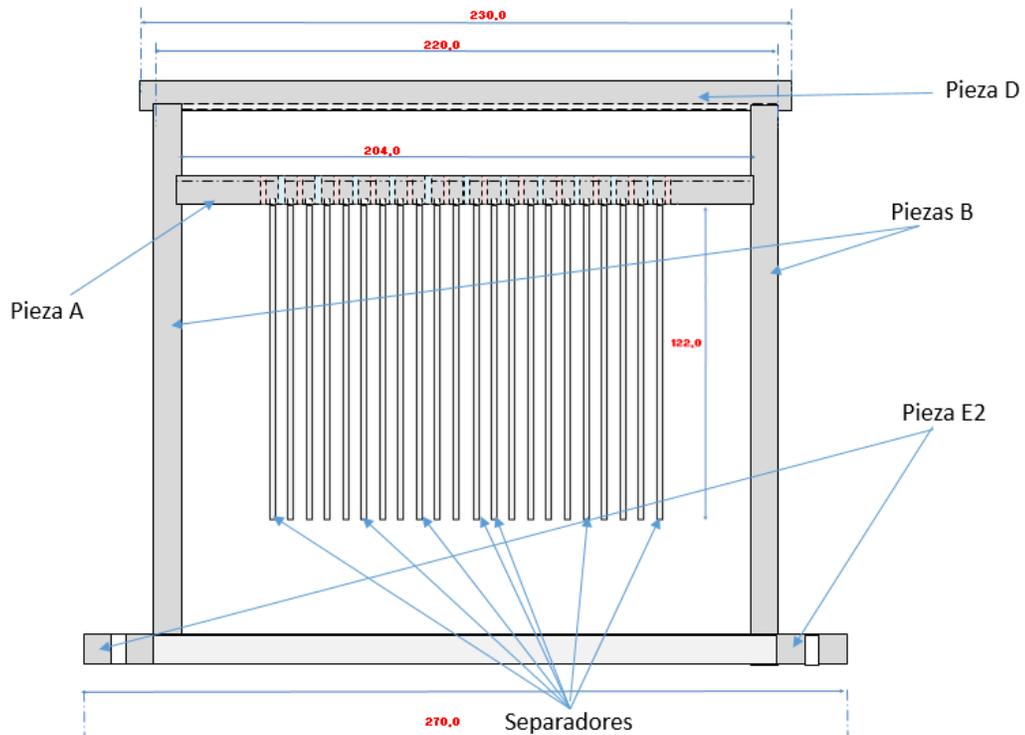


Figura 3-5: Esquema de la vista frontal parte superior de la celda



**Figura 3-6: Esquema de la vista lateral parte superior de la celda**

Para la confección de la celda se debe diseñar y cortar cada pieza descrita en las respectivas figuras 3-3, 3-4, 3-5 y 3-6. Todas las piezas de acrílico son diseñadas en Autocad, cortadas en una CNC y sus perforaciones son hechas con un taladro<sup>2</sup>.

Las piezas de acrílico para la parte superior de la celda se pueden observar en la Figura 3-7, la Figura 3-8, Figura 3-9, la Figura 3-10, la Figura 3-11, la Figura 3-12 y la Figura 3-13. Y para la parte inferior se muestran en la Figura 3-14, la Figura 3-15, la Figura 3-16, la Figura 3-17 y la Figura 3-18.

Es necesario notar que todas las medidas presentadas en las figuras presentes en este informe están en milímetros (*mm*).

---

<sup>2</sup> No se pudo hacer algunas perforaciones con la CNC producto de que no se pudo conseguir fresas del tamaño adecuado.

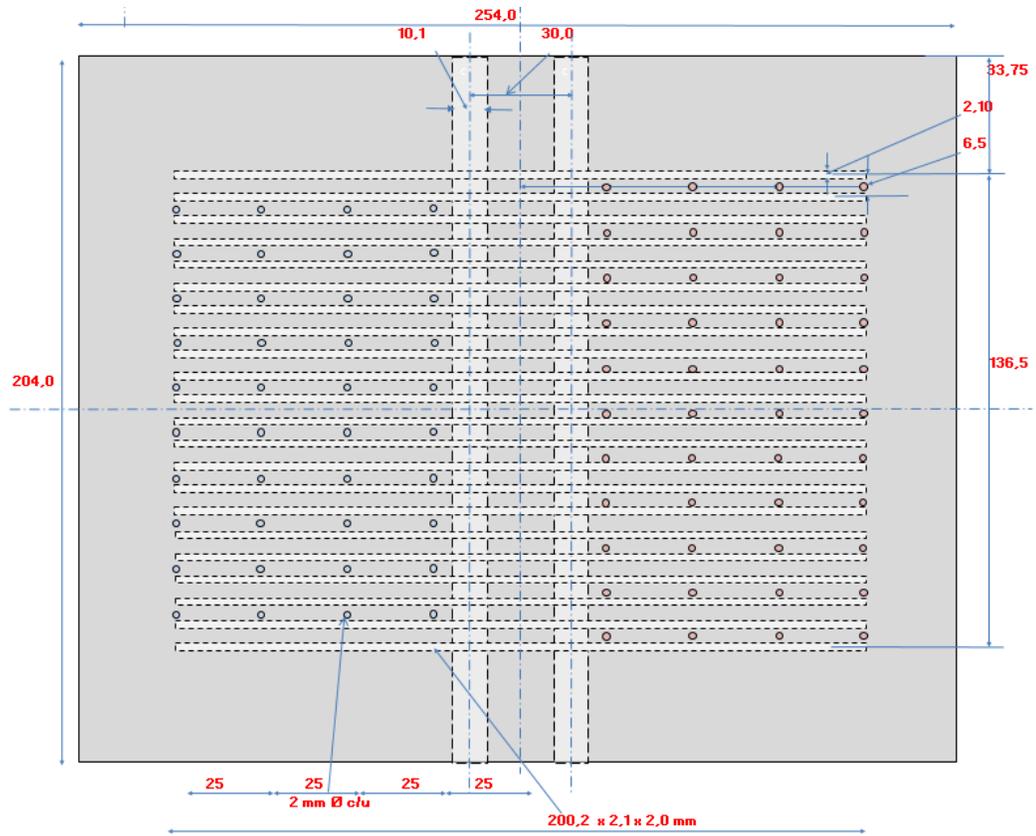


Figura 3-7: Esquema pieza A (celda)

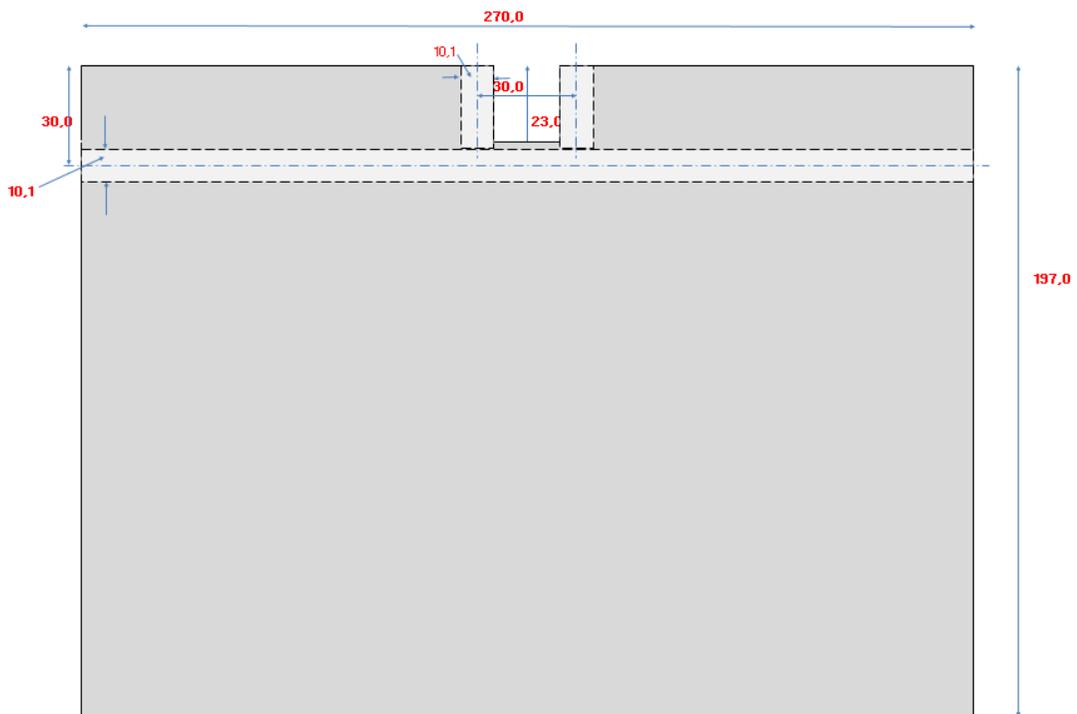


Figura 3-8: Esquema pieza B (celda)

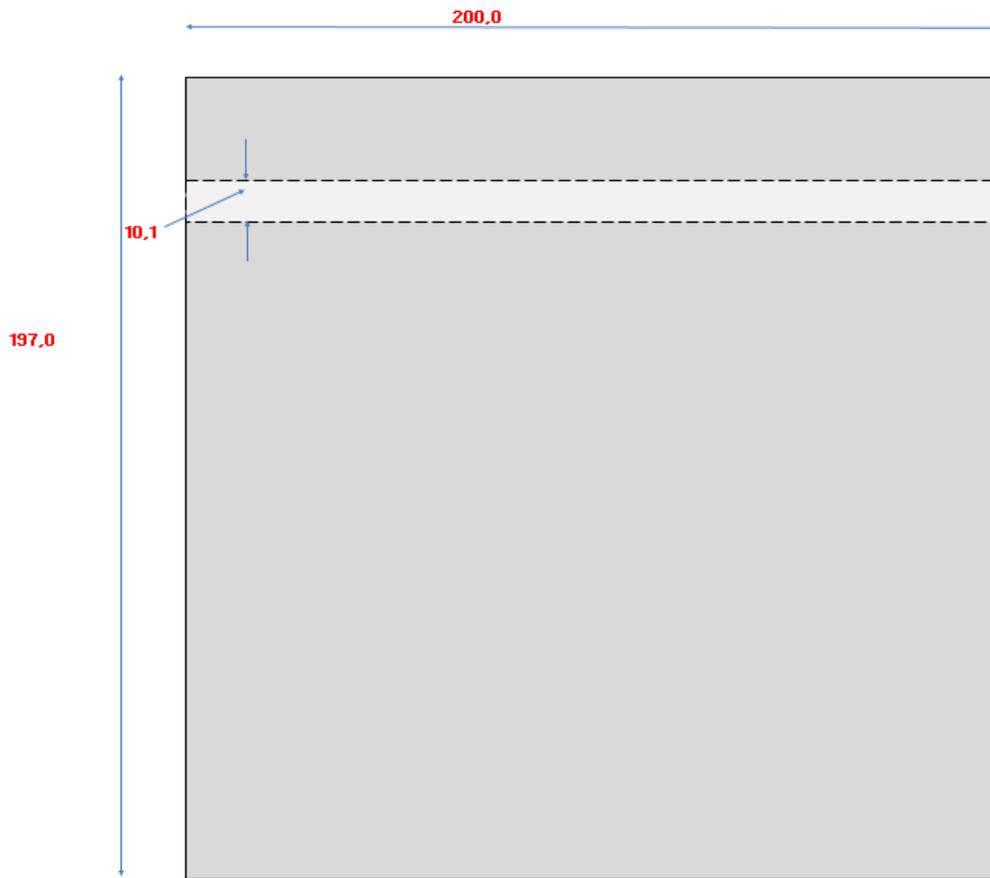


Figura 3-9: Esquema pieza C (celda)

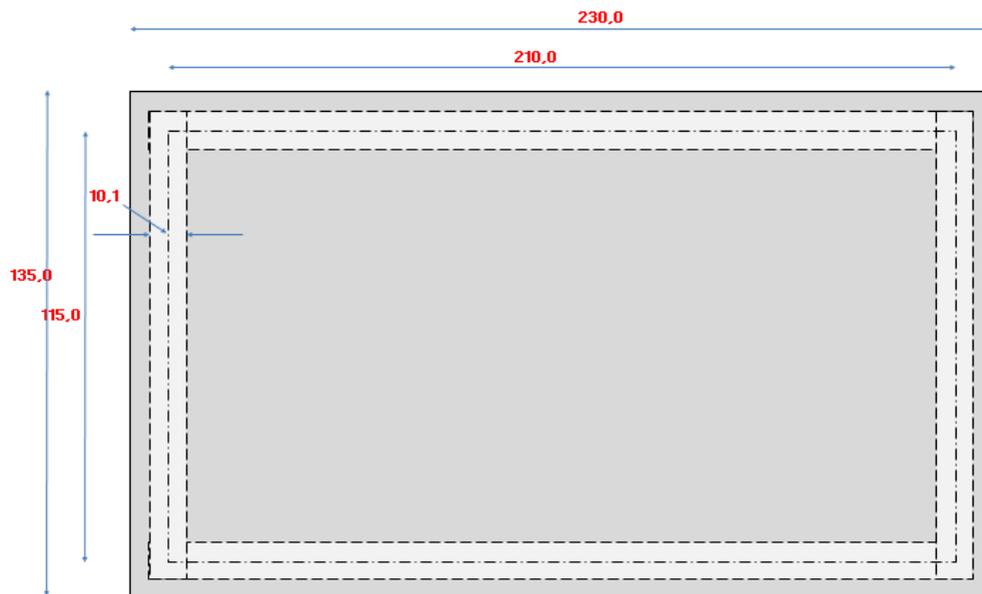


Figura 3-10: Esquema pieza D (celda)

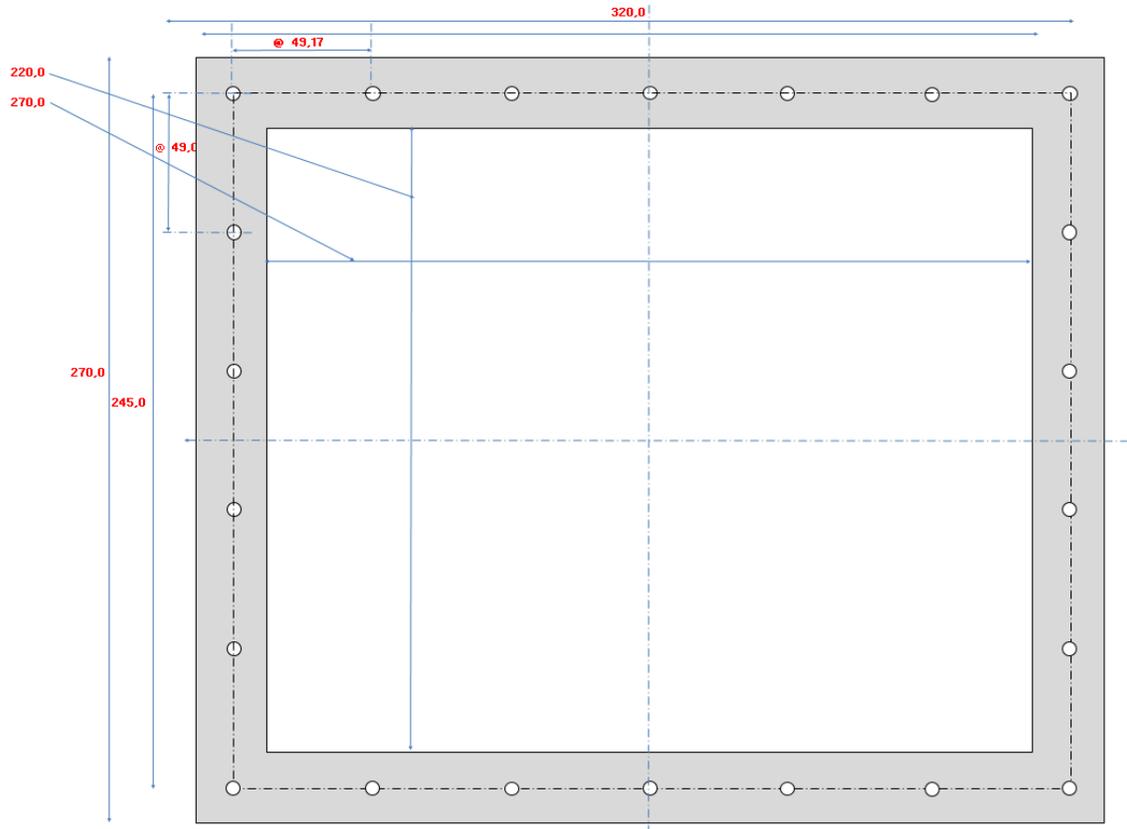


Figura 3-11: Esquema pieza E2 (celda)

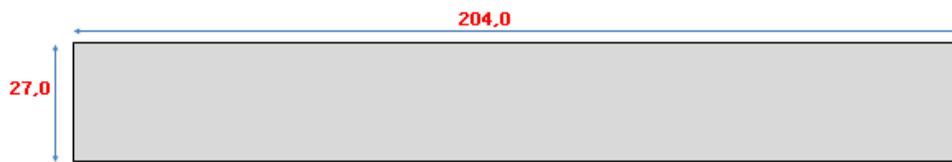
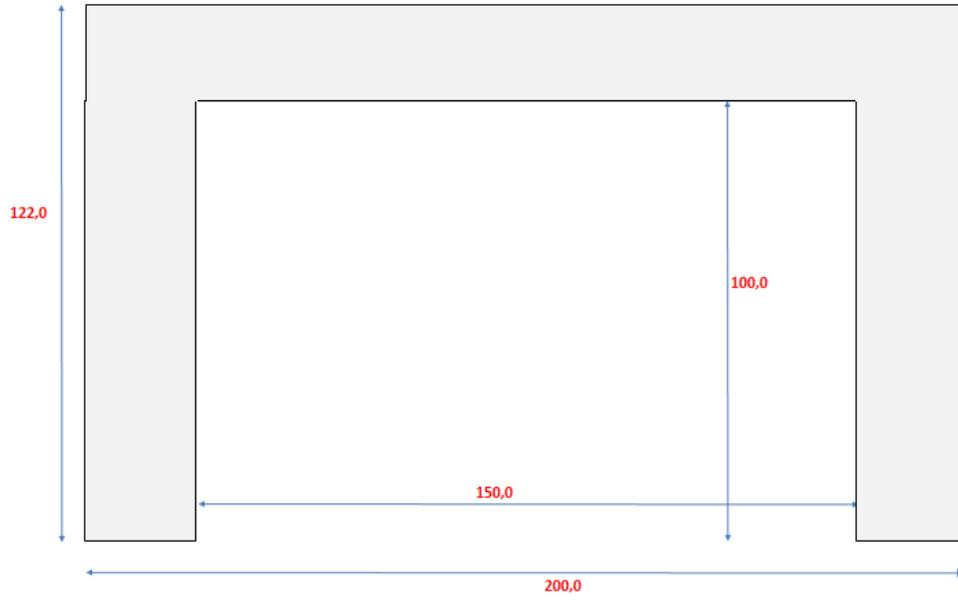
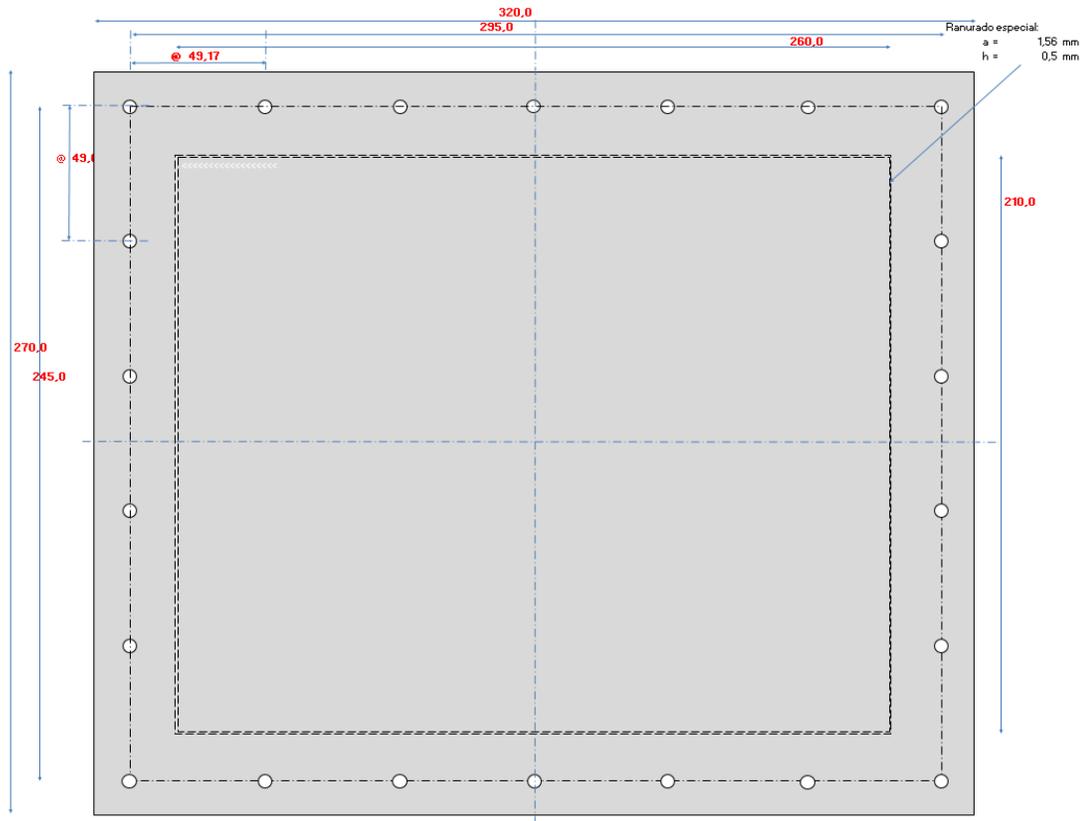


Figura 3-12: Esquema pieza F (celda)



**Figura 3-13: Separador**



**Figura 3-14: Esquema pieza E1 (celda)**

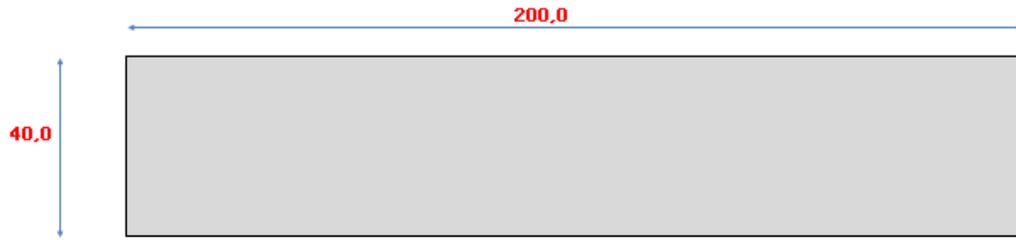


Figura 3-15: Esquema pieza G (celda)



Figura 3-16: Esquema pieza H (celda)

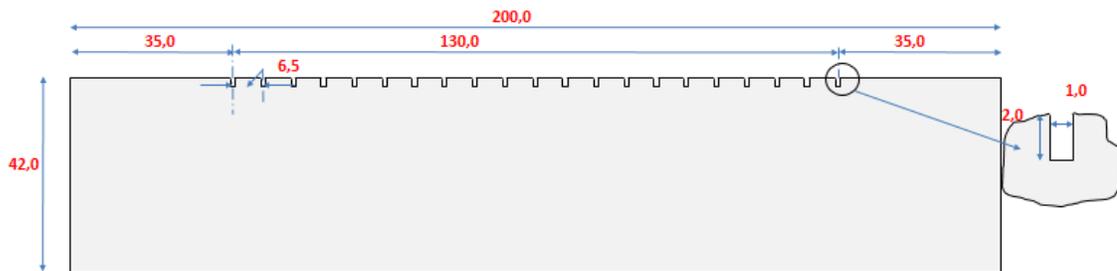


Figura 3-17: Pieza dentada

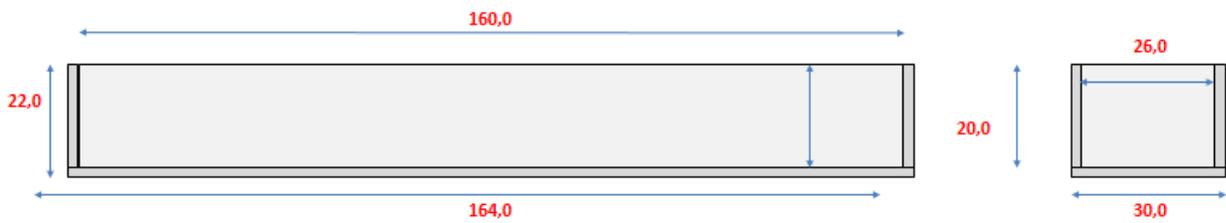


Figura 3-18: Cajón fijador

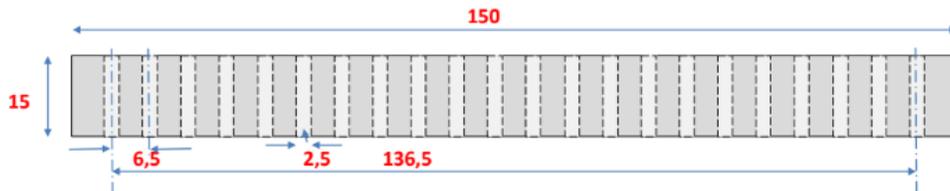
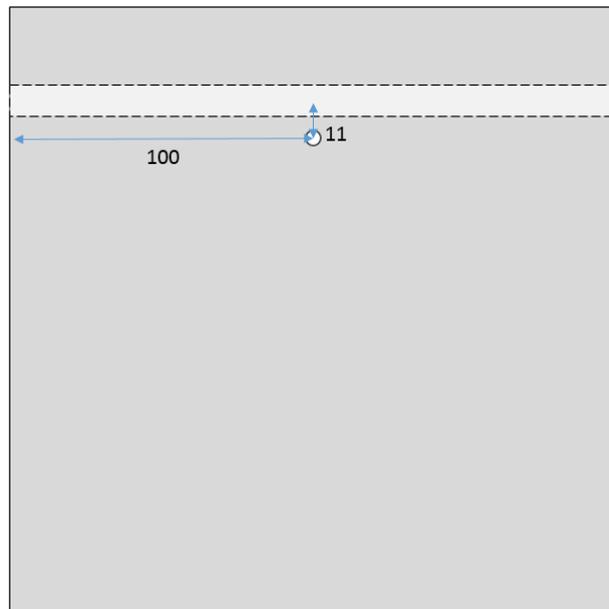


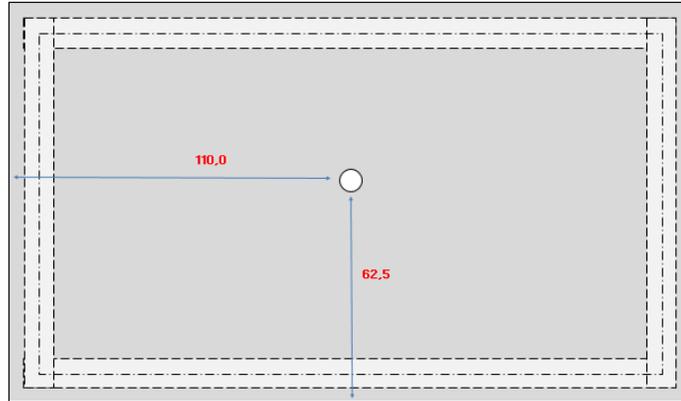
Figura 3-19: Fijador para separadores

Antes del armado y pegado de las piezas se deben hacer las perforaciones de 10 mm de diámetro con el taladro:

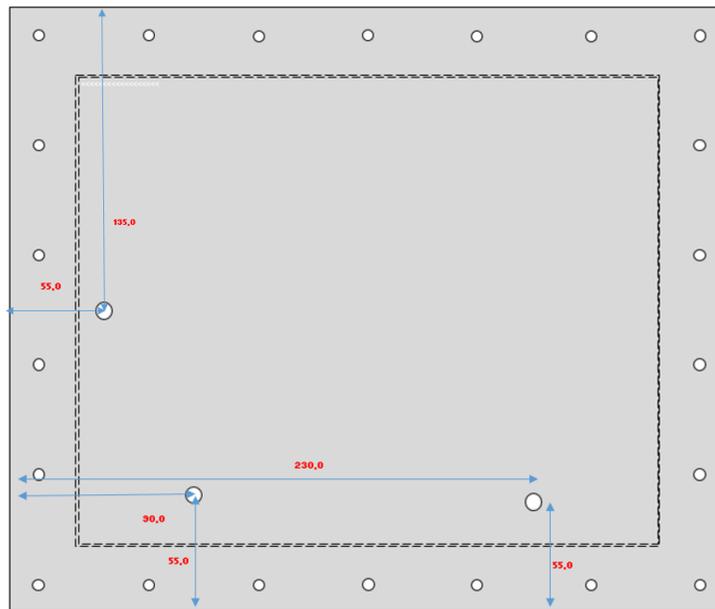
- A una de las piezas C se le debe perforar a 11 mm debajo del eje de la ranura y a 100 mm del borde, en la Figura 3-20. En esta perforación se va a colocar la espiga encargada del ingreso de agua a la celda, se le llamará espiga lateral.
- A las dos piezas D se les debe perforar justo en el centro de esta, como muestra la Figura 3-21. En estas perforaciones se van a colocar las espigas de cada gas, estas serán llamadas espiga superior de hidrógeno y espiga superior de oxígeno respectivamente, mostradas en la Figura 3-40.
- A la Pieza E1 se le hacen 2 perforaciones: una a 90 mm del borde izquierdo y a 55 mm del borde inferior, y la otra a 230 mm del borde izquierdo y a 55 mm del borde inferior. Las cuales son las encargadas de hacer pasar los cables para la conexión eléctrica. Además de estas perforaciones se le debe hacer otra más a 50 mm del borde izquierdo y a 135 mm del borde superior. En esta última perforación se coloca la espiga de salida de agua, la cual es mostrada en la Figura 3-41. Todas las perforaciones de la pieza E1 se pueden observar en la Figura 3-22.
- Por una de las piezas H se hacen 2 perforaciones en 65 mm y a 205 mm del borde izquierdo y a 20 mm del borde inferior, como se muestra en la Figura 3-23. Estos sirven para el paso de los cables para la conexión eléctrica.
- En la otra pieza H se hace una perforación a 20 mm del borde izquierdo y a 20 mm del borde superior, como se muestra en la Figura 3-24. A través de esta perforación se hace pasar la manguera de salida de agua.



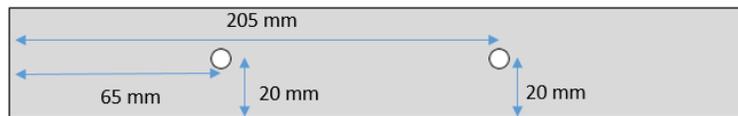
**Figura 3-20: Perforación pieza C**



**Figura 3-21: Perforación pieza D**



**Figura 3-22: Perforaciones pieza E1**



**Figura 3-23: Perforaciones pieza H frontal**



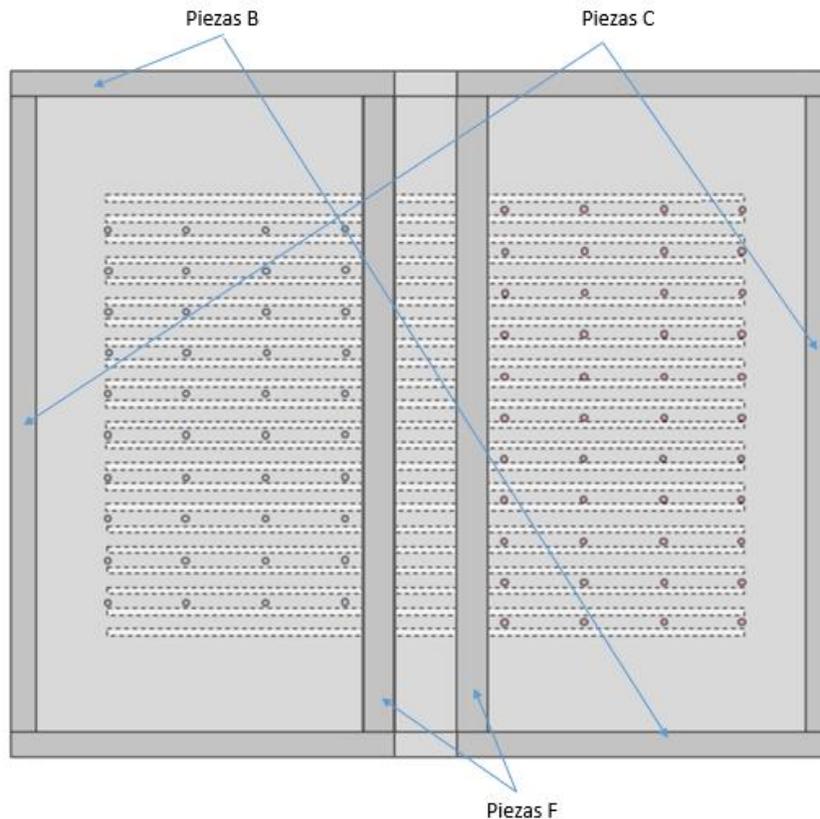
**Figura 3-24: Perforaciones pieza H posterior**

Para el armado de la parte superior, primero se pegan los 22 separadores de la pieza A, embutiéndolos en las ranuras de 2 mm de profundidad que esta posee y que se muestran con rectángulos punteados en la Figura 3-7.

Se puede observar en la Figura 3-7, Figura 3-8, Figura 3-9 y Figura 3-10 que las piezas A, B, C y D respectivamente, poseen una ranura de 10,1<sup>3</sup> mm de ancho y 2 mm de profundidad, las cuales sirven para encajar las piezas respectivas: en la parte superior e inferior de la pieza A van encajadas 2 piezas B, en las partes izquierda y derecha van encajadas dos piezas C y en las ranuras de la pieza A van encajadas dos piezas F, como muestra la Figura 3-25.

Después, en la parte superior de las piezas B, C y F se encajan las piezas D, y finalmente se encaja la pieza E2 en la parte inferior de la pieza superior, fijando las piezas B y C como se muestra en la Figura 3-42. Todas las piezas de acrílico que van pegadas a otra pieza de acrílico, la unión entre ellas se hace con cloroformo, silicona o con una mezcla entre cloroformo y virutas de acrílicos.

Se les adhiere a los costados, en la parte inferior, de los separadores los fijadores acrílicos, los cuales son tiras de 3 mm de espesor, 15 mm de ancho y 150 de largo, que tienen un rebaje de 1 mm de profundidad cada 6,5 mm y de 2,5 mm de ancho, como se muestra en la Figura 3-19.



**Figura 3-25: Pieza A con las piezas B, C y F encajadas**

<sup>3</sup> Se diseñó una ranura de 10,1 mm puesto que los acrílicos que van encajados en las ranuras tienen un espesor de 10 mm, el cual no es uniforme (existen partes de la superficie que tienen 10,1 mm y otras con 9,98 mm)

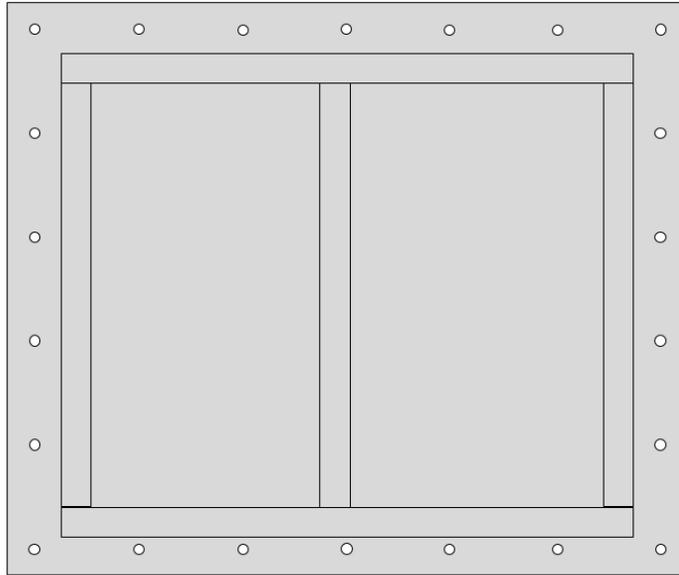
Finalizando el pegado de los acrílicos, se prosigue a pegar las espigas a las perforaciones utilizando resina epóxica @Poxipol.

El armado de la parte inferior de la celda consta de varias partes de diferente ámbito:

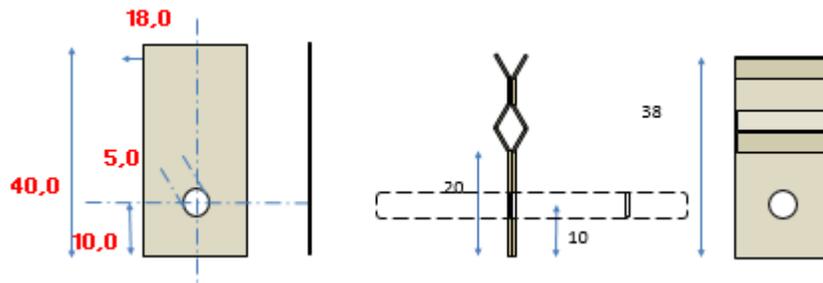
1. Se le pega un sello de goma al surco de la pieza E1 (parte punteada de la Figura 3-14).
2. Se arman 3 piezas G y dos piezas F y se pegan a la parte inferior de la pieza E1, como muestra la Figura 3-26.
3. Se cortan y moldean 21 fijadores para los electrodos, los cuales deben poseer la forma y características mostradas en la Figura 3-27.
4. Se arma el soporte de los electrodos utilizando dos pernos de 170 mm<sup>4</sup>, en los cuales se va a ir apernando a cada perno los fijadores a una distancia de 13 mm del otro fijador, de la forma que muestra la Figura 3-28, hasta llegar a apernar 10 fijadores en uno y 11 fijadores en el otro.
5. Cada perno, con sus respectivos fijadores, se les arma un terminal que lleva el cable de poder, como se muestra en la Figura 3-29 y se forma una estructura similar a la mostrada en la Figura 3-30.
6. Se arman 2 cajones fijadores utilizando piezas de acrílico de 2 mm de espesor con las medidas mostradas en la Figura 3-31. Y se arman y pegan como se muestra en la Figura 3-18.
7. Los dos pernos que tienen los diez y once fijadores respectivamente, se pegan a cada cajón fijador utilizando resina epóxica, formando los fijadores definitivos para los electrodos, los cuales deben ser pegados con cloroformo a la pieza E1, de tal forma que el cable de poder de cada cajón pase por la perforación respectiva de la pieza E1. De esta forma finalizando la pieza inferior, la cual es mostrada en la Figura 3-43.
8. Se colocan los electrodos de acero inoxidable, previamente cortados de la forma que se muestra en la Figura 3-32, en cada uno de los fijadores metálicos de la base mostrada en la Figura 3-43.

---

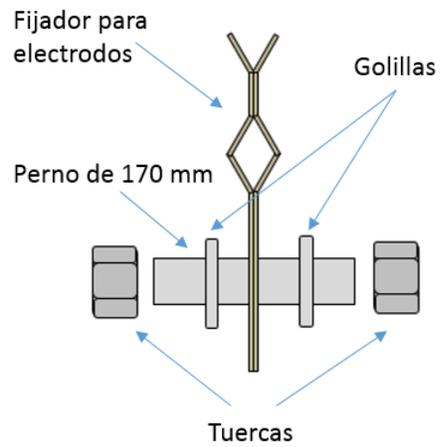
<sup>4</sup> El perno debe ser cortado a los 164 mm para que quepa en el cajón fijador



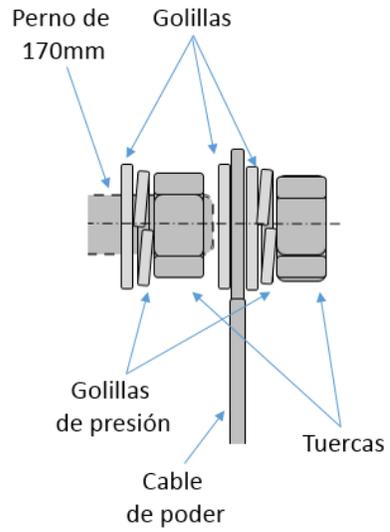
**Figura 3-26: Forma de armar los soportes de la celda**



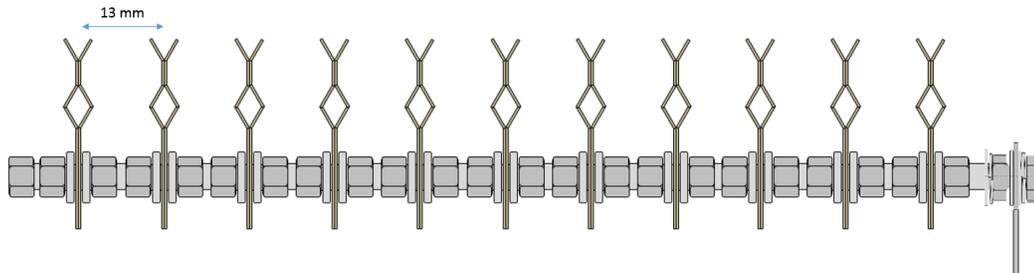
**Figura 3-27: Fijador para los electrodos**



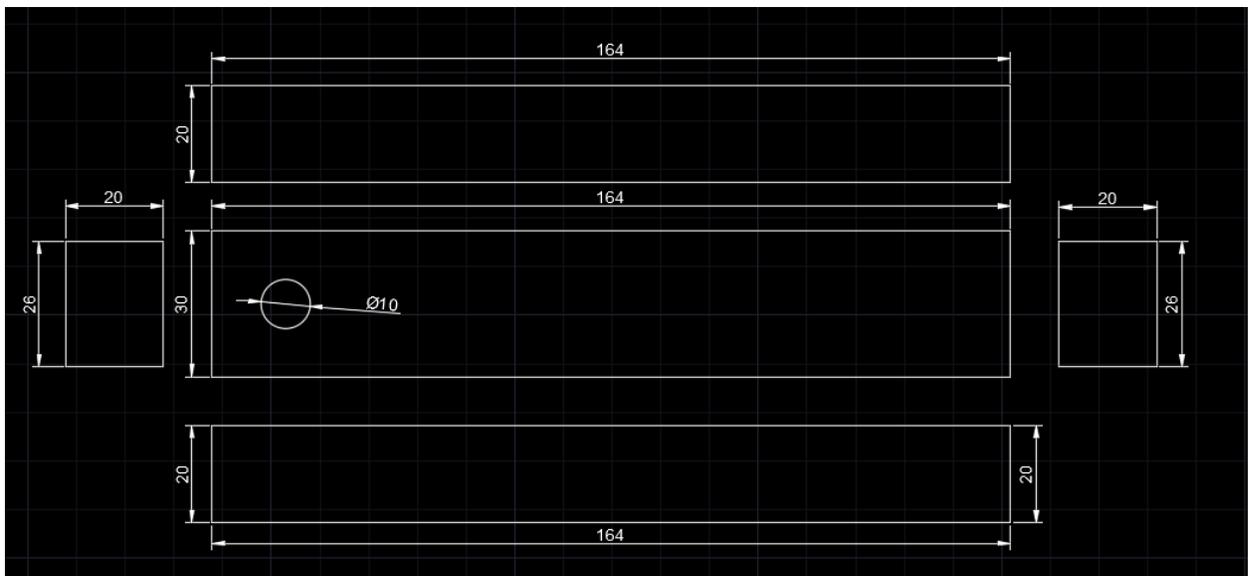
**Figura 3-28: Forma de colocar los fijadores de los electrodos**



**Figura 3-29: Terminal de los pernos eléctricos**



**Figura 3-30: Estructura de 11 fijadores con su respectivo terminal**



**Figura 3-31: Cortes de acrílico de 2 mm para cajón fijador**

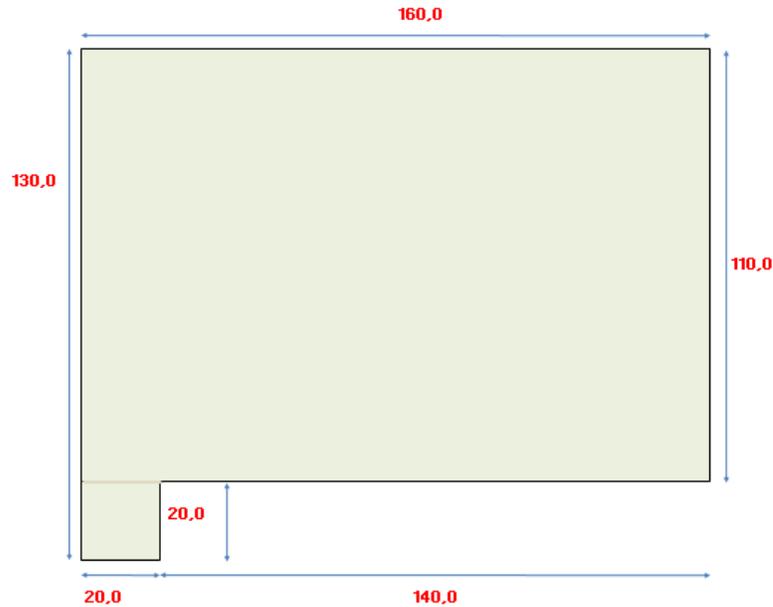


Figura 3-32: Electrodo de acero inoxidable

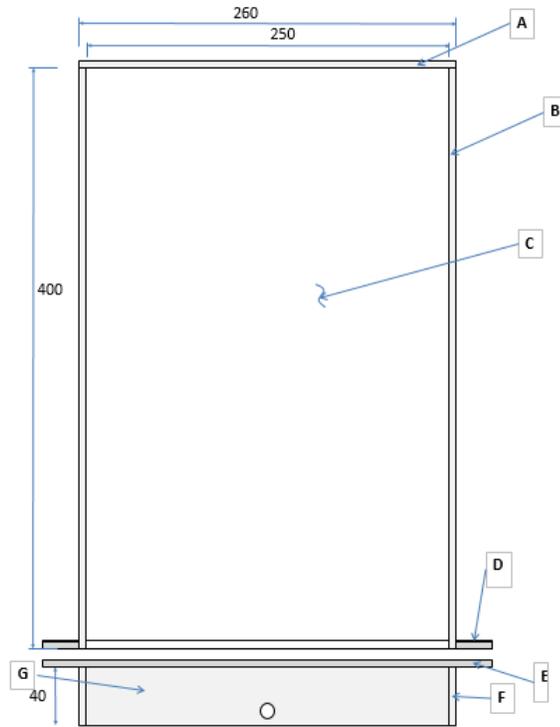
Teniendo las dos partes armadas de la celda se arman colocando la parte superior entrelazando los electrodos con los separadores, y después apernando (de la forma mostrada en la Figura 3-2) cada perforación exterior de la pieza E1 con su respectiva perforación de la pieza E2, de esta forma se termina el armado de la celda la cual es mostrada en la Figura 3-44.

### 3.1.2. Estanques

Los estanques de hidrógeno y oxígeno son exactamente iguales, y siguen la estructura mostrada en la Figura 3-33, donde las piezas para la construcción de esta son acrílicos rectangulares de 5 mm de espesor que tienen una medida mostrada en la Tabla 3-1, exceptuando las piezas D y E, las cuales son diseñadas de acuerdo a la Figura 3-34 y a la Figura 3-35.

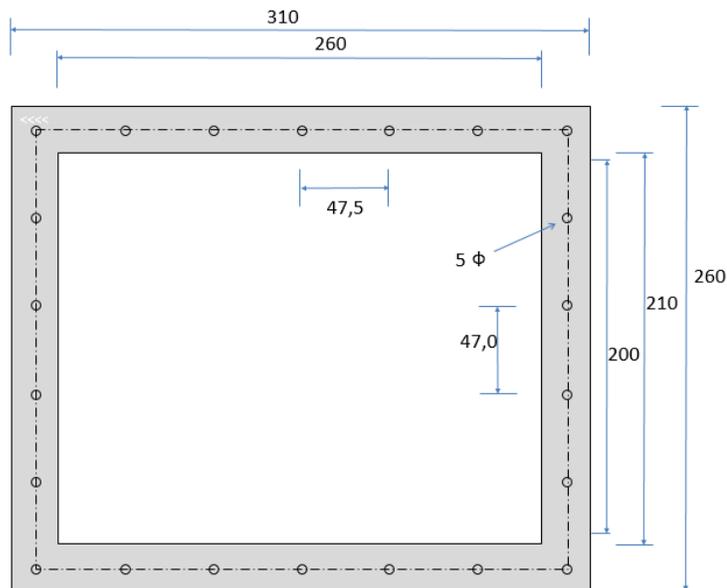
Tabla 3-1: Descripción de las piezas para cada estanque

PIEZA Nº	DESCRIP.	ANCHO [mm]	LARGO [mm]	CANTIDAD
A	Tapa	210	260	1
B	Lado menor	210	400	2
C	Lado mayor	250	400	2
D	Borde	310	260	4
E	Piso	260	310	1
F	Patas	40	210	2
G	Patas	40	200	2

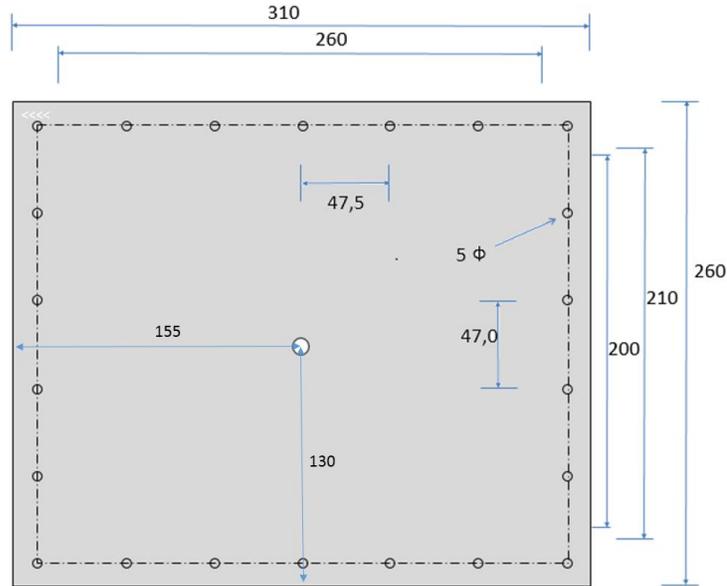


**Figura 3-33: Esquema de estanque**

Para el armado del estanque se pegan las piezas de la Figura 3-33 con cloroformo utilizando una jeringa como dispensador de este mismo y se refuerzan por dentro los vértices y aristas con silicona para evitar filtraciones.

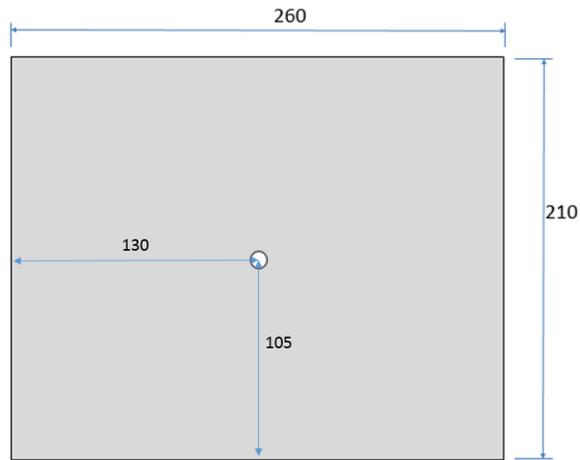


**Figura 3-34: Esquema pieza D (estanque)**



**Figura 3-35: Esquema pieza E (estanque)**

Para este proyecto se necesitan 3 perforaciones de 10 mm de diámetro: una en el centro de la tapa, una en el centro del piso y una a 100 mm del borde izquierdo y a 20 mm del borde superior. Estos son mostrados en la Figura 3-35, la Figura 3-36 y la Figura 3-37. Estas perforaciones son para colocar una llave con espigas para el ingreso y salida del gas (tapa), una espiga en L para el ingreso del agua (piso) y el paso de la manguera inferior, las cuales se muestran en la Figura 3-45 y la Figura 3-41. Tanto la llave como la espiga en L se adhieren a las perforaciones utilizando resina epóxica.

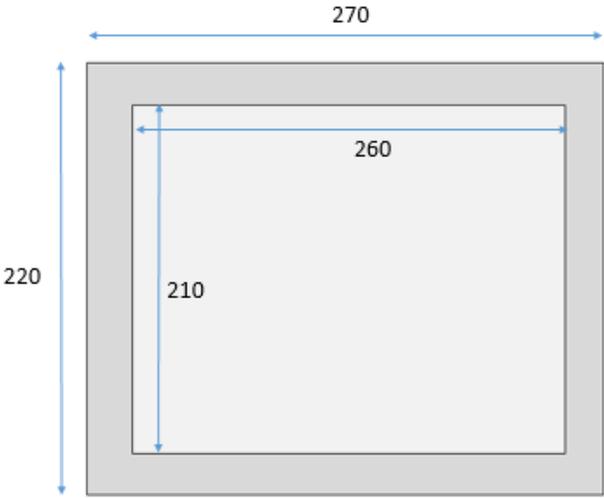


**Figura 3-36: Perforación pieza A (estanques)**

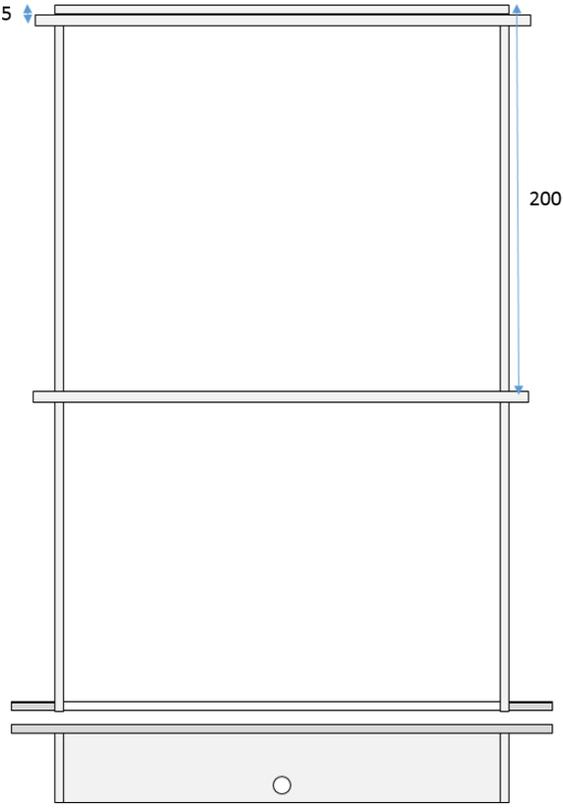


**Figura 3-37: Perforación pieza G (estanques)**

Por motivos de seguridad ante las posibles altas presiones, se le adhieren, utilizando cloroformo, 2 pedazos deacrílico de 5 mm a cada estanque, cortados con las medidas que se muestra en la Figura 3-38. Estos van a ir pegados por fuera de cada estanque a 5 mm y a 200 mm del borde superior, como se muestra en la Figura 3-39.



**Figura 3-38: Seguros para los estanques**



**Figura 3-39: Ubicación de los seguros**

Uno de los estanques terminado se puede observar en la Figura 3-46.

### 3.1.3. Desagüe

El desagüe que se eligió fue un cilindro de acrílico en altura, como se muestra en la Figura 3-47.

### 3.1.4. Conexiones

La conexión principal para el sistema de generación de hidrógeno es la llave cuádruple, la cual se arma utilizando los siguientes materiales:

- 3 espigas de bronce de 9,5 mm HE
- 30 cm de tubo de cobre de 9,5 mm
- 3 Terminales so-HI de 9,5x12,7 mm
- 3 Bujes de bronce 12,7x9,5 mm HE-HI
- 2 conectores en te so-so-so de 9,5 mm
- Llave de paso de paso reforzada so-so de 9,5 mm
- 1 rollo de teflón
- 1 espiga de bronce recta 9,5x12,7 mm

Y siguiendo los siguientes pasos:

- Se cortan 6 pedazos del tubo de cobre de 5 cm cada uno.
- Se conecta cada espiga a un buje colocando entremedio teflón.
- Se conectan los 3 sistemas espiga-buje a los terminales colocando entremedio teflón.
- Se sueldan 3 pedazos de tubo de cobre a cada sistema espiga- buje-terminal, obteniendo un dispositivo semejante al mostrado en la Figura 3-48.
- Se suelda la llave de paso a 2 pedazos de tubo de cobre y uno de los tubos a la espiga recta, obteniendo un sistema: tubo-llave-tubo-espiga, mostrado en la
- Se suelda un conector en te con un pedazo de tubo de cobre y a ese pedazo de cobre se le suelda el otro conector en te, obteniendo un sistema: conector-tubo-conector, como se muestra en la Figura 3-50.
- El sistema de la llave, mostrado en la Figura 3-49, se suelda al sistema de los conectores en te, mostrado en la Figura 3-50, por el lado del tubo de cobre, y cada cavidad libre del sistema de los conectores en te se suelda a los 3 sistemas de espiga-buje-terminal. Obteniendo el sistema mostrado en la Figura 3-51.

Las demás conexiones se realizan utilizando mangueras de bencina de 6 mm, y estas son:

- Conectar las espigas de la llave cuádruple a las espigas en L del piso de cada estanque y a la espiga lateral de la celda respectivamente.
- Conectar la espiga en L inferior de la celda con el desagüe.<sup>5</sup>
- Conectar las espigas superiores de los gases a la espiga inferior de cada tapa de los estanques.

---

<sup>5</sup> La conexión con el desagüe se hace asegurando la manguera a la parte superior de este, utilizando cinta adhesiva o algún otro adhesivo.

De esta forma, se termina el montaje del sistema de producción de hidrógeno, el cual es mostrado en la Figura 3-52.

### 3.2. Planos y fotos



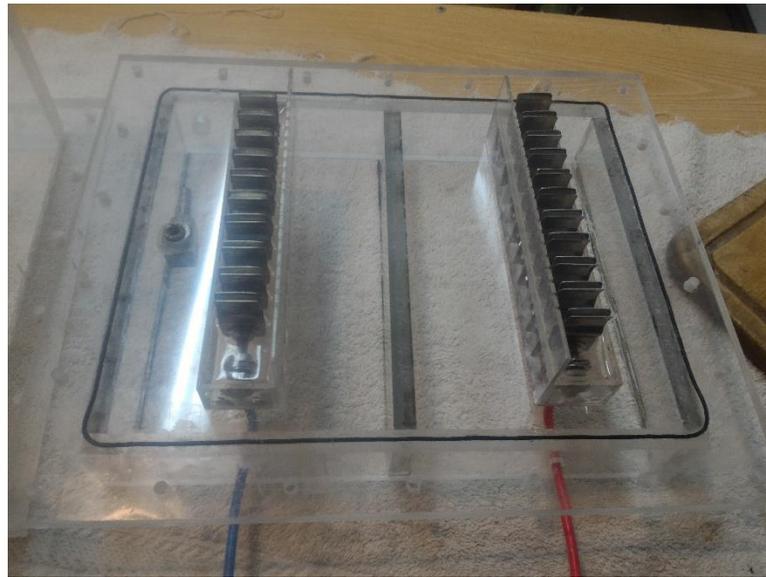
Figura 3-40: Espigas de la parte superior de la celda



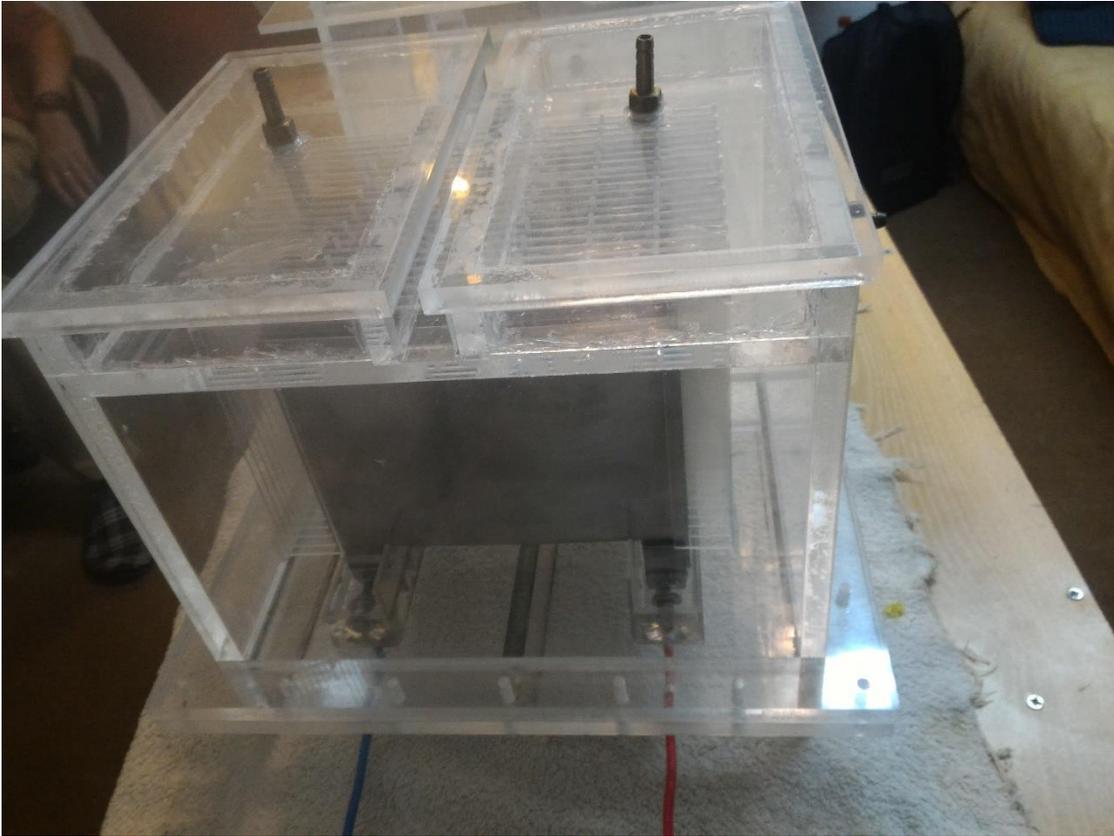
Figura 3-41: Espiga en L



**Figura 3-42: Parte superior de la celda**



**Figura 3-43: Parte inferior de la celda**



**Figura 3-44: Celda terminada**



**Figura 3-45: Llave superior de los estanques**



**Figura 3-46: Estanque**



**Figura 3-47: Desagüe**



**Figura 3-48: Brazo de la llave cuádruple unido a una manguera**



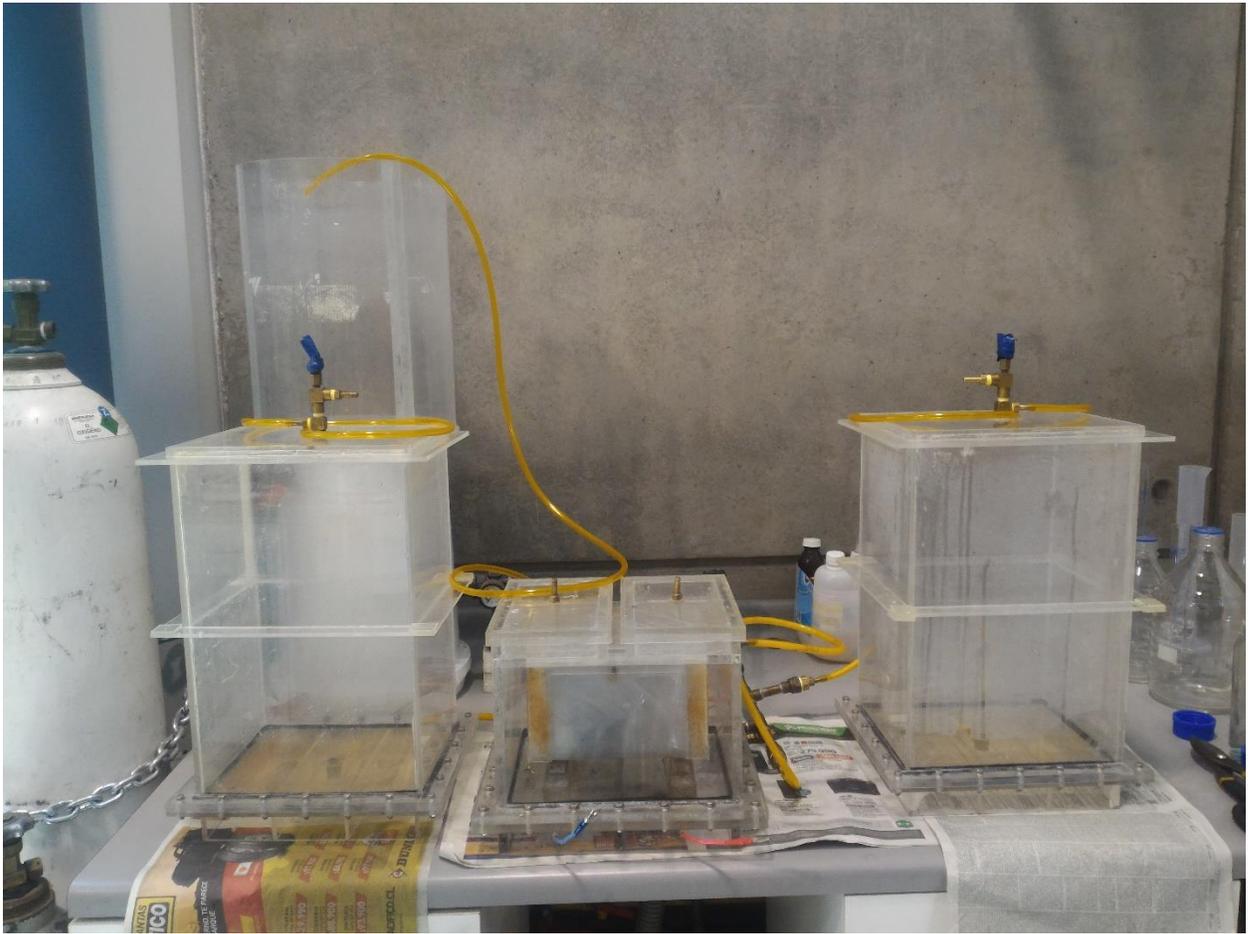
**Figura 3-49: Sistema de la llave**



**Figura 3-50: Sistema conector-tubo-conector.**



**Figura 3-51: Llave cuádruple**



**Figura 3-52: Montaje final del sistema de producción de hidrógeno**

A continuación se muestran los cortes en acrílico del proyecto principal.

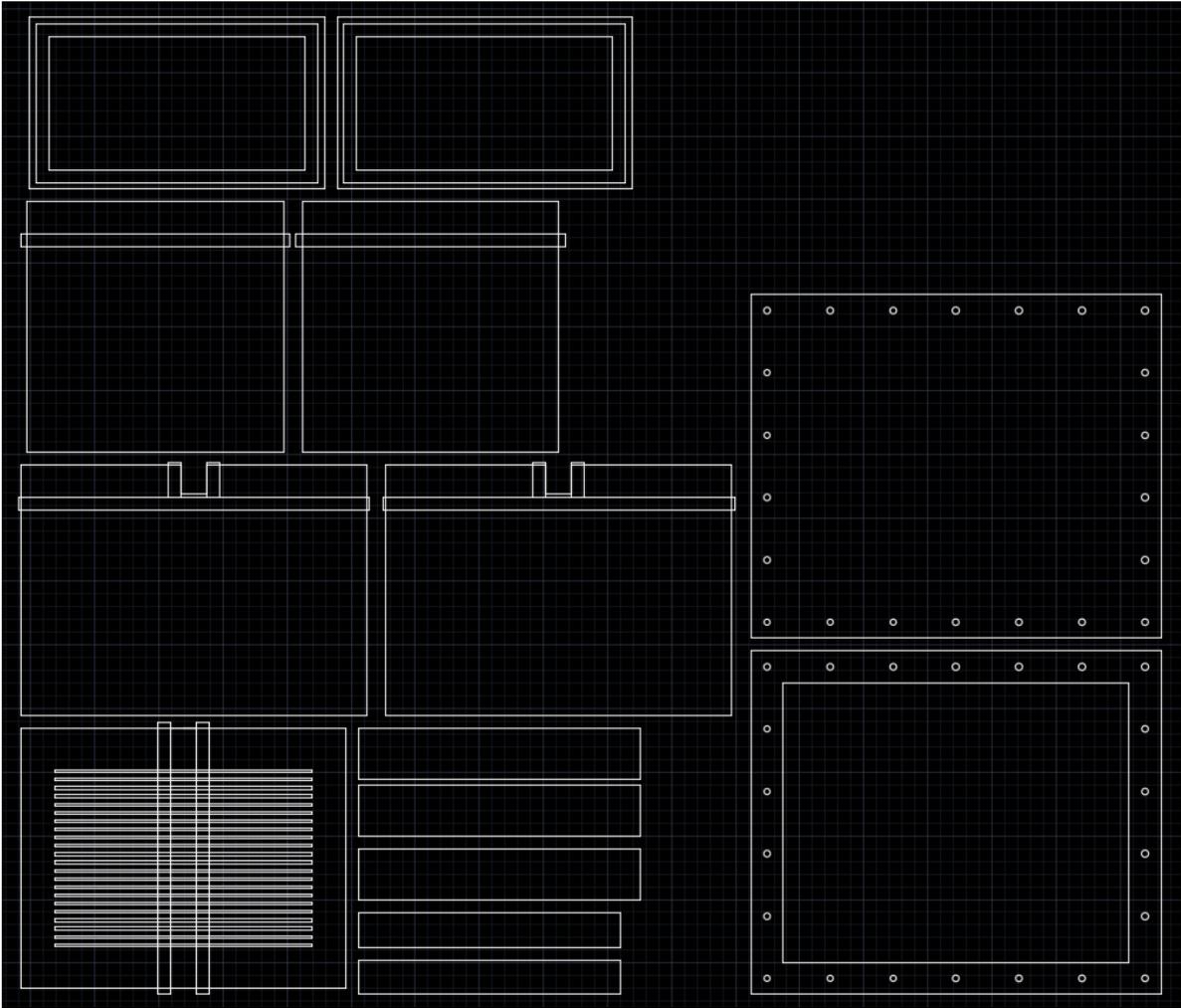


Figura 3-53: Proyecto de corte de plancha de 10 mm

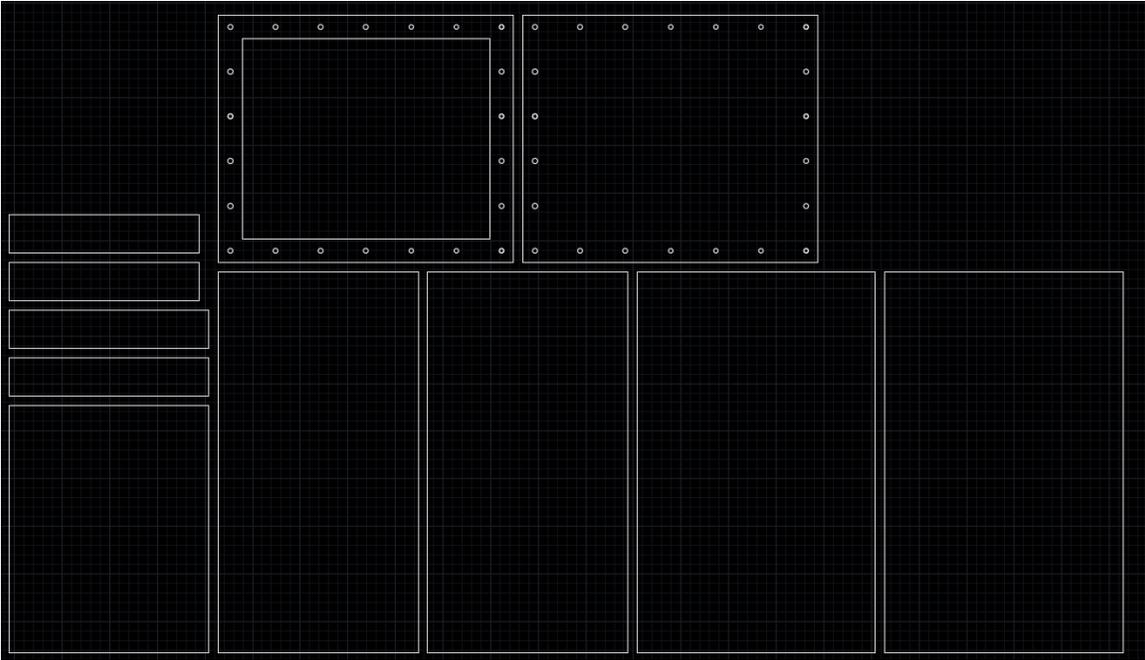


Figura 3-54: Proyecto de corte de plancha de 5 mm

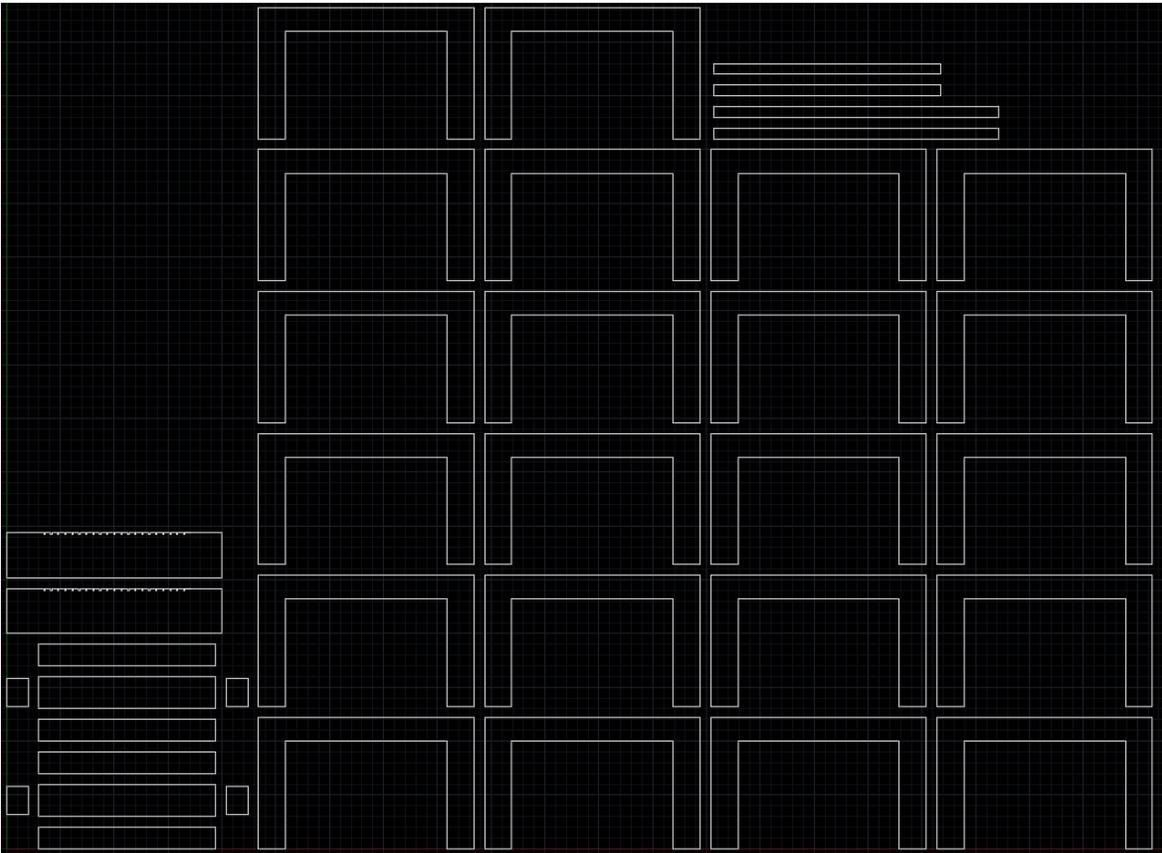


Figura 3-55: Proyecto de corte de plancha de 2 mm

### 3.3. Problemas técnicos y constructivos

Los proyectos de diseño y construcción, debido a la cantidad extensa de variables que poseen, estos tienen altas probabilidades de poseer problemas técnicos de todo tipo. Este proyecto no queda exento de esta cualidad, por lo que se prosigue a analizar los diferentes problemas ocurridos debido a variables no previstas.

#### 3.3.1. Abertura de la celda

El primer problema que se presentó fue la apertura de los componentes acrílicos producto de la presión del agua al momento de ser el sistema llenado: si se tiene un fluido en un contenedor cerrado la presión que va a ejercer va a ser la misma en todas las direcciones.

Los primeros diseños de la celda no poseían ranuras para embutir las otras piezas, por lo que toda la presión del fluido la contenía la unión entre los acrílicos realizada con cloroformo. Al no ser una unión entre acrílicos perfecta, es fácil que la presión ejercida por el agua rompa estas uniones. Si a esto le sumamos la presión generada por la producción de hidrógeno y el flujo de agua hacia el estanque, se tiene como resultado la apertura de la celda.

Esto se arregló con una ranura hecha a las diferentes piezas, y así embutir las piezas antes de pegarlas. De esta forma las presiones son recibidas tanto por la unión acrílico-acrílico como por la pieza que tiene al lado.

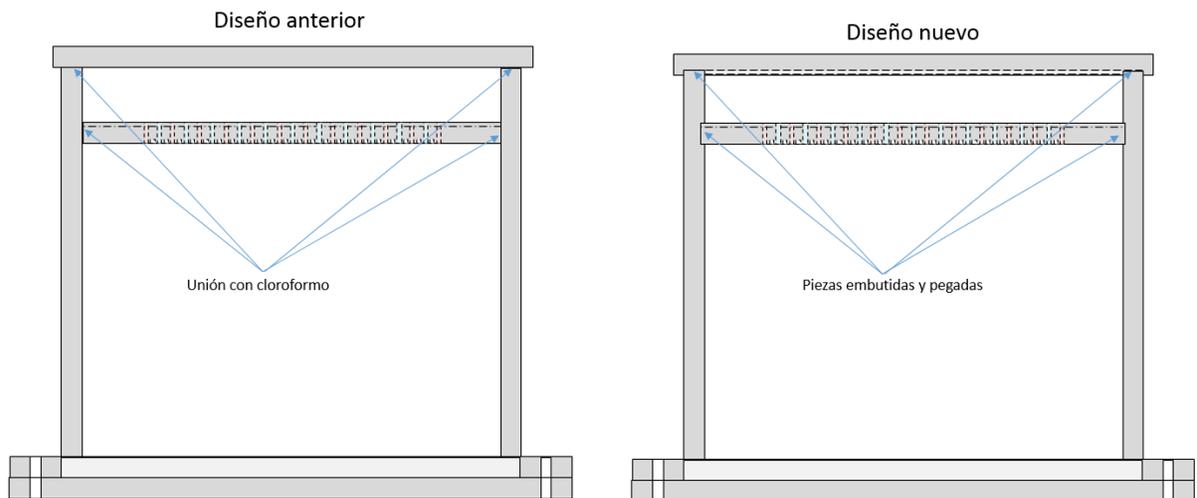
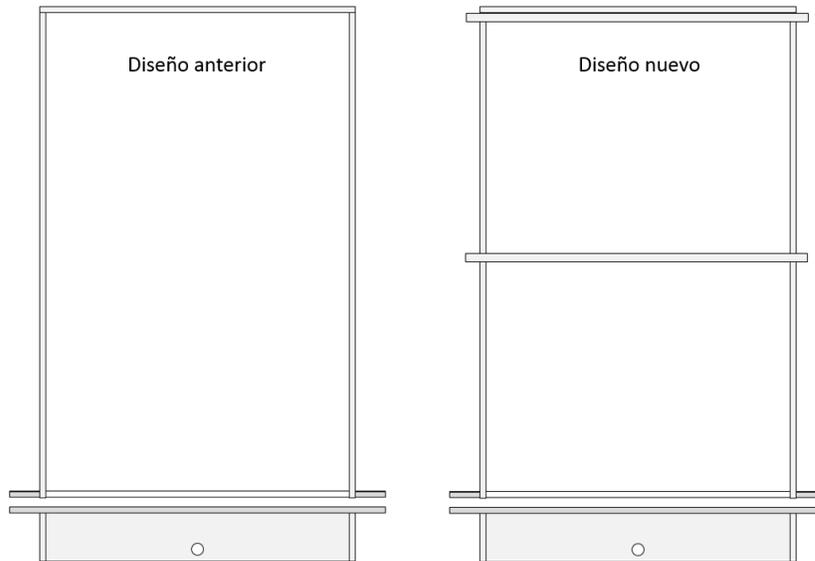


Figura 3-56: Diseño de unión antiguo y nuevo

#### 3.3.2. Abertura de los estanques

Después de reparar el problema visto en 3.3.2, se produjo el mismo en los estanques. Este se reparó de manera más sencilla: colocando las piezas vistas en la Figura 3-38 en la parte superior y central de los estanques. Esta solución fue suficiente para evitar dicho problema, por lo que se evitó el gastar material en la construcción de nuevos estanques.



**Figura 3-57: Estanque sin seguros (izquierda) y estanque con seguros (derecha)**

### 3.3.3. Curvatura de la pieza A

La pieza A diseñada como se muestra en la Figura 3-7 se implementó en acrílico de 2 mm de espesor, lo que causó una curvatura de esta misma producto de la presión ejercida por el peso del agua y el flujo de agua desde la llave cuádruple.

Se cambió el espesor de los acrílicos que componen a la celda, de 2 mm a 10 mm, para que de esta forma todas las paredes, bases y piezas sean más robustas. De esta forma se impide tanto la curvatura como la ruptura de las piezas.



**Figura 3-58: Vista lateral de Pieza A de 2 mm de espesor (izq.) y Piezas A de 5 mm de espesor (der.)**

### 3.3.4. Explosión de los estanques

Durante el llenado del sistema, los estanques han sufrido la salida abrupta de una de sus paredes, lo que provocó la salida de toda el agua dentro de este. Esto se produjo por la acumulación de gas a presión dentro de este mismo dado que no se posee una salida para este.

La solución que se optó fue el llenado de la celda desconectando la parte superior de los estanques y las espigas de gases de la celda, y dejando las mangueras conectadas desde las espigas de hidrógeno y oxígeno, respectivamente, hacia el desagüe. De esta forma, durante el llenado del sistema, el aire dentro de los estanques y la celda puede fluir libremente hacia el exterior, y cuando comience a salir agua por las espigas superiores de los estanques se debe conectar esta con su respectiva manguera de gas de la celda.

## 4. Generación de hidrógeno a partir de agua potable

Las siguientes pruebas son necesarias para determinar el correcto funcionamiento de la celda. Para esto, se debe realizar un montaje del esquema mostrado en la Figura 3-1, el cual se concreta en el laboratorio mostrado en la Figura 3-52.

Se debe llenar el sistema de celda y estanques con agua potable de la siguiente forma: se colocan los estanques y la celda en la misma superficie y, utilizando la llave cuádruple (mostrada en la Figura 3-51) alimentada desde la red de agua potable, se alimenta simultáneamente a la celda y a los dos estanques. Se debe ir subiendo gradualmente la presión, monitoreándola; siempre teniendo la manguera que conecta la parte superior de la celda con los estanques desconectada de estos últimos y puesta en el lugar donde está el desagüe y las llaves de paso de los estanques cerradas. Cuando se llenan los estanques y comienza a salir agua por las mangueras superiores de la celda y por las espigas superiores de los estanques, se procede a conectar estos y cortar el flujo de agua.

### 4.1. Medición de parámetros eléctricos y volumen producido.

Una vez que el sistema de celda-estanques se encuentra lleno de agua potable se procede a conectar la fuente de poder y se alimenta la celda con corrientes cercanas a los 3, 5 y 9 amperes. Se mide la tensión en los bornes de la celda (para evitar la caída de tensión de los cables) y se mide la corriente que pasa por el sistema.

Esta prueba se realizó con valores cercanos a los indicados en el punto 4.1, ya que, utilizando una fuente de poder análoga es difícil tener una alta precisión, por lo que se hace esta prueba con valores cercanos a 3,1 [A] y 3,15 [V], y 8,6 [A] y 4,2 [V]. Aparte de esto, cuando se utiliza el modo de trabajo en paralelo de las dos fuentes internas, la corriente máxima es 8,69 amperes, a diferencia de los 10 amperes que dice en la placa (5 amperes por cada una).

Se inyecta energía eléctrica a la celda durante 1 hora y 20 minutos y se van tomando los datos cada 5 minutos, y Evaluación de la eficiencia energética, y en cada muestra se determina la eficiencia de la celda teniendo en consideración lo siguiente:

- Se tomaron 2 tipos de eficiencia: eficiencia eléctrica y térmica
- La eficiencia eléctrica se determina utilizando la cantidad de energía que podría entregar 1 mol de hidrógeno en el caso de utilizar una celda de combustible con eficiencia 1, la cual sería la entalpía de disociación del agua:  $E_{hidrógeno} = 237,22 [kJ]$ .

$$Eficiencia_{eléctrica} = \frac{E_{hidrógeno}}{E_{utilizada}} \quad (4.1)$$

- La eficiencia eléctrica se determina utilizando la cantidad de energía que podría entregar 1 mol de hidrógeno en el caso de que este se usara para la producción de calor, la cual sería la entalpía de disociación del agua más la entalpía de evaporización del agua:  $237,22 [kJ] + 44,1 [kJ] = 281,32 [kJ]$ , utilizando la ecuación (4.2).

$$Eficiencia_{térmica} = \frac{E_{hidrógeno} + E_{vap}}{E_{utilizada}} = \frac{281,32 [kJ]}{E_{utilizada}} \quad (4.2)$$

- La energía utilizada se determina multiplicando la corriente, la tensión y el tiempo transcurrido.
- Se utiliza una eficiencia instantánea, la cual se determina de la siguiente forma:
  - El volumen de hidrógeno se pasa a moles, dividiendo por el factor visto en (2.4): 22,4 [lt · mol<sup>-1</sup>]. Aunque este factor debe ser corregido producto de la presión interna que se posee en cada estanque, por lo que el volumen de hidrógeno debe ser dividido por un factor de  $\frac{22,4}{f_{\text{corrección}}}$  [lt · mol<sup>-1</sup>].
  - Se transforma la energía por mol de kJ a Wh usando la conversión  $\frac{1000[Wh]}{3600[kJ]}$ .
  - Se multiplica la cantidad de moles de hidrógeno por la cantidad de energía que posee un mol (en Wh).
  - Se divide la energía contenida en el hidrógeno por la cantidad de energía utilizada, formando la ecuación (4.3).

$$Eficiencia_{instantánea} = \frac{\left( \frac{Volumen_{hidrógeno}}{\left( \frac{22,4}{f_{\text{corrección}}} \right)} \right) \cdot \left( S \cdot \frac{1000}{3600} \right)}{V \cdot I \cdot t} \quad (4.3)$$

- El tiempo para determinar la eficiencia instantánea es de 5 minutos.

Teniendo estas consideraciones, se prosigue a calcular la eficiencia que posee la celda de acuerdo a la cantidad de energía eléctrica que se le inyecta al sistema. Los gráficos y las tablas determinadas se muestran en la Tabla 4-1, la Tabla 4-2, la Figura 4-1 y la Figura 4-2, respectivamente.

**Tabla 4-1: Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 3,2 A**

<i>I</i>	<i>U</i>	<i>Eficiencia eléctrica</i>	<i>Eficiencia térmica</i>
[A]	[V]	[%]	[%]
3,10	3,14		
3,11	3,14	48,2	57,2
3,11	3,14	43,4	51,5
3,09	3,15	45,1	53,5
3,11	3,15	45,8	54,4
3,11	3,15	44,4	52,6
3,12	3,14	45,0	53,3
3,13	3,14	44,7	53,0
3,14	3,14	44,5	52,8
3,20	3,14	43,2	51,2
3,26	3,13	42,1	49,9
3,22	3,13	42,1	49,9
3,17	3,13	42,1	50,0
3,2	3,13	41,4	49,1
3,18	3,13	40,8	48,4

Tabla 4-2: Eficiencia eléctrica y térmica para corrientes cercanas a 8,6 A

$I$ [A]	$U$ [V]	Eficiencia eléctrica [%]	Eficiencia térmica [%]
8,71	4,13		
8,65	4,13	31,7	37,5
8,61	4,13	34,4	40,8
8,59	4,13	33,5	39,8
8,59	4,16	34,4	40,8
8,58	4,16	33,3	39,5
8,56	4,18	33,5	39,7
8,58	4,19	33,9	40,2
8,58	4,21	33,6	39,8
8,56	4,22	33,3	39,5
8,58	4,23	33,6	39,9
8,60	4,23	33,2	39,3
8,64	4,24	33,2	39,4
8,65	4,24	33,0	39,1
8,69	4,24	32,7	38,7

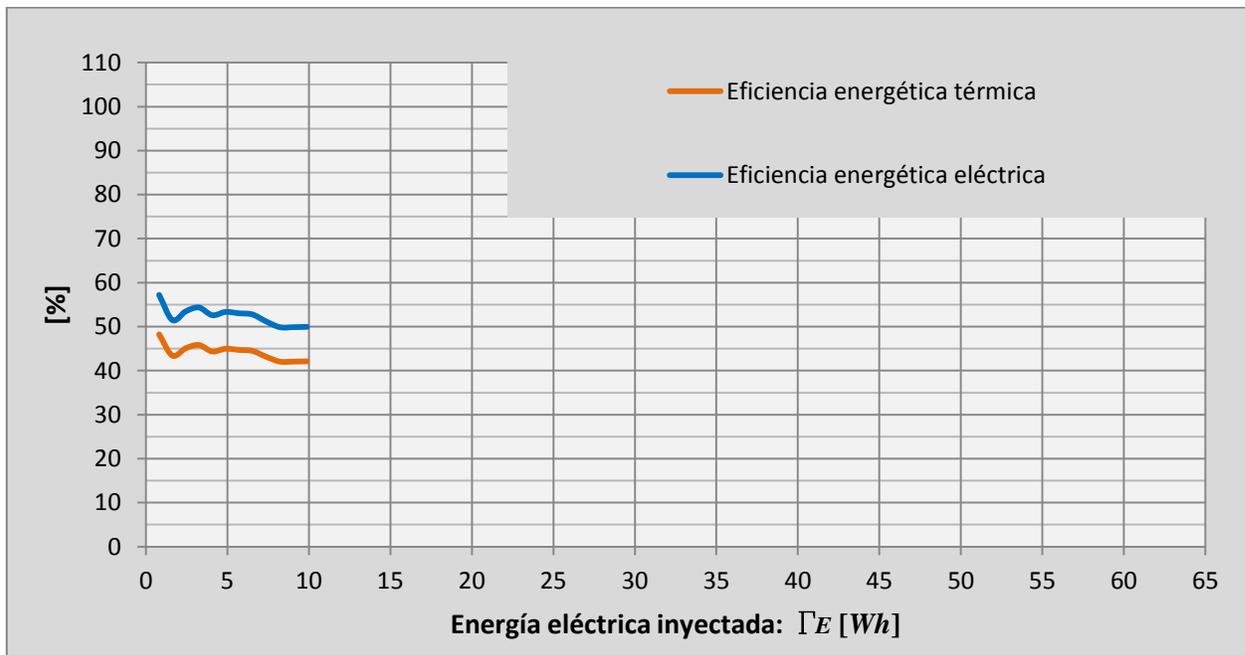
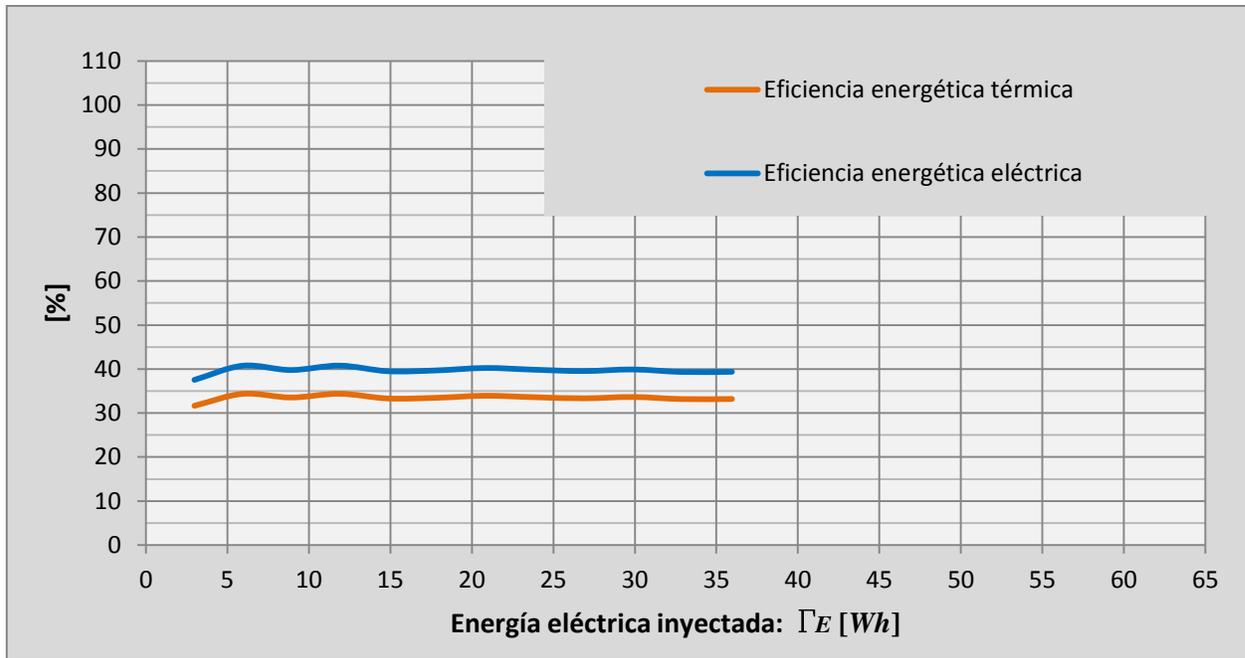


Figura 4-1: Gráfico de la eficiencia en función de la energía inyectada para la prueba a 3,2 A y 3,15 V



**Figura 4-2: Gráfico de la eficiencia en función de la energía inyectada para la prueba a 8,7 A y 4,2 V**

Se puede observar en la Figura 4-1 y la Figura 4-2 que las eficiencias tienden a un valor fijo y no poseen una dispersión muy elevada, por lo que se puede calcular la eficiencia de la celda sacando el promedio de los datos presentados en la Tabla 4-1 y en la Tabla 4-2. Los cuales se muestran en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3: Media y desviación estándar para las diferentes tipos de eficiencia**

	Media
Eficiencia eléctrica a 3,2 A y 3,15 V	43,1
Eficiencia térmica a 3,2 A y 3,15 V	51,9
Eficiencia eléctrica a 8,7 A y 4,2 V	33,4
Eficiencia térmica a 8,7 A y 4,2 V	39,6

Se puede notar en la Tabla 4-3 que la eficiencia térmica es mayor que la eléctrica, lo cual era de esperar debido a que la eficiencia térmica considera que también se le puede extraer la entalpía de evaporación al hidrógeno. Además, se puede notar que tanto la eficiencia eléctrica como la eficiencia térmica disminuyen cuando se aumenta la corriente de operación, esto se debe a que aumentan las pérdidas de Joule por los cables de conexión y, además, la caída de tensión en los electrodos es mayor, lo que provoca pérdidas de Joule adicionales en el agua.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de una celda para la producción de hidrógeno. Al ser un trabajo de memoria del tipo práctico, se propone un trabajo similar al que poseen los proyectos de ingeniería, exceptuando algunas etapas que no serían necesarias, y colocando una componente de retroalimentación la cual indica que se deben repetir pasos previos en el caso de que falle algún componente de la celda.

Las eficiencias presentadas son bajas, lo que se debe a varios factores:

- Se trabajó a baja presión: cuando se trabaja a altas temperaturas y presiones el proceso de la electrólisis es más eficiente.
- Se trabajó con agua potable sin adición de algún electrolito: si se disuelve un electrolito en el agua, la conductividad de esta solución va a ser mayor que la del agua potable, por lo que la resistencia será menor y la eficiencia aumentará.
- Se trabajó con una gran separación de las placas: mientras mayor sea la separación entre los electrodos, mayor va a ser la cantidad de agua entre estos, y en consecuencia, la resistencia entre estos será mayor.
- El electrodo no fue el óptimo: el acero inoxidable se corroe y no es un catalizador de ninguna de las reacciones presentadas en (2.11) y (2.12).

La celda construida puede trabajar en perfectas condiciones para la producción de hidrógeno a corrientes inferiores a 8,71 amperes, frente a valores superiores no se puede determinar un funcionamiento apropiado puesto que puede fallar algún componente acrílico.

La producción de hidrógeno tiene una eficiencia mayor cuando se trabaja a potencias menores, producto de que las pérdidas eléctricas en los cables y de que mientras mayor sea la densidad de corriente mayor es la caída de tensión entre los electrodos.

### 5.1. Trabajo futuro

Se propone como trabajo futuro la implementación de las siguientes tecnologías como mejora de la celda actual o para el diseño de una nueva celda:

- Colocar a la salida del hidrógeno un sistema para purgar el gas, el cual vaya conectado a un mechero bunsen. Todo esto con el fin de tener un sistema en el que el flujo de salida de hidrógeno sea seguro y controlado.
- El uso de otros electrodos, como níquel, níquel-molibdeno o molibdeno, para disminuir la formación de óxidos e hidróxidos de hierro y además aumentar la eficiencia, ya que estos son catalizadores de las reacciones (2.11) y (2.12), respectivamente.
- Implementación de una membrana que separe por completo a los electrodos para evitar el movimiento de los iones y así bloquear el paso de hidrógeno y oxígeno entre los electrodos.

- Uso de algún electrolito, como hidróxido de potasio o hidróxido de sodio, para aumentar la conductividad del agua y aumentar la eficiencia de la celda.
- Diseño de una nueva celda y estanques con forma cilíndrica, para así poseer un sello para el agua más seguro.

## 6. Bibliografía

- [1] A. Godula-Jopek, Hydrogen Production by Electrolysis, Wiley-VCH, 2015.
- [2] M. Momirlan y T. N. Veziroglu, Current status of hydrogen energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002.
- [3] A. Godula-Jopek, W. Jehle y J. Wellnitz, Hydrogen Storage Technologies, WILEY-VCH, 2012.
- [4] R. W. Coughlin, Hydrogen production from coal, water and electrons.
- [5] C. Kalamaras y A. Efstathiou, Hydrogen Production Technologies: Current State and, 2013.
- [6] K. Aasberg-Petersen, J.-H. Bak Hansen, T. Christensen y I. Dybkjaer, Technologies for large-scale gas conversion, 2001.
- [7] S. Z. Baykara, Experimental solar water thermolysis, 2004.
- [8] S. Villani, Uranium Enrichment. Review: Centrifugation, 1979.
- [9] E. Bianchi, SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES DE MEDIDA SI, 2015.