



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE**  
**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE**  
**HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS.”**

---

**Autor:** Herdoíza Zurita Danilo Manuel

**Tutor:** Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna

**AMBATO - ECUADOR**

**Marzo - 2022**

## **CERTIFICACIÓN**

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS”**, el cual es parte del Proyecto de Investigación **“ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO COMO ENERGÍA NO CONTAMINANTE MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE FOTOVOLTAICA Y EÓLICA”**, elaborado por el Sr. Herdoíza Zurita Danilo Manuel, portador de la cedula de ciudadanía: C.I.1804871828, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, Marzo 2022

---

**Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna**

**TUTOR**

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACION**

Yo, **Herdoíza Zurita Danilo Manuel**, con C.I. 1804871828, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS**”, el cual es parte del Proyecto de Investigación “ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO COMO ENERGÍA NO CONTAMINANTE MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE FOTOVOLTAICA Y EÓLICA”, así como también los cálculos, gráficos, construcción, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Marzo 2022



---

**Herdoíza Zurita Danilo Manuel**

**C.I: 1804871828**

**AUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Marzo 2022



---

**Herdoíza Zurita Danilo Manuel**

**C.I: 1804871828**

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Herdoíza Zurita Danilo Manuel de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS”**, el cual es parte del Proyecto de Investigación **“ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO COMO ENERGÍA NO CONTAMINANTE MEDIANTE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE FOTOVOLTAICA Y EÓLICA”**

Ambato, Marzo 2022

Para constancia firman:

---

**Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda**

**Miembro Calificador**

---

**Ing. Mg. Alex Santiago Mayorga Pardo**

**Miembro Calificador**

## ÍNDICE DE CONTENIDO.

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACION .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
GLOSARIO. ....	xv
CAPÍTULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Tema .....	1
1.2. Antecedentes investigativos. ....	1
1.3. Objetivos. ....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos. ....	3
1.4. Marco teórico. ....	3
1.4.1. El hidrógeno.....	3
1.4.2. El agua.....	5
1.4.3. La electrólisis. ....	6
1.4.4. Energías no renovables. ....	6
1.4.5. Energías renovables. ....	6
1.4.6. Electrólisis del agua. ....	7
1.4.7. Formas de obtención del hidrógeno.....	9
1.4.8. Electrolizadores alcalinos.....	14
1.4.9. Electrolizadores poliméricos PEM.....	17
1.4.10. Electrolizadores de óxido sólido SOEC.....	20

1.4.11.	Los principales electrolitos que se pueden usar en electrólisis. ....	21
1.4.12.	Materiales que se pueden usar para electrodos. ....	22
1.4.13.	Aplicaciones del hidrógeno. ....	22
1.4.14.	Tipos de celda para extractores de hidrógeno. ....	26
1.4.15.	Ley de Ohm. ....	27
1.4.16.	Ley de Kirchhoff. ....	28
1.4.17.	Ecuación de Faraday ....	29
CAPÍTULO II .....		31
2.	METODOLOGÍA .....	31
2.1.	Selección de alternativas para el diseño del extractor de hidrógeno. ....	31
2.2.	Diseño de extractor de hidrógeno. ....	35
2.3.	Selección de equipos y materiales. ....	45
2.3.1.	Material de las placas del electrolizador. ....	45
2.3.2.	Carcasa del electrolisis. ....	48
2.3.3.	Parte neumática. ....	48
2.3.4.	Hidróxido de sodio NaOH. ....	49
2.3.5.	Agua destilada. ....	50
2.3.6.	Recipiente de experimentación. ....	50
2.3.7.	Probeta de 2000 ml. ....	51
2.3.8.	Herramientas de corte. ....	51
2.3.9.	Balanza. ....	52
2.3.10.	Multímetro. ....	52
2.3.11.	Fuente conmutada. ....	53
2.4.	Formas de cuantificación del gas hidrógeno. ....	53
CAPÍTULO III .....		58
3.	Construcción del prototipo. ....	58
3.1.	Preparación del recipiente para el electrolizador. ....	58
3.2.	Preparación de celdas de acero inoxidable AISI 304. ....	59
3.3.	Construcción del electrolizador. ....	62
3.4.	Preparación del electrolito. ....	66
3.5.	Experimentación. ....	66
3.6.	Costos. ....	67

3.6.1. Método de cuantificación de gases numérico. ....	69
3.6.2. Método de cuantificación por diferencia volumétrica .....	73
3.6.3. Método de cuantificación por llenado de probeta. ....	74
CAPÍTULO IV .....	76
4. CONCLUSIONES. ....	76
5. RECOMENDACIONES. ....	77
6. BIBLIOGRAFÍA. ....	78
7. ANEXOS. ....	81



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El agua en la tierra .....	6
Figura 2: Electrólisis del agua .....	7
Figura 3 Esquema de electrólisis .....	8
Figura 4 Producción de hidrógeno a partir de energías no renovables .....	11
Figura 5 Producción de hidrógeno a partir de energías renovables .....	12
Figura 6 Sistema de electrolizador alcalino .....	15
Figura 7 Electrolizador polimérico .....	18
Figura 8: Configuración de la membrana polimérica .....	19
Figura 9: Membrana polimérica .....	20
Figura 10: Esquema de electrolizador SOEC .....	21
Figura 11: Aplicaciones del hidrógeno .....	23
Figura 12: Moléculas de amonio NH <sub>3</sub> , metanol CH <sub>3</sub> OH y peróxido de hidrógeno H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> . .....	24
Figure 13: Con la hidrogenación el aceite se transforma en grasa solida .....	25
Figura 14: Diagrama de la celda húmeda.....	26
Figura 15: Esquema de la celda seca.....	27
Figura 16: Circuito en serie .....	28
Figura 17: Circuito en paralelo. ....	28
Figura 18: Circuito en serie intensidad constante voltaje variable. ....	29
Figura 19: circuito en paralelo voltaje igual intensidad variable. ....	29
Figura 20: Dimensiones del electrolizador. ....	35
Figura 21: Placa interna. ....	36
Figura 22: Placa externa.....	36
Figura 23: Soporte para celdas.....	37
Figura 24: Purificador de gases.....	37
Figura 25: Conexión en paralelo.....	38
Figura 26: Conexión en serie. ....	42
Figura 27: Parte neumática. ....	49

Figura 28: Hidróxido de sodio en perlas NaOH.....	49
Figura 29: Agua destilada H <sub>2</sub> O.....	50
Figura 30: Recipiente de experimentación.....	50
Figure 31: Probeta de 2000 ml.....	51
Figure 32: Herramientas de corte.....	51
Figura 33: Balanza.....	52
Figura 34: Multímetro.....	52
Figura 35: Esquema de medición por diferencias volumétricas.....	55
Figura 36: Esquema de medición por probeta volumétrica.....	56
Figura 37: Caudalímetro digital.....	57
Figura 38: Colocación de tapas impresas en 3D.....	58
Figura 39: Implementación de pegamento especial con bicarbonato en tapas 3D.....	59
Figura 40: Colocación de silicón negro en sima de tapas 3D.....	59
Figura 41: Corte de plancha de acero Inox AISI 304.....	60
Figura 42: Corte de celdas de acero Inox AISI 304.....	60
Figura 43: Enderezado de celdas de acero Inox ASIS 304.....	61
Figura 44: Esmerilado de celda de acero Inox AISI 304.....	61
Figura 45: Bases y soportes para placas.....	62
Figura 46: Celdas armadas con soportes.....	62
Figura 47: Recipiente listo para pruebas.....	63
Figura 48: Colocación de entrada de agua y acople rápido.....	63
Figura 49: Elaboración de placas y soldadura.....	64
Figura 50: Experimentación con electrodos separados.....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades físicas del hidrógeno .....	4
Tabla 2: Propiedades del hidrógeno frente a diferentes combustibles .....	5
Tabla 3: Formas de extracción de hidrógeno .....	9
Tabla 4: Comparación de las diferentes tecnologías para extracción de hidrógeno. ....	14
Tabla 5: Aplicaciones industriales y energéticas del hidrógeno. ....	23
Tabla 6: Evaluación de criterios.....	32
Tabla 7: Evaluación del criterio capacidad de producción. ....	33
Tabla 8: Evolución del criterio confiabilidad.....	33
Tabla 9: Evolución del criterio de costos.....	34
Tabla 10: Ponderación de las alternativas.....	34
Tabla 11: Composición química del acero Inox AISI 304.....	46
Tabla 12: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 304.....	46
Tabla 13: Composición química del acero Inox AISIA 201.....	47
Tabla 14: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 201.....	47
Tabla 15: Composición química del acero Inox AISIA 430.....	47
Tabla 16: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 430.....	48
Tabla 19: Costos.....	67
Tabla 20: Recolección de datos por diferencias volumétricas. ....	73
Tabla 21: Recolección de datos usando llenado de probeta.....	74

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Prototipo de Extractor de hidrógeno. ....	81
Anexo 2: Voltaje y amperaje utilizados en la experimentación.....	81
Anexo 3: Recipiente de mesclado de la sosa caustica y agua destilada.....	82
Anexo 4: Volumen de la placa que se encuentra en el interior del electrolizador. ....	82
Anexo 5: Pesado de sosa caustica. ....	83
Anexo 6: Experimentación método de diferencia volumétrica.....	83
Anexo 7: Tiempos que se toman del método de diferencias volumétricas. ....	84
Anexo 8: Experimentación método de llenado de probeta. ....	84
Anexo 9: Tiempos tomados con método de llenado de probeta. ....	85
Anexo 10: Tabla de recolección de datos para método de diferencias volumétricas.....	85
Anexo 11: Tabla de medición de datos para método de llenado de probeta.....	86

## RESUMEN

El hidrógeno en la actualidad es un combustible alternativo que tiene muchas aplicaciones, el motivo de esta investigación es construir un prototipo que extraiga dicho gas por medio de la electrólisis, para poder cuantificar la cantidad de producción utilizando métodos convencionales. Para la construcción del prototipo se seleccionó materiales acordes a la disposición del proyecto, para el recipiente se utilizó materiales que resistieron el ataque de ácidos como el polipropileno, para los electrodos se utilizó acero inoxidable 304, para el electrolito se realizó un compuesto de agua destilada con hidróxido de sodio. Los conjuntos de estos materiales formaron el extractor que trabajó junto a una fuente de corriente continua y se realizó el proceso de electrólisis. El método utilizado para la cuantificación de hidrógeno convencionalmente fue una probeta volumétrica, mientras se seguía extrayendo el gas este fue conducido por una manguera hasta la probeta que se encuentra llena de agua, mientras se siga llenando el gas en la probeta el agua es empujada permitiendo tomar la medida de cuanto volumen es extraído en un determinado tiempo para conseguir un caudal.

**Palabras clave:** Electrólisis, Hidrógeno, Extractor de gas, Agua destilada, Hidróxido de sodio, Electrolito, Acero inoxidable, Probeta volumétrica.

## **ABSTRACT**

Hydrogen is currently an alternative fuel that has many applications, the reason for this research is to build a prototype that extracts said gas through electrolysis, in order to quantify the amount of production using conventional methods. For the construction of the prototype, materials were selected according to the layout of the project, materials that resisted the attack of acids such as polypropylene were used for the container, stainless steel 304 was used for the electrodes, and a compound of distilled water was made for the electrolyte. with sodium hydroxide. The sets of these materials formed the extractor that worked together with a direct current source and the electrolysis process was carried out. The method used for the quantification of hydrogen was conventionally a volumetric cylinder, while the gas continued to be extracted, it was led by a hose to the cylinder that is full of water, while the gas continues to be filled in the cylinder, the water is pushed allowing take the measurement of how much volume is extracted in a given time to achieve a flow.

Keywords: Electrolysis, Hydrogen, Gas extractor, Distilled water, Sodium hydroxide, Electrolyte, Stainless steel, Volumetric cylinder.

## GLOSARIO.

**Ánodo.** – Es el término que se le denomina al polo positivo de una celda electrolítica.

**Cátodo.** – Es el término que se le da al polo negativo de una celda electrolítica.

**Reacción redox.** – Fenómeno químico donde se produce un intercambio de electrones.

**Oxidación.** – Proceso donde un átomo pierde electrones.

**Reducción.** – Proceso donde un átomo gana electrones.

**Fuentes renovables.** – Fuentes de energía inagotable que son naturales y se recuperan de una manera casi inmediatas, estas pueden venir del agua, sol, viento, mar, etc.

**Fuente no renovables.** – Fuentes de energía que tienen un límite de uso por lo general son derivadas del petróleo, pero otras pueden venir del carbón.

**Celda de combustible.** – también llamado pila o celda electrolítica, electrolizador o pila electro voltaico, es un artilugio electroquímico para generar algún tipo de combustible continuo, mediante un electrolito y energía eléctrica.

**Electrolito.** – Químico que ayuda el intercambio de electrones y el flujo de los mismos entre electrodos.

**Electrodo.** – Material metálico que se usa en una celda electrolítica, para el intercambio de electrones, o separación de partículas.

**Partícula.** – Material fragmentado diminuto que conserva las propiedades del mismo.

**Corriente continua.** – Flujo de electrones continuo donde el sentido de sus cargas no varía.

**Corriente alterna.** – Flujo de electrones intermitente donde va y viene en períodos.

**Voltaje.** – Magnitud física que puede ser medida entre dos puntos relacionada al potencial o tención eléctrica, se mide en voltios (símbolo V).

**Intensidad.** – Es la cantidad de carga que fluye en un conductor en determinado tiempo, se mide en amperios (símbolo A).

***Resistencia.*** – Se refiere a la oposición que fluye la corriente dentro de un circuito, se mide en ohmios (símbolo  $\Omega$ ).

***Probeta volumétrica.*** – Recipiente graduado que permite medir con exactitud sustancias volumétricas.

***Recipiente.*** – Utensilio que contiene una cierta cantidad de algún material.



# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Tema.

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS.**

### 1.2. Antecedentes investigativos.

El hidrógeno como un combustible alternativo, se ha utilizado anteriormente en estudios e investigaciones, pero esta tecnología está aún en desarrollo, debido a sus propiedades y su gran abundancia en el planeta pudiendo ser uno de los combustibles del futuro.

Como Reyes y Trujillo [1], en investigación denominada generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por medio de electrólisis, estos investigadores implementaron un motor de combustión interna que funcione con hidrógeno que se extrae con la electrólisis del agua, este motor es utilizado para alimentar de energía eléctrica a un taller que utiliza una capacidad de 50 kW, el proyecto fue encaminado para abastecer de energía consumida, pero el hidrógeno producido no era el suficiente para abastecer la capacidad del motor ya que este puede brindar una capacidad de 191.31 kW. Económicamente también el precio del mantenimiento de este equipo también supero los rangos que presenta un motor que utiliza otros combustibles, pero en el futuro hay que tomar en cuenta que este combustible alternativo no contamina y el petróleo no va a durar para siempre.

López [2], en su trabajo con el título de alimentación de un motor mono cilíndrico con hidrógeno obtenido a través de electrólisis del agua, realiza una investigación, que con la extracción de hidrógeno mediante electrólisis, alimenta un motor mono cilíndrico realizando las adaptaciones correspondientes, los resultados obtenidos fueron favorables ya que al principio utiliza solo la electrólisis de agua pura para conseguir el hidrógeno, experimentalmente determina que no es suficiente la cantidad de este combustible, por lo tanto agrega hidróxido de sodio para que la electrólisis se efectúa de mejor manera y completar la necesidad de combustible para el correcto funcionamiento del motor, al final

determina que los gases contaminantes al utilizar este combustible alternativo son nulos, beneficiando al medio ambiente.

Pineda [3], según la investigación del autor con el título evaluación técnica económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia, una planta de extracción de hidrógeno por electrólisis basada en energías alternativas, determina que se ocuparía demasiado espacio por que propone implementar una planta netamente con energía renovable, esto se debe a que se implementaría paneles solares. Económicamente se evalúan algunos puntos importantes para determinar que a largo plazo costaría similar a una planta de reformado de gas, pero son necesarios varios estudios adicionales para determinar si es factible

Martínez [4], en su investigación que se denomina desarrollo de un sistema de generación de hidrógeno acoplado al tratamiento electroquímico de aguas superficiales utilizando energía solar, determina que el hidrógeno es el combustible del futuro porque en algunos años esta tecnología será más desarrollada y más tecnificada, ya que se puede producir con energías renovables al utilizar paneles solares para alimentar de energía eléctrica al reactor que con electrodos de acero inoxidable, aluminio y agua sin purificar, separan las partículas de hidrógeno y oxígeno sin utilizar un separador de partículas por membranas, entonces cuando el hidrógeno con el oxígeno se combustiona puede purificar el agua pero el estudio determina que con electrodos de aluminio el agua es más pura que utilizando acero inoxidable porque afecta algunas propiedades del agua.

Velásquez y Quinceno [5], en la investigación desarrollada con el nombre de diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis, determinan que el hidrógeno puede ser utilizado de manera continua, utilizando un extractor de hidrógeno que genere una presión continua y controlada, esto se logra con el diseño del mismo. Para obtener el hidrógeno de un litro de agua los autores determinan que se necesita 15793.31 kJ y esto corresponde a 4.39 kWh y obteniendo así 111.1 gr de H<sub>2</sub>. Para este estudio se utiliza electrodos de platino y paladio, arrojando resultados de incremento de presión en el generador, lo cual permite que el hidrógeno mantenga una producción constante.

### **1.3. Objetivos.**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Diseñar y construir un sistema de generación de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

- Seleccionar la mejor alternativa de diseño para la obtención del hidrógeno.
- Cuantificar la producción de hidrógeno.
- Construir un prototipo de un sistema de extracción de hidrógeno.

### **1.4. Marco teórico.**

#### **1.4.1. El hidrógeno.**

El hidrógeno es un elemento químico que no está ubicado en ningún grupo en la tabla periódica. Las reacciones químicas con este elemento son difíciles de separar, pero cuando tiene que ceder comparte formando enlaces covalentes [6]. El hidrógeno puede encontrarse como gas el mismo que es incoloro y no tiene olor, pero debe tratarse con precaución porque no es inofensivo.

El aire es 14.4 veces más pesado que el hidrógeno siendo este muy ligero, su condensación se la realiza a  $-252.77^{\circ}\text{C}$ . Este gas al quemarse brinda una energía más alta que otros tipos de combustibles, pero su efecto no es dañino contra el medio ambiente ya que solo genera agua cuando el carburante es el oxígeno puro [7].

El hidrógeno está presente en todo el planeta, pero no se encuentra de forma natural, siempre está enlazado con otros elementos, siendo así el  $\text{H}_2$  está presente en diferentes compuestos como el agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), incluso en los compuestos que provienen del petróleo como el benceno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ), poli-cloruro de vinilo ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ), entre otros. También está unido a varios compuestos orgánicos como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), el bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y muchos más [8].

En la tabla 1, se presenta las propiedades del hidrógeno físicamente:

Tabla 1: Propiedades físicas del hidrógeno [8].

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
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 101.2 kPa	$2.4192 \cdot 10^5$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot mol^{-1}$
Temperatura de auto ignición	858	$K$
Límite de inflamabilidad en oxígeno	4-94	%
Límite de inflamabilidad en aire	4-74	%

El hidrógeno presenta excelentes propiedades de ignición y combustión al contacto con oxígeno, por lo tanto, su poder calorífico libera 1.43 [MJ/kg]. La combustión de este gas no genera contaminantes en un estado puro ya que no tiene relación con el carbono, como es el caso de otro tipos de combustibles [8].

En la tabla 2 se va a presentar las siguientes propiedades del hidrógeno en comparación con otros combustibles:

Tabla 2: Propiedades del hidrógeno frente a diferentes combustibles [8].

Combustibles	Densidad energética gravimétrica		Densidad energética volumétrica		Límite de inflamabilidad	Fracción de calor en forma de radiación
	$MJ*kg^{-1}$	$kWh*kg^{-1}$	$MJ*l^{-1}$	$kWh* l^{-1}$	Vol %	Vol %
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	15.4	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	-

Este gas presenta distintas propiedades distintivas con respecto a otros combustibles como: menos densidad energética por unidad de volumen, a temperatura y presión nominal; el cual tiene la densidad energética por unidad de masa bastante mayor en comparación a otros combustibles; también dispone de un superior límite inferior de inflamabilidad y un mayor límite superior de inflamabilidad [8].

#### 1.4.2. El agua.

El agua, hablando químicamente es una sustancia que está formada por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno, es una sustancia que no tiene olor ni sabor y es incolora. Este elemento se encuentra en todo el planeta como el más abundante más o menos constituye las tres cuartas partes del planeta, en algunos casos se encuentra media pura como en la lluvia, pero nunca se encuentra totalmente así ya que siempre esta combinada con otros elementos en cualquier fase que se encuentre. Esta se puede encontrar líquida, gaseosa y sólida, pero en este caso de estudio es necesario que se encuentre líquida para poder separarla en sus dos elementos constituyentes [6].



Figura 1: El agua en la tierra [6]

#### **1.4.3. La electrólisis.**

En la electrólisis utiliza energía eléctrica que atraviesan por unos electrodos que están sumergidos en un electrólito, para causar una inducción química que no es espontánea. Depende directamente de la cantidad de voltaje y amperaje que recorran por los electrodos para realizar separación o transporte de partículas entre los mismos [9].

#### **1.4.4. Energías no renovables.**

Como su nombre lo indica las energías no renovables son aquellas que no se renuevan, por su propio uso se van desgastando hasta desaparecer, un ejemplo claro en la actualidad son los combustibles fósiles, que se encuentran en la naturaleza formados hace varios millones de años, estos combustibles fósiles son el carbón, petróleo y gas natural que en la actualidad se usan para conseguir energía [10].

Otro ejemplo puntual es la energía nuclear la cual en la actualidad se usa para conseguir energía eléctrica, es peligrosa si no se la controla de manera adecuada por que emite radiación [10].

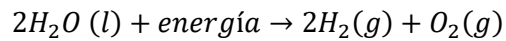
#### **1.4.5. Energías renovables.**

Las energías renovables, son aquellos recursos que cuando se utilizan, el tiempo que se demoran en recuperarse sea el mismo o menor que el tiempo que se demora en explotarse, estas provienen del sol, agua, viento y calor natural y varios más [10].

La energía solar, es una fuente casi ilimitada de energía que se puede aprovechar de distintas maneras, incrementando otros recursos para sacar la mayor eficiencia en la producción de energía [10].

#### 1.4.6. Electrólisis del agua.

En el caso del agua la electrólisis se realiza sumergiendo electrodos que realizan un potencial eléctrico separando las partículas que contiene el H<sub>2</sub>O, generando el estado gaseoso del hidrógeno y oxígeno [9]. La reacción química se expresa de la siguiente manera:



Al implementar corriente de una batería a los electrodos (generalmente estos son metálicos), se produce la separación, pero el agua debe ser implementada con iones de otro material como el azufre S, para que la corriente pueda circular libremente, ya que el agua destilada no conduce la electricidad. En la figura 2 se puede observar la electrólisis del agua y como se separa el H<sub>2</sub> del O<sub>2</sub>, y como se puede constatar el hidrógeno será el doble que el oxígeno [9].

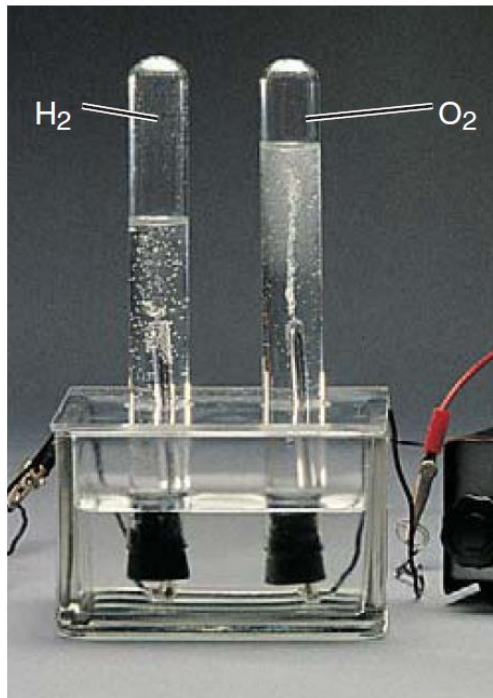
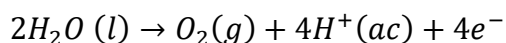


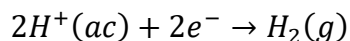
Figura 2: Electrólisis del agua [9]

En la figura 3, se puede determinar que el electrodo positivo de la batería corresponde al ánodo realizando una oxidación, y el electrodo negativo de la batería corresponde al cátodo realizando una reducción [9].

En el ánodo se produce la siguiente reacción:



En el cátodo se produce la siguiente reacción:



Por lo tanto, se produce globalmente la siguiente reacción:

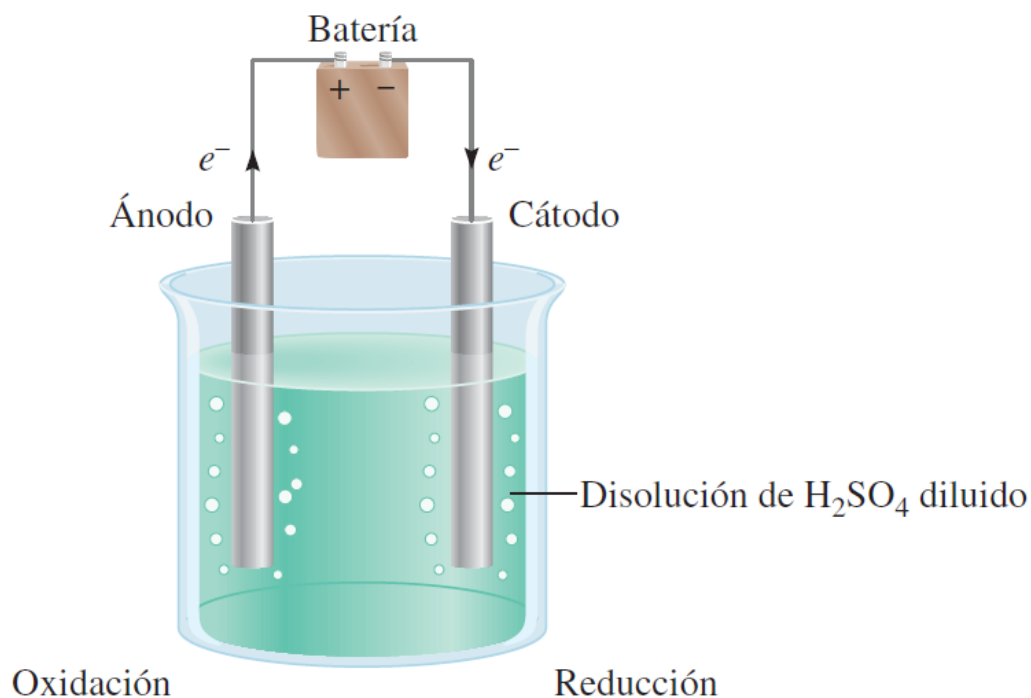


Figura 3 Esquema de electrólisis [9]



### 1.4.7. Formas de obtención del hidrógeno.

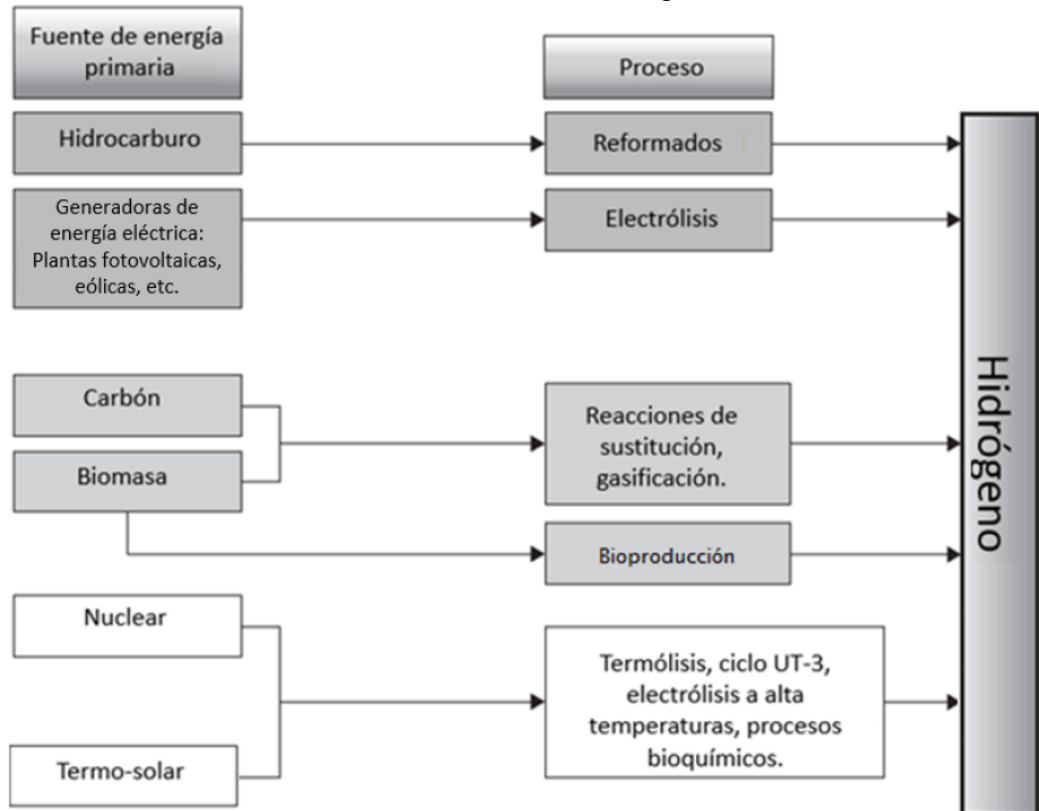
El hidrógeno al encontrarse en el planeta, combinado con varios otros elementos es posible extraerlo de varias formas.

Según Vermeersch [8], a continuación, se describen algunas formas de extracción:

- 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.
- g. Electrólisis del agua.

Estos procesos se clasifican, según las principales fuentes de energías y el procedimiento de extracción [8].

Tabla 3: Formas de extracción de hidrógeno[8]

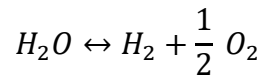


**a. A partir de hidrocarburos.**

El objetivo de estos procesos es desunir el hidrógeno de los hidrocarburos o separar el agua de los mismos [8].

***Termólisis.***

Este proceso conlleva elevar la temperatura del agua más de 2227 °C, rompiendo los enlaces moleculares del H<sub>2</sub>O. Esto ocurre cuando el agua es sometida a contacto con una superficie a esa temperatura, provocando la separación del hidrógeno y del oxígeno, pero el proceso es alterable por lo que la reacción hace grandes explosiones [8].



Vermeersch [8], menciona que para separar estas partículas se puede realizar estas técnicas:

- *Separación por baja temperatura:* cuando está en estado gaseoso el compuesto se puede disminuir la temperatura abruptamente para separar las partículas.  
Con la utilización de membranas refractarias de micro poros se puede seleccionar que moléculas separar.
- *Electroforesis:* se realiza incorporando electricidad a una membrana semipermeable que provoca la separación del H<sub>2</sub> y del O<sub>2</sub>.  
Con membranas de paladio aleado con plata se puede separar el hidrógeno de otras moléculas en temperatura baja.
- *Centrifugado de moléculas:* esta tecnología, es un depósito que gira a velocidad angular constante, haciendo que las partículas de oxígeno por ser las más pesadas se muevan a los extremos del depósito, y el hidrógeno al ser más liviano se quede en el centro del depósito.

**b. Hidrógeno a partir de fuentes no renovables.**

El hidrógeno al no ser un recurso natural se tiene que producir, ya que en el futuro este será el combustible primordial para el consumo. Este elemento se puede producir con energías no renovables, provenientes de fuentes que de cualquier forma no se pueden

recuperar y contaminan de una manera u otra al medio ambiente, pero ese no es el objetivo de esta investigación [11].

En la figura 4, se puede confirmar algunas formas y fuentes energéticas no renovables que se utilizan para la extracción del hidrógeno. De esta manera se explica en tres fases, la primera corresponde a fuentes de energía primaria, la segunda corresponde a la energía utilizada junto con el agua y la tercera fase corresponde a las tecnologías de transformación dando como resultado el preciado gas hidrógeno.

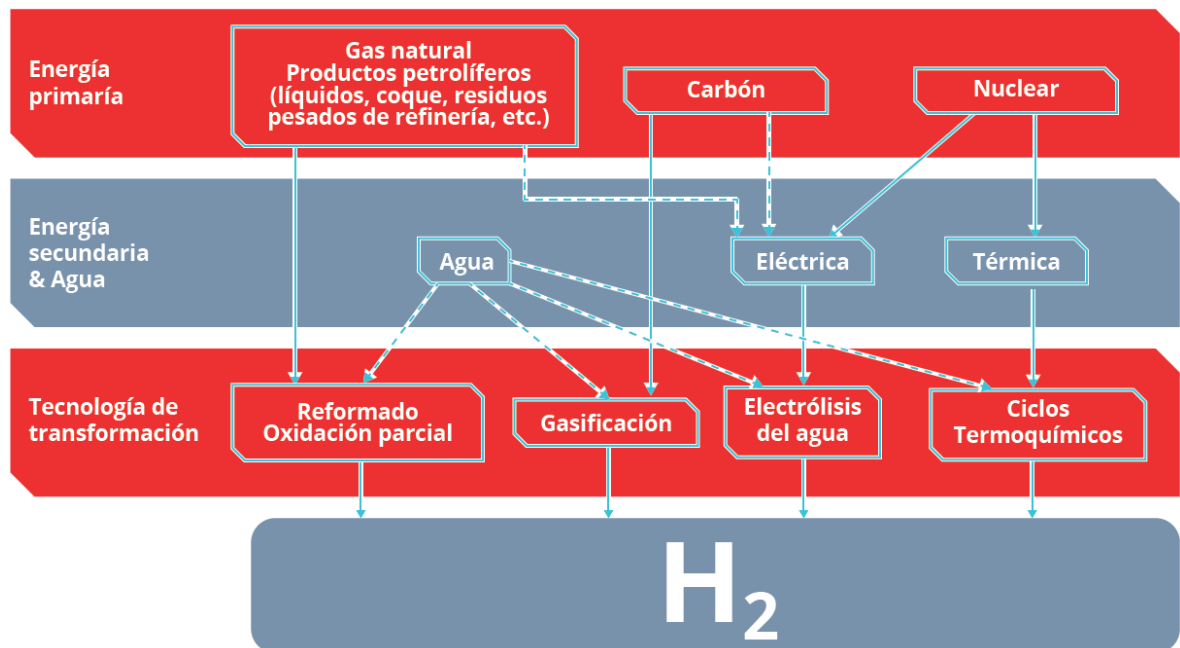


Figura 4 Producción de hidrógeno a partir de energías no renovables [11].

Estos métodos de extracción de hidrógeno se han usado desde la antigüedad por más de 100 años, por lo general, se utilizaba para producir hidro craqueo del reformado de gas natural, en otra aplicación, para el sintetizado del amoníaco que se usa en explosivos y fertilizantes. En el pasado la contaminación era elevada, ya que, por una tonelada de hidrógeno producido, doce toneladas de dióxido de carbono se emanaba al ambiente [11].

### c. Hidrógeno a partir de fuentes renovables.

Estos métodos de extracción no son tan antiguos, puesto que se vienen realizando desde hace algunas décadas, siempre han estado dirigidos a producir gas de síntesis y a purificarlo, para después ser utilizado en motores de baja potencia de combustión interna.

Por lo general, se utilizaban procesos como la oxidación parcial, el reformado y la gasificación de biomasa [11].

En la figura 5, están expresadas algunas maneras de extracción de hidrógeno con sus maneras directas e indirectas mencionadas en tres etapas, la primera etapa está comprendida por la energía primaria, energías de biomasa, solar, eólica, hidráulica, geotérmica y mareomotriz; la segunda etapa está comprendida por energías secundarias como la térmica, eléctrica y el agua; la tercera etapa abarca a las tecnologías de transformación como reformado, termólisis junto a fotólisis del agua y electrólisis del agua.

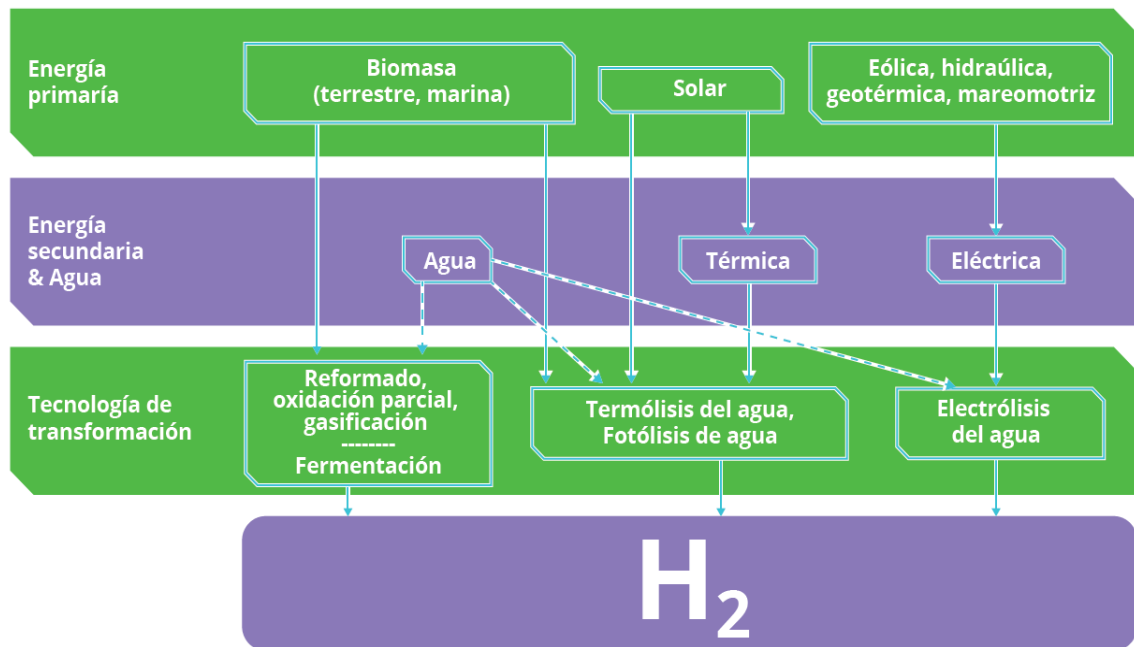


Figura 5 Producción de hidrógeno a partir de energías renovables [11].

En la actualidad, hay grandes plantas de extracción de hidrógeno que utilizan fuentes de energías renovables, como las solares, eólicas, hidráulicas, mareomotrices, entre otras. En las industrias el método más usado y en desarrollo es el de la electrólisis del agua, este método introduce electricidad al  $H_2O$ , provocando la separación del  $H_2$  y el  $O_2$  en forma de gas, si se utilizan fuentes de energías renovables se estaría hablando una manera netamente limpia de extracción [11].

Otro nombre con el que se conoce a los métodos de extracción de hidrógeno, se denominan, celdas de combustible, estos varían entre características como el tipo de electrólito que utilizan, su temperatura de funcionamiento, los materiales que se utilizan al construirlos y más que todo su manera de rendir al funcionar [12]. Según Guerrero y Pasantes [12], los tipos de celdas de combustible más importantes son:

- Celda de combustible por ácido fosfórico (PAFC)
- Celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM)
- Celda de combustible alcalina (AWE)
- Celda de combustible de carbono fundido (MCFC)
- Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)

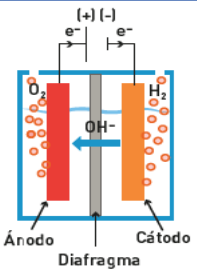
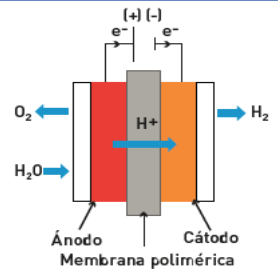
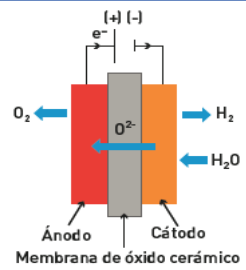
La electrólisis, es el método más importante en la actualidad, para la producción de hidrógeno, por lo que se están desarrollando estas tecnologías. Una clasificación importante y que será tomada en cuenta para realizar el prototipo es la siguiente, que está valorada en función de la temperatura que se realiza la extracción.

A baja temperatura se puede realizar la extracción de hidrógeno mediante electrolizadores alcalino como sus siglas en inglés lo indican (AWE, alkaline water electrolysis), otro proceso es el de membrana de intercambio protónico en inglés (PEMWE, proton exchange membrane water electrolysis).

A temperaturas elevadas el método utilizado es de electrolizadores de óxido sólido en inglés (SOWE, solid oxide water electrolysis) [11].

En la tabla 4 se presenta una comparación entre las tecnologías a bajas y altas temperaturas para extracción de hidrógeno.

Tabla 4: Comparación de las diferentes tecnologías para extracción de hidrógeno [11].

	ELECTRÓLISIS ALCALINA	ELECTRÓLISIS PEM	ELECTRÓLISIS SOEC
Temperatura (°C)	60 - 85	40 - 80	800 - 1000
Presión (bar)	< 30	< 35	1 - 5
Consumo energético. (kWh/Nm <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> )	4.3 - 5.0	4.2 - 4.7	3.2 - 3.7
Costo (€/kW)	1000 - 1500	1500 - 2000	Prototipos
Eficiencia global	60 - 70 %	70 - 80 %	85 - 95 %
Vida útil (horas)	> 100000	10000 - 50000	En investigación
Ventajas	Tecnología bien probada y desarrollada comercialmente. Es el tipo de electrólisis de mayor durabilidad y menor costo	Electrolito sólido. Alta presión de los gases de salida. Puede trabajar a elevadas densidades de corriente	Electrolito sólido. Alta presión de los gases de salida. Bajo consumo de electricidad. Menor exigencia en la calidad del agua.
Inconvenientes	Electrolito líquido corrosivo. Baja presión de los gases de salida y necesario una etapa de purificación posterior del H <sub>2</sub>	Elevados costos de los catalizadores y de las membranas. Gran exigencia en el agua de alimentación	Limitada vida debido a los ciclos térmicos. Limitaciones en las aplicaciones debido a las temperaturas de operación
Esquema	 <p>Diagrama de un electrólisis alcalino que muestra un ánodo (+) y un cátodo (-) separados por un diafragma. El electrolito es OH-. Se produce O<sub>2</sub> en el ánodo y H<sub>2</sub> en el cátodo. Las flechas indican el flujo de electrones (e<sup>-</sup>) y iones (OH<sup>-</sup>).</p>	 <p>Diagrama de un electrólisis PEM que muestra un ánodo (+) y un cátodo (-) separados por una membrana polimérica. El electrolito es H<sup>+</sup>. Se produce O<sub>2</sub> en el ánodo y H<sub>2</sub> en el cátodo. Las flechas indican el flujo de electrones (e<sup>-</sup>) y iones (H<sup>+</sup>).</p>	 <p>Diagrama de un electrólisis SOEC que muestra un ánodo (+) y un cátodo (-) separados por una membrana de óxido cerámico. El electrolito es O<sup>2-</sup>. Se produce O<sub>2</sub> en el ánodo y H<sub>2</sub> en el cátodo. Las flechas indican el flujo de electrones (e<sup>-</sup>) y iones (O<sup>2-</sup>).</p>

#### 1.4.8. Electrolizadores alcalinos.

Este sistema utiliza un depósito llamando electrolizador donde se procede a separar las partículas del H<sub>2</sub>O, pero además de este componente utiliza una serie de sistemas y subsistemas que son necesarios para la producción de hidrógeno, en la figura 6 se presenta un croquis del electrolizador alcalino [11].

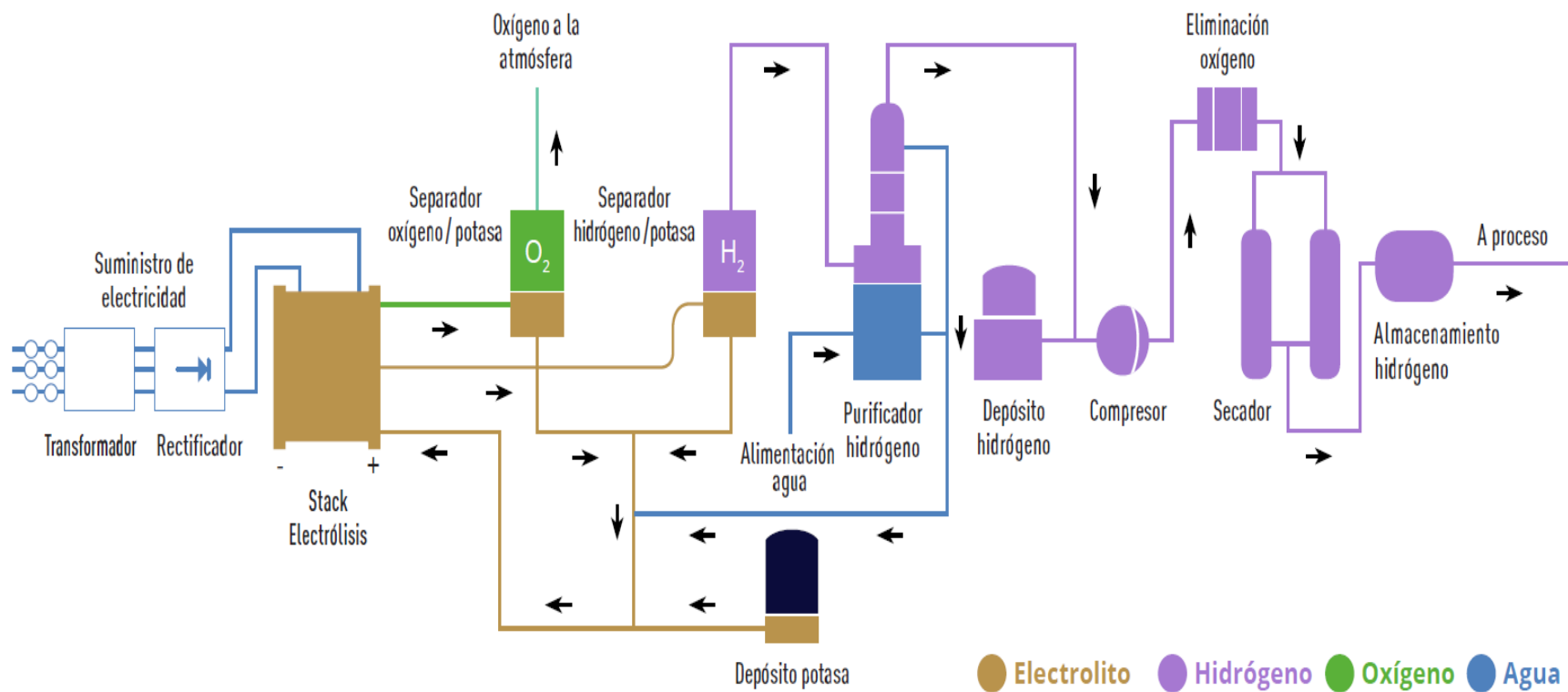


Figura 6 Sistema de electrolizador alcalino [11].

**Sistema de producción de gases:** mediante la electrólisis del agua ocurre la separación del O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> para posterior a este proceso dirigirse a los separadores de partículas [11].

**Sistema de conducción, depuración de electrólito y secado de corrientes:** después de haberse separado las partículas en dos caminos, procede a ingresar a un sistema de filtrado de coalescencia permitiendo la eliminación de los restos de electrólito conducido por los gases y la humedad [11].

**Sistema de purificación y secado:** este sistema busca que el hidrógeno sea lo más puro posible, por esto se utiliza un reactor de-oxo para eliminar las impurezas que tenga el oxígeno, este sistema usa un catalizador de paladio donde los residuos de oxígeno reaccionan con el hidrógeno, provocando vapor de agua para ser condensado y eliminado [11].

**Sistema de deionización del H<sub>2</sub>O:** por efecto del electrólisis se consume el agua, por lo tanto, se debe reponer y es necesario que esta agua tenga una pureza y conductividad menor a 5µS/cm<sup>2</sup> para que el electrolizador no sufra contaminación [11].

**Sistema de gestión térmica:** cuando está en funcionamiento el electrolizador este por su proceso de irreversibilidad produce calor, y es necesario que se encuentre en una temperatura controlada, ya que, si se eleva demasiado la misma puede afectar a los componentes del electrolizador degradándolos, dañando su estructura y dejándolo obsoleto, es por eso que se necesita que recircule el electrólito para que se enfríe constantemente [11].

**Sistema de control de presión:** como la producción de gases sigue en aumento de igual forma ocurre con la presión, con ayuda de válvulas se puede controlar la presión deseada y que esta sea constante [11].

**Sistema de monitorización y control:** este sistema tiene como objetivo censar la actividad de los dispositivos para que todo el sistema funcione correctamente [11].

**Sistema de electrónica de potencia:** este sistema controla y pone en funcionamiento correctamente el sistema, con los rangos necesarios para cada dispositivo del mismo [11].



Los electrolizadores alcalinos en la actualidad son utilizados a nivel industrial llegando a producir hasta 8400 kg de H<sub>2</sub> gaseoso ocupando desde 17MWh/h hasta 410MWh/día, en general esta tecnología es duradera, confiable y su costo no es elevado, el único inconveniente es que implementa un sistema de purificación para los gases complejo y un electrolito que produce corrosión [11].

#### **1.4.9. Electrolizadores poliméricos PEM.**

Los electrolizadores poliméricos son similares a los alcalinos, tiene todo un sistema para su correcto funcionamiento pero es más compacto, en la figura 7, está expresado el esquema de este sistema con todos sus elementos, de tal forma, que con su constitución simple extrae el hidrógeno de manera segura y eficiente [11].

***Sistema de acondicionamiento de energía eléctrica:*** controla el voltaje necesario en el electrolizador en el arreglo de electrodos, para que se pueda separar el hidrógeno y el oxígeno por electrólisis [11].

***Sistema de alimentación de agua:*** este subsistema entrega el agua necesaria para el electrolizador, manteniéndolo siempre con el suministro necesario, pero es preciso que el agua tenga una conductividad por debajo de los 2μS/cm<sup>2</sup> [11].

***Sistema de purificación de gases:*** purifica y controla la presión del hidrógeno y oxígeno por separado en sus diferentes líneas [11].

***Sistema de control:*** comprendido por el sistema de control que interpretan el estado de las celdas, informando como se encuentra el sistema [11].

Los electrolizadores PEM, han evolucionado bastante, pero por efecto de la degradación de la electricidad que se aplica al electrolizador, el rendimiento puede ser afectado por qué se necesita que la producción de hidrógeno sea constante, algunos fabricantes ya tiene un margen de horas de uso que va más o menos en los 75000 horas de funcionamiento, pero de igual manera en la escala industrial hay electrolizadores PEM que producen 8640Kg al día y se consume 434MWh/día [11].

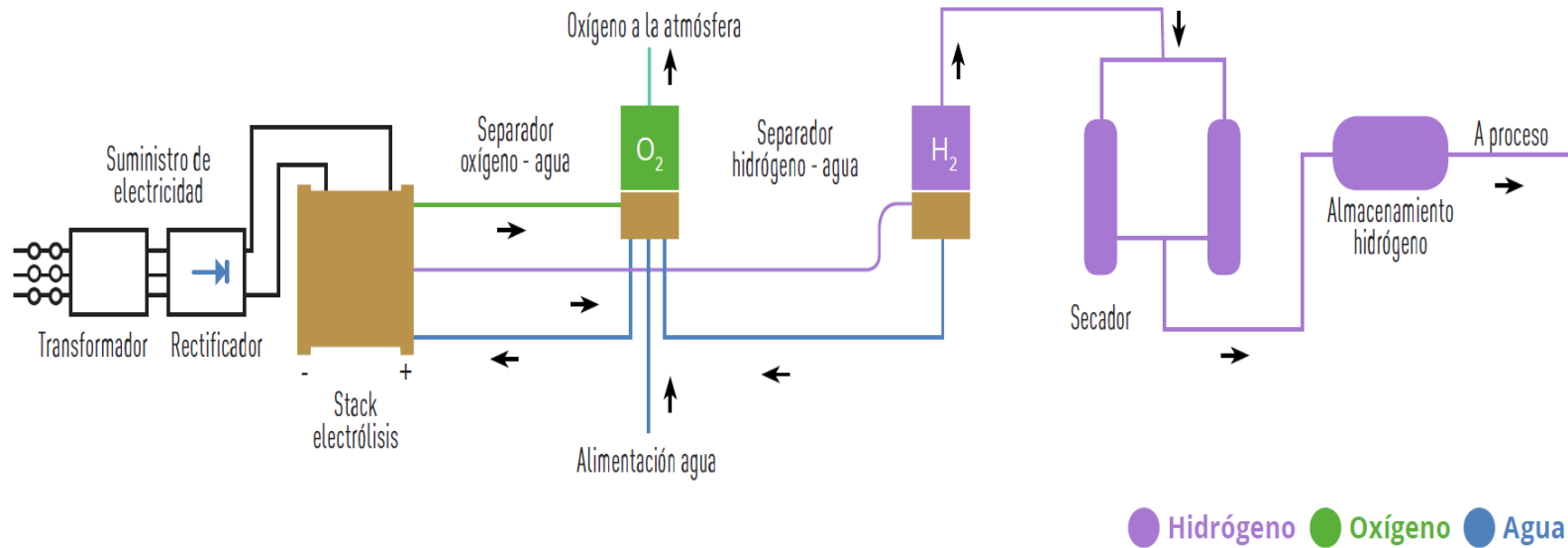


Figura 7 Electrolizador polimérico [11].

Lo que conforma el electrolizador básicamente es una configuración en serie de las diferentes capas que conforman la membrana polimérica como se muestra en la figura 8.

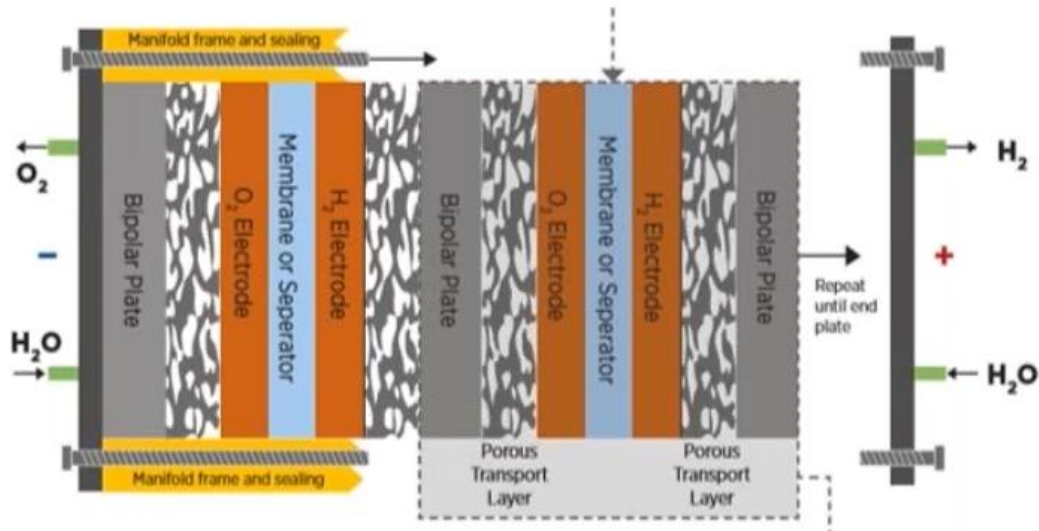


Figura 8: Configuración de la membrana polimérica [13].

La membrana polimérica está compuesta por varias partes como se representa en la figura 9, en el medio se encuentra la membrana de color verde, el ánodo de color amarillo donde se encuentra el catalizador de iridio, que por efecto de la reacción anódica (disociación de del oxígeno y el hidrógeno) permite que los protones pasen por la membrana hacia el cátodo de color azul, el catalizador es de base platino, donde la reacción catódica hace que se asocien los protones de hidrógeno.

La capa denominada TPL es una cama de transporte porosa, está transporta el agua desde el ánodo hacia el cátodo, además transporta los gases que se forman en la capa catalítica hacia las placas bipolares de nominadas BP, y esta tiene como función de transportar la electricidad hacia los catalizadores y hacia el agua, y transporta los gases hacia el exterior de la membrana.

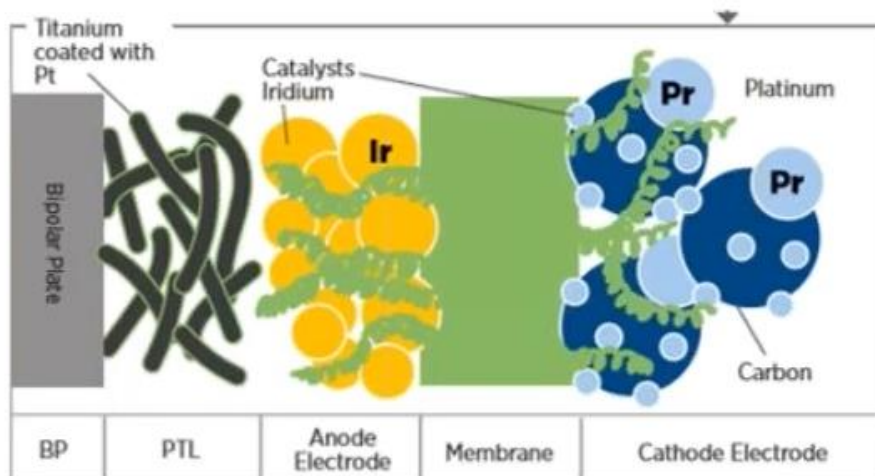


Figura 9: Membrana polimérica [13].

#### 1.4.10. Electrolizadores de óxido sólido SOEC.

Los electrolizadores SOEC como sus siglas en inglés indican (solid oxide electrolyser cell), utilizan una manera distinta de extracción del hidrógeno, por que usa calor en vez de electricidad, este proceso puede tener limitaciones en algunas aplicaciones ya que emplea temperaturas que van desde los 600 a 1000 °C [11].

La eficiencia de este proceso es superior, pero por necesitar una temperatura elevada y vapor de agua para conseguir el hidrógeno, presenta limitaciones en algunas tecnologías de aplicación [11].

Como este proceso trabaja con la temperatura por encima de la de ebullición del agua, presenta como ventaja no utilizar un sistema de filtrado tan sofisticado y se puede manejar las presiones de los gases de mejor manera [11].

En la figura 10, se puede reconocer un esquema de un prototipo, que por su misma constitución del proceso utiliza elevadas temperaturas por lo que es necesario que los elementos resistan este gradiente de temperatura sublime y una fabricación compleja, es por esta razón que esta tecnología debe ser estudiada posteriormente, para optimizar su construcción, sus materiales y sistemas que puedan optimizar el trabajo de extracción de hidrógeno [11].

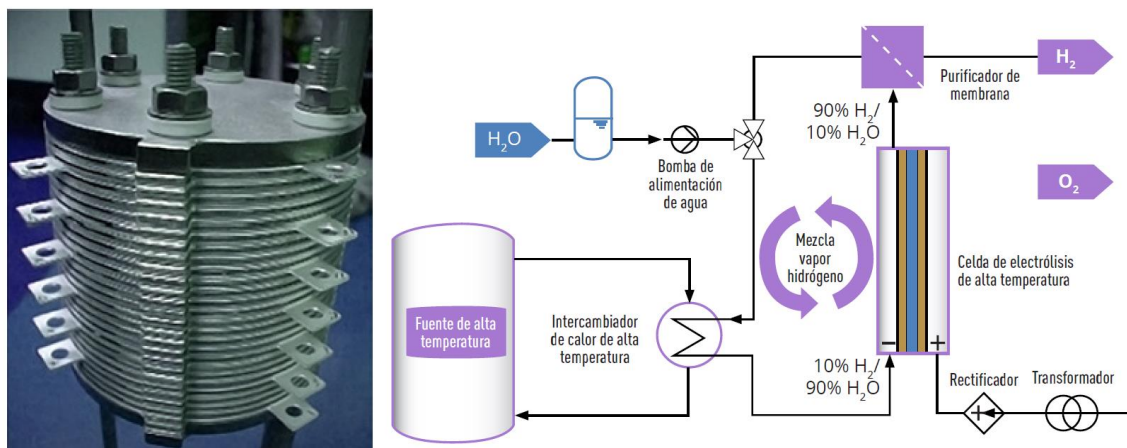


Figura 10: Esquema de electrolizador SOEC [11].

Esta manera de extracción aún se encuentra en desarrollo pero tiene una gran posibilidad de aprovecharse, en diferentes campos de la energía, como es en energías térmicas, centrales de concentradores solares, geo termia y reactores nucleares [11].

#### 1.4.11. Los principales electrólitos que se pueden usar en electrólisis.

Principalmente el electrólito que se utiliza en la electrólisis, son químicos que están disueltos en agua y deben cumplir la característica principal de ser un buen conductor de la electricidad, en este caso para que se pueda realizar una buena separación de iones cuando se efectúa la electrólisis [12].

Según Guerrero y Pasantes [12], los principales compuestos que son utilizados para electrólisis son los que se mencionan a continuación:

- Cloruro de potasio KCL
- Sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4$
- Ácido clorhídrico HCL
- Ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- Ácido acético  $\text{CH}_3\text{COOH}$
- Hidróxido de sodio NaOH
- Hidróxido de potasio KOH

#### **1.4.12. Materiales que se pueden usar para electrodos.**

Los materiales que se pueden usar para electrodos son variados, pero deben cumplir ciertas características para poder ser usados, como tener resistencia a la corrosión, ser buenos conductores de la electricidad, que sean comercialmente accesibles y económicos. Los materiales pertenecen a la familia de los metales y son los siguientes:

- Cobre.
- Aluminio.
- Oro.
- Plata.
- Acero dulce.
- Acero inoxidable.
- Platino.
- Iridio.
- Muchos más.

El principal problema de estos materiales es que algunos no tienen las propiedades necesarias, para poder soportar el ambiente corrosivo en el que se va a desenvolver la electrólisis, existiendo otros materiales que soportan muy bien este ambiente, pero son difíciles de conseguir o son económicamente inaccesibles para este tipo de proyectos. Por esta razón, de todos los materiales que se pueden usar, se debe determinar la mejor opción, como es el acero inoxidable o el aluminio, porque estos materiales son un poco más accesibles y fáciles de encontrar.

#### **1.4.13. Aplicaciones del hidrógeno.**

El hidrógeno, se usa para aplicaciones convencionales como es para la industria química y para la refinería especialmente en la producción de amoníaco [13].

Aparte de las aplicaciones antes mencionadas el hidrógeno se usa para el transporte liviano y pesado, estacionarias para el almacenamiento energético y respaldo, móviles o de uso directo en redes de gas [13].

Además, se espera que la generación de hidrógeno aumente para aplicaciones de almacenamiento energético especialmente en el sector transporte [13].

En la figura 11, se distinguen las diferentes aplicaciones del hidrógeno Convencionales, Transporte, Estacionarias, Móviles Uso de hidrógeno como gas [13].

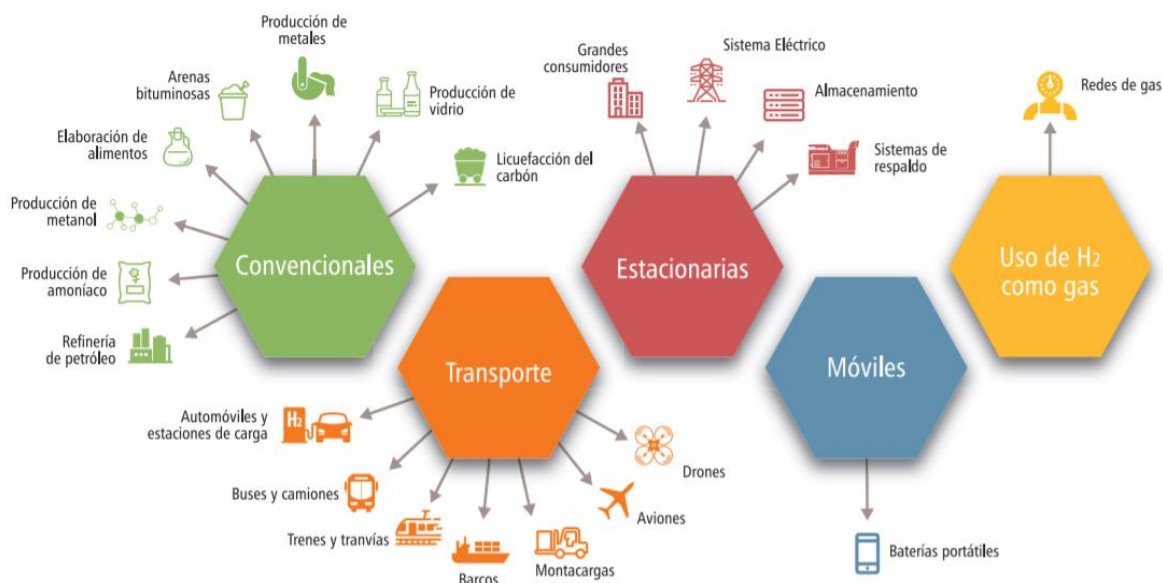


Figura 11: Aplicaciones del hidrógeno [14].

Actualmente, el hidrógeno es producido para satisfacer las demandas industriales y de energía según la relación de la tabla 5, [14].

Tabla 5: Aplicaciones industriales y energéticas del hidrógeno [14].

Fabricación de amoníaco	Refinerías	Otros productos químicos	Producción de metanol	Aplicaciones energéticas
50%	37%	4%	8%	1%

Como se puede observar una mínima parte se usa con fines energéticos especialmente para el sector transporte mientras que son más importantes las aplicaciones industriales [14]. A continuación, se detallan las aplicaciones más importantes.

### Producción de amoniaco.

Conforme se muestra en la tabla 5, el 50% de la producción se emplea para amoniaco que además puede ser usado en la agricultura como componente de los fertilizantes. Es uno de los químicos sintéticos que más se fabrica en el mundo [13].

La reacción química a partir del hidrógeno y el nitrógeno gaseoso se describe a continuación:

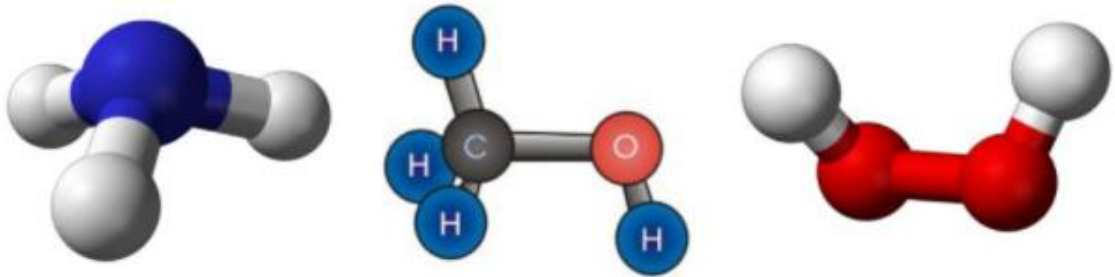
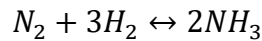


Figura 12: Moléculas de amonio NH<sub>3</sub>, metanol CH<sub>3</sub>OH y peróxido de hidrógeno H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [15].

### Producción de metanol.

Conocido también como alcohol metílico, usado como líquido anticongelante, combustible y disolvente, siendo este uno de los compuestos que podrían sustituir a los combustibles fósiles para transporte liviano y pesado [13].

Vásquez y Salinas [13], dicen para la producción de metanol se requiere de tres pasos:

1. Preparación de gas sintético.
2. Síntesis de metanol.
3. Purificación/destilación de metanol.

### Fabricación de peróxido de hidrógeno.

Conocido como agua oxigenada, es un compuesto no inflamable e inestable, descomponiéndose en oxígeno y agua liberando gran cantidad de calor [14].



Posee usos industriales, entre los principales se destacan el blanqueo de la pulpa de papel, algodón y telas, se usa como sustituto del cloro [14].

### **Hidrogenación de aceites.**

La aplicación más común del hidrógeno es hidrogenar los aceites orgánicos comestibles. La hidrogenación es un proceso químico donde se transforma el aceite en una grasa sólida [14].

En el siglo XX comenzó a industrializarse la hidrogenación de los aceites convirtiéndose en el proceso más utilizado para aumentar el punto de fusión de grasas alimenticias [14].



Figure 13: Con la hidrogenación el aceite se transforma en grasa solida [15].

### **Hidro desulfuración de combustibles.**

La industria petroquímica usa el hidrógeno como materia prima de los productos derivados del petróleo y para la reducción de la cantidad de partículas, aromáticos y azufres presentes en la gasolina y gasóleo [14].

### **Transporte.**

Gracias a su versatilidad y flexibilidad puede usarse como celdas de combustible para producción de electricidad, suministrar energía a pequeños dispositivos electrónicos y procesos industriales, así como también para el movimiento de motores de combustión interna y para la producción de calor [13].

Se considera el uso de hidrógeno para el transporte en autos de pasajeros, buses, entre otros [13].

#### 1.4.14. Tipos de celda para extractores de hidrógeno.

Existen en la actualidad dos tipos de celdas que se pueden utilizar para la extracción de hidrógeno, estas se denominan celda seca y celda húmeda, cada una será explicada a continuación [15].

**Celda húmeda:** este tipo de celdas están sumergidas completamente en el electrolito, y su desenvolvimiento es sencillo, ya que permite que la electricidad se disperse completamente dentro del electrolito, provocando que la separación de las partículas de hidrógeno ocurra en el cátodo cargado negativamente y oxígeno sucediendo en el ánodo cargado positivamente, los gases que son separados alrededor de los electrodos son expulsados hacia el exterior, su construcción es sencilla por lo que es muy utilizada, se puede visualizar en la figura 14 a continuación [15].

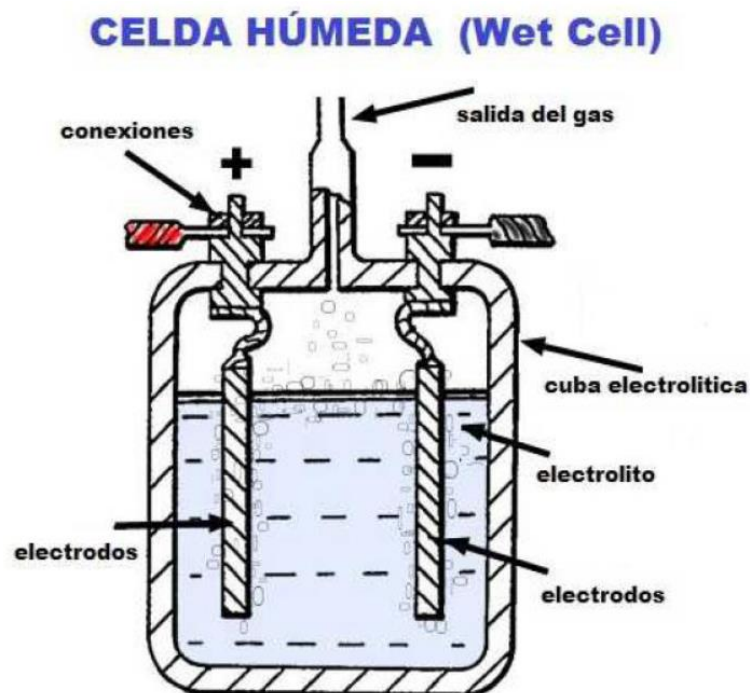


Figura 14: Diagrama de la celda húmeda [16].

**Celda seca:** esta celda tiene una eficiencia mayor a la celda húmeda, pero su construcción es más complicada ya que el electrolito se encuentra dentro de la celda, siendo un

contenedor donde el electrolito circula dentro de las celdas y también los gases producidos cuando está en funcionamiento, la celda se presenta en la figura 15 a continuación [15].

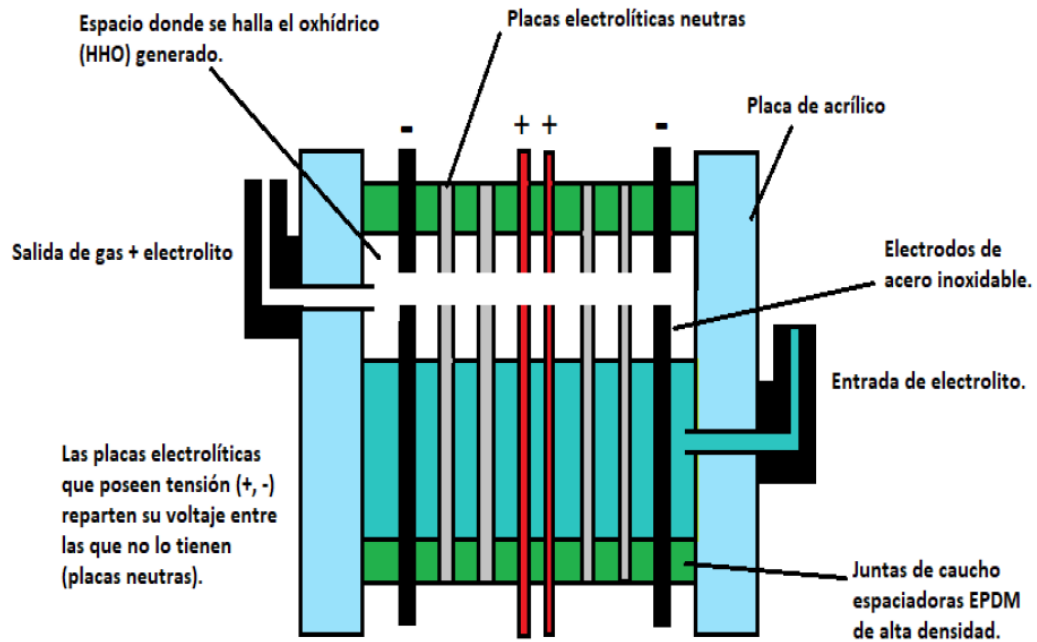


Figura 15: Esquema de la celda seca [16].

#### 1.4.15. Ley de Ohm.

Esta ley fue propuesta por el físico matemático alemán George Simón OHM, relaciona tres magnitudes que proporcionan los circuitos eléctricos, como son el voltaje o tensión, intensidad de corriente y resistencia [16], su relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$V = I * R \quad \text{ecuación (1)}$$

Donde:

$V$ : es, el voltaje y se mide en voltios (V).

$I$ : es, la intensidad y se mide en amperios (Amp).

$R$ : es, la resistencia y se mide en ohmios ( $\Omega$ ).

**Circuitos en serie:** los circuitos en serie se forman al conectarse los elementos consumidores uno a continuación del otro, y los polos se conecten a la fuente de poder como se puede observar en la figura 16 [16].

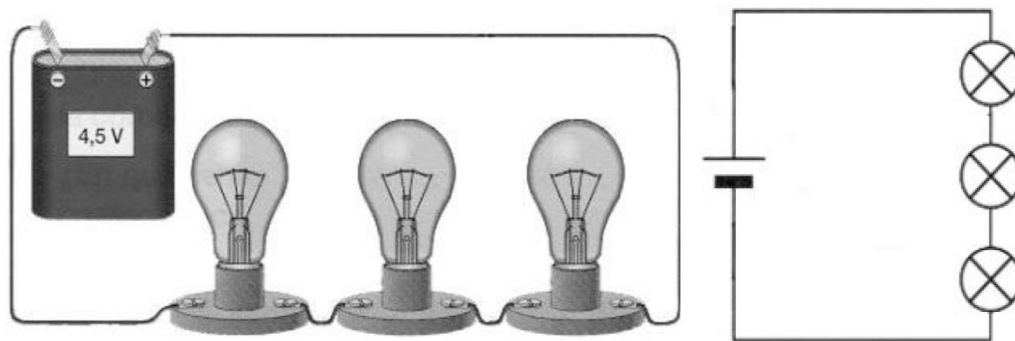


Figura 16: Circuito en serie [17].

**Circuito en paralelo:** los circuitos que están en paralelo sus resistencias o consumidores están conectados todos a la misma fuente de energía, esto se logra creando líneas de transmisión de energía para cada resistencia como se puede apreciar en la figura 17. [16].

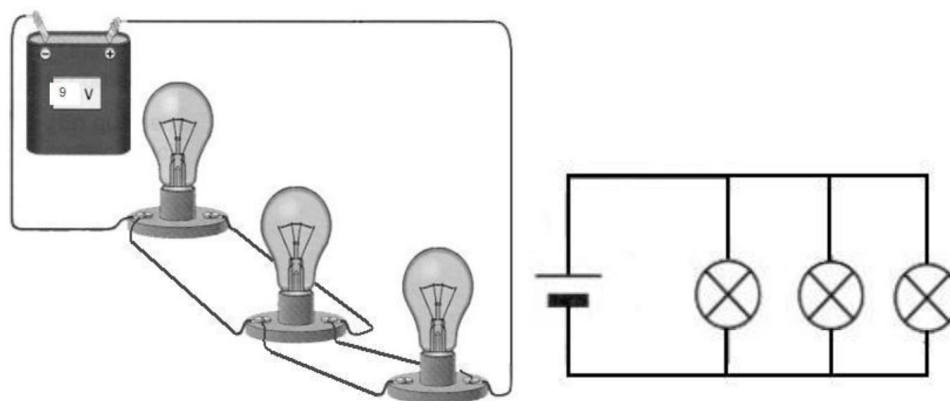


Figura 17: Circuito en paralelo [17].

#### 1.4.16. Ley de Kirchoff.

Estas leyes son complementarias de la ley de OHM para circuitos eléctricos por lo tanto también hay diferencias entre los circuitos cuando están en serio o en paralelo [16].

**Para circuitos en serie:** cómo están los consumidores uno tras de otro, el voltaje total será iguala a la suma de todos los voltajes de los consumidores, es decir que el voltaje se reparte a cada resistencia, pero la intensidad no cambia esta se mantiene en todo el circuito [16].

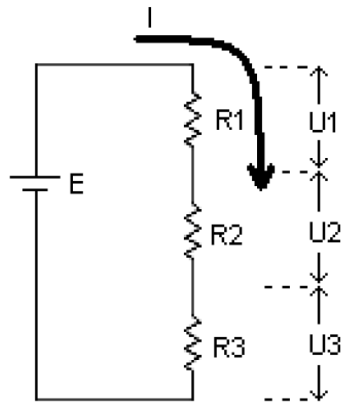


Figura 18: Circuito en serie intensidad constante voltaje variable [17].

**Para el circuito en paralelo:** como las resistencias están conectadas a la fuente de energía aquí será el mismo voltaje para todo el circuito en paralelo, pero la intensidad de corriente se reparte para todas las partes del circuito, es decir que la suma de todas las intensidades de cada consumidor o rama en paralelo debe ser igual a la que entrega la fuente de energía. [16].

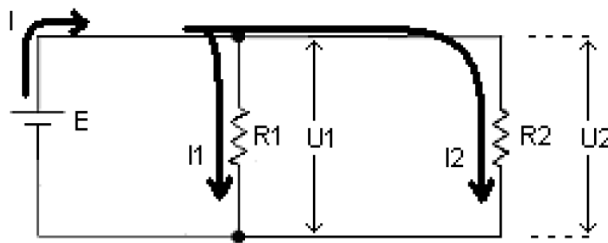


Figura 19: circuito en paralelo voltaje igual intensidad variable [17].

#### 1.4.17. Ecuación de Faraday

Antes de partir con la ecuación se enunciara lo que enunció Faraday cuando experimento con electrólisis: “La masa de una sustancia depositada en un electrodo durante la electrólisis es directamente proporcional a la cantidad de electricidad transferida al mismo electrodo” [17].

Por lo tanto, el Faraday es una unidad cuantitativa para la energía eléctrica, expresándose como la cantidad de energía eléctrica que puede reducir un peso equitativo de una disolución en sustancia en el electrodo catódico o cátodo y la oxidación de peso equitativo

de la misma disolución en el electrodo anódico o ánodo, esto pertenece a ganar o perder una mol de electrones, entonces un Faraday equivale a la siguiente cantidad [17]:

$$1F = 96.500 \text{ Coulombios}$$

La primera ley para electrólisis de Faraday según Quiñonez G [17], menciona que para determinada solución electrolítica el conjunto de elementos depositados o liberados sobre los electrodos, es directamente proporcional a la cantidad total de electricidad que es transmitida por el electrólito, así como de la misma manera las reacciones químicas es directamente proporcional a la cantidad de energía eléctrica que atraviesa el electrólito.

La segunda ley para electrólisis de Faraday según Quiñonez G [17], menciona que si se tiene diferentes electrodos y tienen distintos electrólitos, se reparte la misma cantidad de energía eléctrica a cada electrodo, por lo tanto se deposita una cantidad de sustancia directamente proporcional al peso equivalente del elemento químico o sustancia.

Se maneja la siguiente ecuación denominada el número de Faraday para electrólisis:

$$\# \text{ de Faraday} = \frac{I (\text{amperios}) * t(\text{segundos})}{96500 \text{ Am} * \text{seg coulomb}} \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde:

*I*: es, la intensidad y se mide en amperios (Amp).

*t*: es, el tiempo y está en segundos (seg).

Contante de Faraday: 96500 Am\*seg o coulomb

La ecuación 2 se basa directamente de cuanta intensidad sea proporcionada por la fuente de energía, por lo tanto, no depende de cuanta cantidad de voltaje sea introducida a la celda electrolítica, pero este mismo voltaje va a estar en relación con la conductividad iónica que exista en el electrolizador, es decir con qué facilidad el voltaje sea conducido por el electrólito, hay que tomar en cuenta que tiene el mismo tipo de material en ambos electrodos, por lo tanto la reacción de óxido reducción no es de conducción de material de un electrodo a otro, más bien es de una separación de las moléculas del agua.

## CAPÍTULO II

### 2. METODOLOGÍA

El presente proyecto está dirigido al diseño y construcción de un extractor de hidrógeno utilizando la electrólisis del agua, tratando de que las energías renovables sean estudiadas de una manera más profunda para utilizarlas frecuentemente, ya que las energías no renovables en los últimos años presentan escasos volviéndose poco rentables, por lo que será necesario nuevas fuentes de consumo de energía. Para conseguir los objetivos propuestos, se inicia con la selección de alternativa más eficaz, que permitirá realizar el diseño del prototipo de extracción de hidrógeno, consecuente de la selección de materiales más adecuados, para proceder con la construcción y evaluación del prototipo comprobando su funcionamiento para determinar la cantidad de hidrógeno producido.

#### 2.1. Selección de alternativas para el diseño del extractor de hidrógeno.

Para la selección de alternativas se considera el análisis de criterios ponderados, por que ayuda a determinar una opción viable ante una necesidad. Para esto se presenta los valores del criterio de calificación.

- Se considera 1, cuando el criterio o selección de las filas es superior al criterio de las columnas.
- Se considera 0.5, cuando el criterio o selección de las filas es igual al criterio de las columnas.
- Se considera 0, cuando el criterio o selección de las filas es inferior al criterio de las columnas.

Los criterios que se evaluarán para el extractor de hidrógeno están basados en las diferentes formas de extracción de hidrógeno con ayuda de la electrólisis del agua, principalmente basados en la teoría de las diferentes formas de extracción, por lo tanto, se manejarán los siguientes criterios:

**Capacidad de producción:** Con este criterio se considera la producción de hidrógeno que se puede conseguir con las diferentes maneras de extracción.

**Confiabilidad:** En este criterio se examina la vida útil de los sistemas y subsistemas, que conforman el extractor de hidrógeno de las distintas maneras de producción.

**Costos:** En este criterio se evalúa la diferencia económica que existe entre las distintas formas de extracción.

Tabla 6: Evaluación de criterios.

Criterio	Capacidad de producción	Confiabilidad	Costos	Sumatoria	Ponderación
Cap. De producción	0	0,5	0	0,5	0,17
Confiabilidad	1	0	1	2	0,67
Costos	0,5	0	0	0,5	0,17
Total				3	1

Los criterios que están valorados tienen la siguiente ponderación desde el valor superior al valor inferior, los criterios de la capacidad de producción y costos tienen un 0.17, pero la confiabilidad tiene una ponderación de 0.67 por lo tanto, este criterio es el que más resalta de los tres por lo que se debe tener en cuenta en la valoración de cada uno de los criterios.

Cada uno de los criterios tendrán que ser evaluados para poder determinar la mejor opción para la extracción de hidrógeno. Los criterios a ser evaluados son:

- Criterio de capacidad de producción.
- Criterio de confiabilidad.
- Criterio de costos.

Para cada criterio que se evalúa se mencionan las diferentes maneras de extracción de hidrógeno:

- Extracción de hidrógeno por electrólisis alcalina.
- Extracción de hidrógeno por electrólisis polimérica PEM.
- Extracción de hidrógeno por electrólisis de óxido sólido SOEC.



El primer criterio evaluado es el de capacidad de producción dando como resultado lo siguiente:

Tabla 7: Evaluación del criterio capacidad de producción.

Capacidad de Producción	Electrolizador alcalino	Electrolizador PEM	Electrolizador SOEC	Sumatoria	Ponderación
E. alcalina	0	0,5	0,5	1	0,33
E. PEM	1	0	0,5	1,5	0,50
E. SOEC	0,5	0	0	0,5	0,17
Total				3	1

En la tabla 7, esta expresada la evaluación del criterio capacidad de producción, analizando los resultados de ponderación el electrolizador polimérico PEM, es el que tiene una mayor puntuación, ya que este según la teoría produce más hidrógeno que los otros electrolizadores analizados.

El segundo criterio analizado es el de confiabilidad dando como resultado lo siguiente:

Tabla 8: Evolución del criterio confiabilidad.

Confiabilidad	Electrolizador alcalino	Electrolizador PEM	Electrolizador SOEC	Sumatoria	Ponderación
E. alcalina	0	1	0,5	1,5	0,50
E. PEM	0,5	0	0,5	1	0,33
E. SOEC	0,5	0	0	0,5	0,17
Total				3	1

En la tabla 8, esta expresada la evaluación del criterio de confiabilidad, analizando los resultados de ponderación el electrolizador alcalino, es el que tiene una mayor puntuación, ya que este según la teoría es más confiable por su constitución que los otros electrolizadores analizados.

El segundo criterio analizado es el de costos dando como resultado lo siguiente:

Tabla 9: Evolución del criterio de costos.

Costos	Electrolizador alcalina	Electrolizador PEM	Electrolizador SOEC	Sumatoria	Ponderación
E. alcalina	0	0,5	0,5	1	0,29
E. PEM	1	0	1	2	0,57
E. SOEC	0,5	0	0	0,5	0,14
Total				3,5	1

En la tabla 9, esta expresada la evaluación del criterio de costos, analizando los resultados de ponderación el electrolizador polimérico PEM, es el que tiene una mayor puntuación, ya que este según la teoría es más económico, por su construcción debido a que necesita menos componentes que los otros electrolizadores analizados.

Analizados todos los criterios para cada tipo de alternativa se llega a determinar lo siguiente:

Tabla 10: Ponderación de las alternativas.

Selección	Capacidad de producción	Confiabilidad	Costos	Sumatoria	Ponderación
Electrolizador alcalina	0,33	0,50	0,17	1,00	2
Electrolizador PEM	0,50	0,33	0,50	1,33	1
Electrolizador SOEC	0,17	0,17	0,33	0,67	3

El análisis tiene como resultado que la opción más viable es el electrolizador polimérico PEM, como se demuestra en la tabla 10, ya que cumple con ciertos criterios analizados para su diseño y su construcción.

Dado que el proyecto es técnico, se toma en cuenta el sistema de la extracción de hidrógeno por celdas PEM, para la construcción de electrolizador se extrae las partes más importantes de mencionado sistema. Los electrodos utilizados en el electrolizador PEM son poliméricos de iridio y platino, para facilidad de la construcción del prototipo los electrodos son reemplazados con un acero inoxidable o aluminio, que cumple la misma función que los electrodos poliméricos de transmitir la suficiente energía eléctrica para

separar las partículas de hidrógeno y oxígeno y resistir el ambiente corrosivo del electrolito.

## 2.2. Diseño de extractor de hidrógeno.

Para esta fase del proyecto se utiliza un software especializado para diseño, tratando de que sea lo más cercano a la realidad posible.

En la fase de diseño del prototipo el principal componente de diseño, es el electrolizador porque es donde se va a producir el hidrógeno, para un diseño compacto y duradero es necesario tomar en cuenta algunos factores importantes como los materiales que se van a utilizar para la construcción y facilidad de mantenimiento.

Para el extractor real esta propuesto que la carcasa del electrolizador se haga con acrílico, ya que este material aguanta presiones altas y es transparente para poder observar la funcionalidad del extractor.

Las dimensiones que tiene propuesto para el electrolizador de extracción es de 100 centímetros de largo, por 16 centímetros de ancho y por 14 centímetros de alto esto se puede evidenciar en la figura 20.

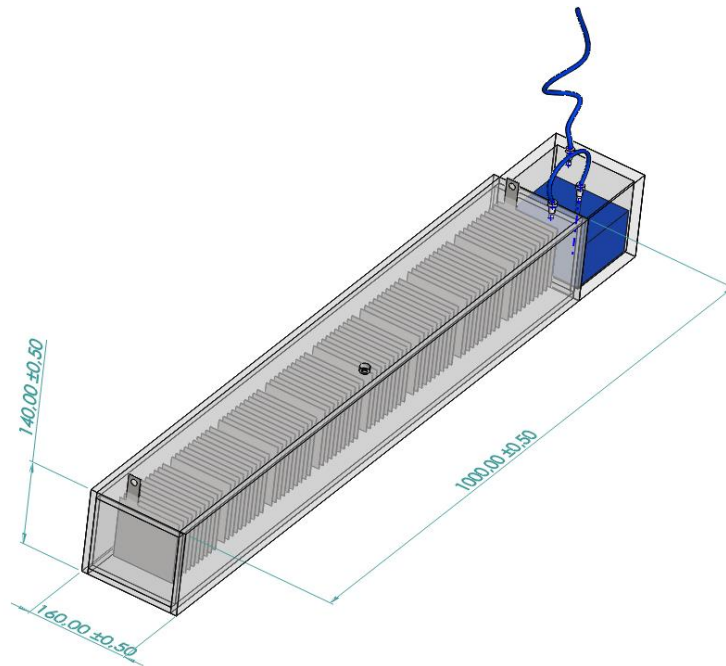


Figura 20: Dimensiones del electrolizador.

El interior del electrolizador está compuesto por dos tipos de placas de acero inoxidable AISI 304, una que no está en contacto con la superficie exterior, y otra que va a estar conectada directamente a la energía eléctrica suministrada por una fuente externa. Las dimensiones de placa interna son de 10 x 10 cm como se muestra en la figura 21, y la placa que va a estar conectada a la fuente de poder con dimensiones similares a la placa del interior, pero con la diferencia que tiene un ancla sobresalida de dimensiones 4.5 x 2 cm y un orificio de 1 cm, esto se puede observar en la figura 22.

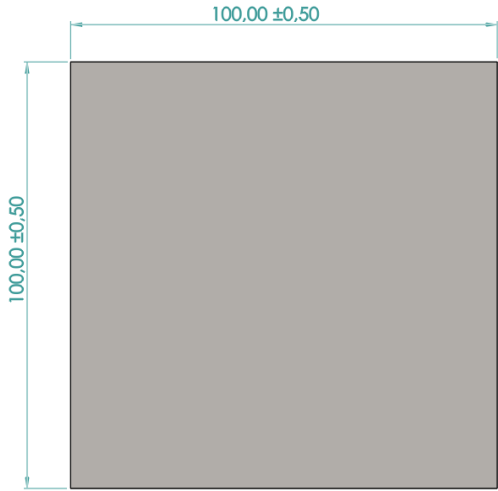


Figura 21: Placa interna.

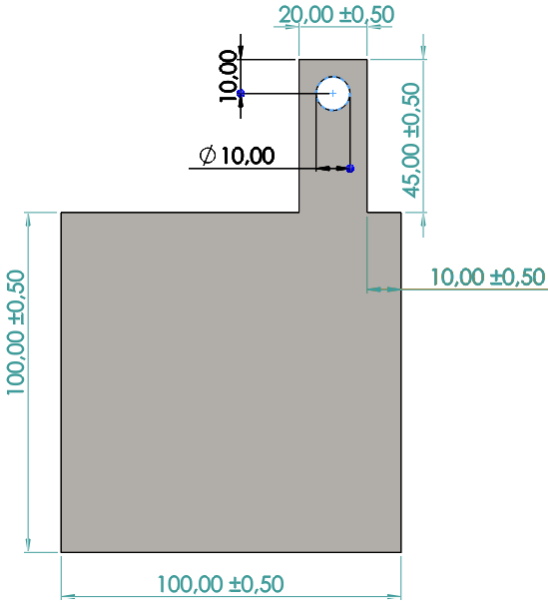


Figura 22: Placa externa.

Para que se mantengan las placas en su lugar es necesario un soporte, este soporte este diseñado para que las placas no se muevan y conserven una distancia prudente, y esta propuesto en el mismo material que la carcasa que es de acrílico, la forma del soporte se puede observar en la figura 23, tiene la dimensión del ancho de la placa que es de 10 centímetros y una abertura donde cabe exactamente cada celda de 1 milímetro, para evitar que las placas se choquen están separadas con una distancia de 10 mm.

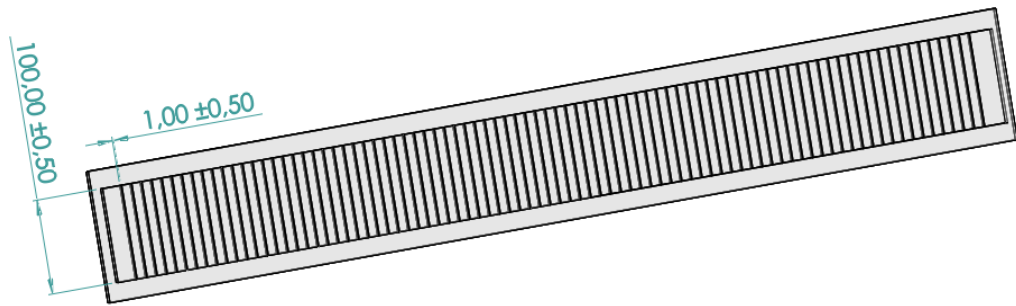


Figura 23: Soporte para celdas.

Es necesario también purificar los gases que salen del electrolizador por ese motivo se agrega un recipiente con agua, donde los gases entran al agua y salen sin nada hacia el exterior donde serán conducidos por otra cañería, para llevar directo a cualquier uso que se le pueda dar, hay que recalcar que los gases producidos serán usados para quemarse y producir calor. En la figura 24 se puede observar cómo está constituido este sistema y su construcción es de acrílico el mismo que se utiliza en el generador de gases.

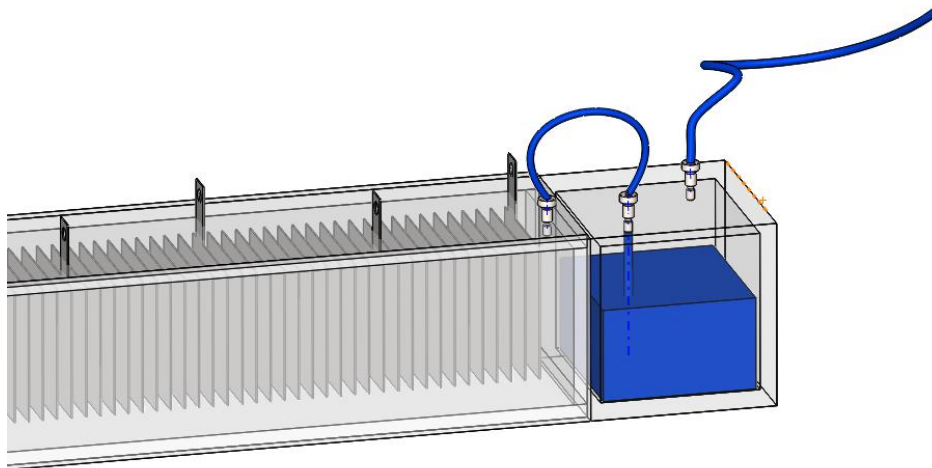


Figura 24: Purificador de gases.

Las conexiones que se realizarán en las placas serán en paralelo y en serio, por motivos de estudio se realizara el cálculo para cada situación de conexiones.

### Cálculo de conexión en paralelo.

La conexión en paralelo se realiza conectando intercaladamente una placa positiva y una placa negativa, por la ley de Ohm y Kirchhoff dice que los circuitos conectados en paralelo, su voltaje se conserva, pero su intensidad de divide, para mayor comprensión se muestra la figura 25.

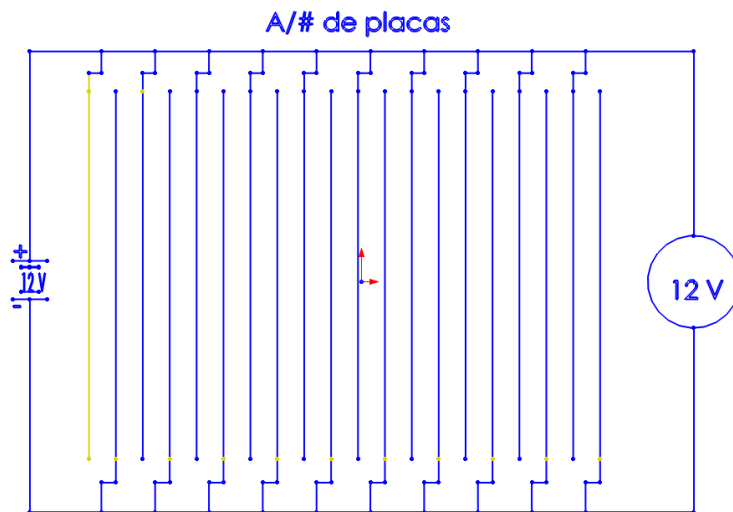


Figura 25: Conexión en paralelo.

Por lo tanto, el electrolizador real está constituido por 90 placas y se utilizara una batería para autos estándar, con un voltaje de 12 voltios y un amperaje de 45 amperios hora.

Como el circuito está en paralelo se aplica la ley de Ohm para realizar el cálculo de la intensidad real ( $I$ ) que se ocupara para posteriores cálculos.

$$I = \frac{In}{N} \quad \text{ecuación (3)}$$

Donde:

$I$ : es, la intensidad y se mide en amperios (Amp).

$In$ : es, la intensidad que ingresa al circuito y se mide en amperios (Amp).

*N*: número de placas.

$$I = \frac{45 \text{ Amp}}{90 \text{ placas}}$$

$$I = 0.5 \text{ amperios}$$

Por lo tanto, se tendrá en cada placa o celda 0.5 amperios.

El número de Faraday corresponde a la cantidad de electricidad por mol de electrones de un elemento, y se utiliza la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\# \text{ de Faraday} = \frac{0.5 \text{ Amp} * 60 \text{seg}}{96500 \text{ Amp} * \text{seg colulomb}}$$

$$\# \text{ de Faraday} = 0.00031088$$

Como siguiente paso se calcula el equivalente químico del oxígeno que tiene como masa atómica 15.99 gr y la valencia de 2 entonces se utiliza la ecuación 4:

$$\text{Equivalente químico} = \frac{\text{masa atómica}}{\text{valencia del elemento}} \quad \text{ecuación (4)}$$

Donde:

*Masa atómica*: está en gramos (gr)

*Valencia del elemento*: es adimensional

$$\text{Equivalente químico} = \frac{15.99 \text{ gr}}{2}$$

$$\text{Equivalente químico} = 7.995 \text{ gr}$$

Continuando se tiene que calcular el peso de productos del elemento con ayuda de la ecuación 5 que se presenta a continuación:

$$\text{Peso de productos} = \# \text{ de Faraday} * \text{Equivalente químico} \quad \text{ecuación (5)}$$

$$\text{Peso de productos (O}_2\text{)} = 0.00031088 * 7.995 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de productos } (O_2) = 0.002485 \frac{gr}{min}$$

Como definición una mol de gas equivale a 22.4lt por lo tanto se calcula las 0.5 moles de oxígeno en la ecuación 6.

$$\frac{22.4lt}{1mol O_2} * 0.5 \text{ moles de } O_2 = 11.2 \text{ moles de } O_2 \quad \text{ecuación (6)}$$

Por medio de balanceo estequiométrico se necesita conseguir el oxígeno que se produce en gas, por lo tanto, se utiliza la ecuación 7:

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{X * \text{peso de productos}}{2} \quad \text{ecuación (7)}$$

Donde:

X: es, una constante que se toma para el oxígeno sabiendo que una mol de oxígeno equivale a 22.4 litros de gas oxígeno, por lo tanto, se calcula con la ecuación 8:

$$X = \frac{\frac{1}{2} \text{ mol de } O_2}{\text{equivalente químico}} \quad \text{ecuación (8)}$$

$$X = \frac{\frac{22.4lt}{2}}{7.995 gr}$$

$$X = 1.4008755 \frac{lt}{gr}$$

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{1.4008755 \frac{lt}{gr} * 0.002485 \frac{gr}{min}}{2}$$

$$\text{gas producido } O_2 = 0.0017405879 \frac{lt}{min}$$

Para el hidrógeno como es una relación de 2 a 1 para calcular el gas producido de H<sub>2</sub> es necesario solo multiplicar por dos el gas producido de oxígeno, con la ecuación 9:

$$\text{gas producido } H_2 = \text{gas producido } O_2 * 2 \quad \text{ecuación (9)}$$



$$\text{gas producido } H_2 = 0.0017405879 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0.0034811758 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0.0034811758 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1\text{lt}}$$

$$\text{gas producido } H_2 = 3.48 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

El gas producido totalmente ( $H_2+O_2$ ) por cada celda se determina sumando el hidrógeno producido más el oxígeno producido y se obtiene lo siguiente con la ecuación 10:

$$\text{gas producido total} = \text{gas producido } H_2 + \text{gas producido } O_2 \quad \text{ecuación (10)}$$

$$\text{gas producido total} = 0.0034811758 \frac{\text{lt}}{\text{min}} + 0.0017405879 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

$$\text{gas producido total} = 0.0052270548 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

El análisis concluye con la producción total del electrolizador, ya que los cálculos realizados están propuestos para un minuto y para cada celda, por lo tanto, para poder encontrar la producción total el gas producido total se debe multiplicar por el número de placas de la siguiente manera.

$$\text{producción total} = 0.0052270548 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * 90 \quad \text{ecuación (11)}$$

$$\text{producción total} = 0.470434932 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

En unidades de caudal se presenta en la ecuación 12:

$$\text{producción total} = 0.470434932 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1\text{lt}} \quad \text{ecuación (12)}$$

$$\text{producción total} = 470.434932 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Elaboración propia con base en García [18], con el método de calcular el oxyhidrógeno que es desprendido en un reactor.

### Cálculo de conexión en serie.

La conexión en serie se realiza conectando a un extremo de todo el electrolizador el polo positivo y al otro extremo el polo negativo, por la ley de Ohm y Kirchhoff dice que los circuitos conectados en serie, su voltaje se divide, pero su intensidad se conserva, para mayor comprensión se muestra la figura 26.

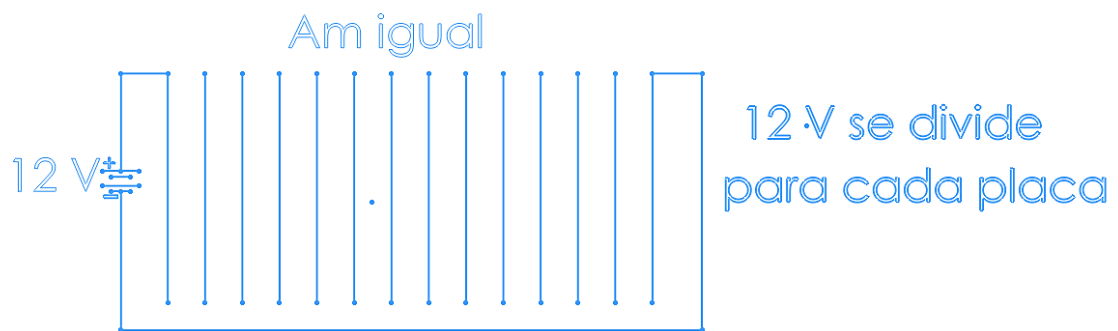


Figura 26: Conexión en serie.

Por lo tanto, el electrolizador real está constituido por 90 placas y se utilizara una batería para autos estándar, con un voltaje de 12 voltios y un amperaje de 45 amperios hora.

Como el circuito está en serie se aplica la ley de Ohm y se determina que el amperaje se conserva. Por lo tanto, se tendrá en cada placa o celda 45 amperios.

El número de Faraday corresponde a la cantidad de electricidad por mol de electrones de un elemento, la ecuación 2 se representa de la siguiente manera:

$$\# \text{ de Faraday} = \frac{45 \text{ Amp} * 60 \text{ seg}}{96500 \text{ Amp} * \text{ seg coulomb}}$$

$$\# \text{ de Faraday} = 0.0279792746$$

Como siguiente paso se calcula el equivalente químico del oxígeno que tiene como masa atómica 15.99 gr y la valencia de 2 entonces se utiliza la ecuación 4:

$$\text{Equivalente químico} = \frac{15.99 \text{ gr}}{2}$$

$$\text{Equivalente químico} = 7.995 \text{ gr}$$

Continuando se tiene que calcular el peso de productos con ayuda de la ecuación 5 que se presenta a continuación:

$$\text{Peso de productos } (O_2) = 0.0279792746 * 7.995 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de productos } (O_2) = 0.2236943 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

Como definición una mol de gas equivale a 22.4lt por lo tanto se calcula las 0.5 moles de oxígeno en la ecuación 6.

$$\frac{22.4\text{lt}}{1\text{mol } O_2} * 0.5 \text{ moles de } O_2 = 11.2 \text{ moles de } O_2$$

Por medio de balanceo estequiométrico se necesita conseguir el oxígeno que se produce en gas, por lo tanto se utiliza la ecuación 7:

X: es, una constante que se toma para el oxígeno sabiendo que 1 mol de oxígeno equivale a 22.4 litros de gas oxígeno, por lo tanto, se calcula con la ecuación 8:

$$X = \frac{\frac{22.4\text{lt}}{2}}{7.995 \text{ gr}}$$

$$X = 1.4008755 \frac{\text{lt}}{\text{gr}}$$

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{1.4008755 \frac{\text{lt}}{\text{gr}} * 0.2236943 \frac{\text{gr}}{\text{min}}}{2}$$

$$\text{gas producido } O_2 = 0.1566839325 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

Para el hidrógeno como es una relación de 2 a 1 para calcular el gas producido de H<sub>2</sub> es necesario solo multiplicar por dos el gas producido de oxígeno, con la ecuación 9:

$$\text{gas producido } H_2 = 0.1566839325 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0.313367865 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

El gas producido totalmente ( $H_2+O_2$ ) por cada celda se determina sumando el hidrógeno producido más el oxígeno producido y se obtiene lo siguiente con la ecuación 10:

$$\text{gas producido total} = 0.313367865 \frac{\text{lt}}{\text{min}} + 0.1566839325 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

$$\text{gas producido total} = 0.4700517975 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

El análisis concluye con la producción total del electrolizador, ya que los cálculos realizados están propuestos para un minuto y para cada celda, por lo tanto, para poder encontrar la producción total el gas producido total se debe multiplicar por el número de placas de la siguiente manera con la ecuación 11.

$$\text{producción total} = 0.4700517975 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * 90$$

$$\text{producción total} = 42.304661775 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

En unidades de caudal se presenta en la ecuación 12:

$$\text{producción total} = 0.470434932 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1\text{lt}}$$

$$\text{producción total} = 42304.661775 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Por lo tanto, se ha considerado los dos tipos de conexiones, en el análisis anterior se llega a determinar que, con la conexión en paralelo, los gases totales que se produce es de  $470.43493 \text{ cm}^3/\text{min}$ , pero en la conexión en serie se logra determinar con el análisis que se produce una cantidad de gases de  $42304.661775 \text{ cm}^3/\text{min}$ , por lo tanto, la manera más efectiva para producir hidrógeno y oxígeno es con la conexión en serie.

Elaboración propia con base en García [18], con el método de calcular el oxyhidrógeno que es desprendido en un reactor.

### **2.3. Selección de equipos y materiales.**

Para la selección de materiales se debe tomar en cuenta que se va a tratar con electricidad y agua, la cual debe tener un electrólito para que pueda transmitir la energía eléctrica de mejor manera, esto implica que el electrolizador que se va a construir para separar las moléculas del agua, debe tener materiales anticorrosivos por las condiciones en las que va a funcionar. Por otra parte, la carcasa donde se van a mantener las celdas y el agua debe tener la suficiente resistencia y sellado para que no se escape los gases generados por efecto de la electrólisis y del agua que va a contener, ya que deben a ejercer una presión elevada que es el objetivo del prototipo.

#### **2.3.1. Material de las placas del electrolizador.**

Los electrolizadores PEM usan electrodos poliméricos de iridio y platino, la constitución de esta membrana será modificada y reemplazada en el prototipo por un material de similares características, el principal motivo de este cambio es cuantificar de gas producido por separado, consecuente a esto se considera la separación de los electrodos positivo y negativo en compartimiento distintos. Considerando que los electrodos deben ser resistente a la corrosión, motivo que el medio donde va a ocurrir la separación de las partículas de hidrógeno y oxígeno, es un ambiente altamente corrosivo por que dichas placas van a estar sumergidas en agua con algún ácido, que facilite conductividad iónica o transporte de energía eléctrica, por lo tanto, el material más viable para la construcción de los electrodos, son acero inoxidable o aluminio.

El material más fácil de conseguir y menos costoso es el acero inoxidable ya que se puede encontrar en varios tipos, por lo tanto, se hará un análisis en los diferentes aceros que se encuentran en el mercado nacional, para poder determinar la mejor opción para el extractor.

**Acero inoxidable AISI 304.-** este acero austenítico tiene una aleación de níquel con cromo, lo cual le permite resistir la corrosión de nivel intergranular, y resiste ambientes con químicos corrosivos, como son algunos ácidos, soluciones alcalinas y al agua [19].

En la tabla 10, se expresa la composición química de este acero, el cual por tener un bajo contenido carbono y un alto contenido de níquel-cromo, presenta una excelente resistencia a medios corrosivos. En la tabla 11, se expresa las propiedades mecánicas que por efectos del proyecto no son tan importantes porque la lámina de acero no va a estar sometida a esfuerzos externos.

Tabla 11: Composición química del acero Inox AISI 304 [19].

Composición química (%)								
C Max	Si Max	Mn	P Max	S Max	Ni	Cr	Mo	Otros
0.08	1	2	0.04	0.03	8-10.5	18-20	xx	xx

Tabla 12: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 304 [19].

Propiedades mecánicas						
Resistencia mecánica		Punto de fluencia		Elongación % min.	Pruebas de dureza (Max)	
Kg/mm <sup>2</sup>	Psi	Kg/mm <sup>2</sup>	Psi		Rockwell B	Vickers
49	69500	18	25500	40	81.7	160

**Acero inoxidable AISI 201.-** este acero austenítico tiene porcentajes de cromo, níquel y manganeso, por lo que presenta buenas propiedades a esfuerzos de tensión. Este acero si es resistente a la corrosión, pero moderadamente, por eso se utiliza en cocinas y para calentar o cocinar alimentos [19].

En la tabla 12, se expresa la composición química de este acero, el cual por tener alto contenido de carbono y alto contenido de níquel-cromo-manganeso, presenta una moderada resistencia a los medios corrosivos. En la tabla 13, se expresa las propiedades mecánicas que por efectos del proyecto no son tan importantes porque la lámina de acero no va a estar sometida a esfuerzos externos.

Tabla 13: Composición química del acero Inox AISIA 201 [19].

Composición química (%)								
C Max	Si Max	Mn	P Max	S Max	Ni	Cr	Mo	Otros
0.15	1	5.5-7.5	0.06	0.03	3.5-5.5	16-18		N:0.25Max

Tabla 14: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 201 [19].

Propiedades mecánicas						
Resistencia mecánica		Punto de fluencia		Elongación % min.	Pruebas de dureza (Max)	
Kg/mm <sup>2</sup>	Psi	Kg/mm <sup>2</sup>	Psi		Rockwell B	Vickers
65	93000	25	35800	40	92	205

**Acero inoxidable AISI 430.-** Este acero es ferrítico, por su constitución este material presenta una resistencia a la corrosión intermedia entre buena y moderada, ya que su porcentaje de carbono es mayor que el Inox AISI 304 y menor que el Inox AISI 201, pero tiene una particularidad de tener el mismo porcentaje de cromo, pero tiene un bajo contenido de níquel [19].

En la tabla 15, se expresa la composición química de este acero el cual, por tener alto contenido de carbono y alto contenido de cromo, presenta una moderada y buena resistencia a los medios corrosivos. En la tabla 16, se expresa las propiedades mecánicas que por efectos del proyecto no son tan importantes porque la lámina de acero no va a estar sometida a esfuerzos externos.

Tabla 15: Composición química del acero Inox AISIA 430 [19].

Composición química (%)								
C Max	Si Max	Mn	P Max	S Max	Ni	Cr	Mo	Otros
0.12	0.75	1	0.04	0.03	0.6	16-18	xx	Xx

Tabla 16: Propiedades mecánicas del acero Inox AISI 430 [19].

<b>Propiedades mecánicas</b>						
Resistencia mecánica		Punto de fluencia		Elongación % min.	Pruebas de dureza (Max)	
Kg/mm <sup>2</sup>	Psi	Kg/mm <sup>2</sup>	Psi		Rockwell B	Vickers
46	65800	22	30000	40	78	150

Entre los tres aceros inoxidable analizados el más eficiente con respecto a resistir ambientes corrosivos es el acero Inox AISI 304, tomando en cuenta que este acero es el más común para algunas aplicaciones y el más fácil de encontrar y aparte tiene una gran variedad de espesores y entre ellos, se encuentra el que se va a utilizar en la construcción del prototipo que es de un milímetro.

### **2.3.2. Carcasa del electrolisis.**

Como el electrolizador debe estar sellado herméticamente y controlar las válvulas de entrada de agua y salida de gases, por lo tanto, por el mismo funcionamiento del extractor de hidrógeno, éste debe contener los líquidos y gases a presiones variadas de funcionamiento, aparte que el recipiente debe ser aislante de la corriente para evitar cualquier accidente, por lo tanto, el material para la construcción del recipiente más óptimo, es algún plástico como el acrílico. Pero para la facilidad de construcción del prototipo se usa una carcasa plástica ya conformada de polipropileno, que presenta casi las mismas propiedades que el polimetilmetacrilato.

### **2.3.3. Parte neumática.**

Esta parte del prototipo se relaciona a las conexiones que se usa para conducir los gases y poder medirlos, para esto se usa acoples rápidos y manguera de poliuretano de 1/4, de esta manera se conduce los gases al recipiente de medición. En la figura 28 se observa la conexión de salida de gases de la parte neumática.



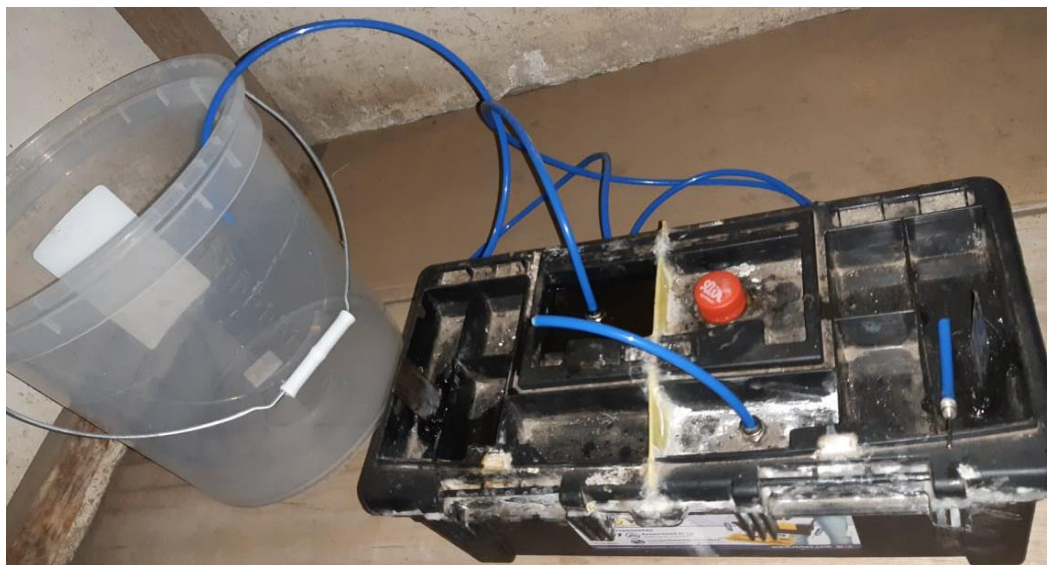


Figura 27: Parte neumática.

#### 2.3.4. Hidróxido de sodio NaOH.

El hidróxido de sodio es un compuesto que se utiliza para elevar la conductividad del agua, ya que esta no es buena conductora de la electricidad, para esto se mezcla el agua con este compuesto de un 99.9% de pureza denominado en perlas, se debe tener cuidado al manipular por que puede causar quemaduras y también al mezclarse por que genera calor y puede causar un accidente, como es un compuesto que es puesto bajo fiscalización se debe tener un permiso especial, para poder adquirir este químico ya que es utilizado para blanquear droga [20]. En la figura 29 se puede observar el compuesto químico en perlas.



Figura 28: Hidróxido de sodio en perlas NaOH.

### 2.3.5. Agua destilada.

El agua destilada es un compuesto que no está mezclado con ningún otro químico, su fórmula química es  $H_2O$  teniendo un 99.9% de pureza, se utiliza para este experimento porque es necesario extraer las partículas de gas  $H_2$ , por lo tanto, es necesario que se mezcle con una sal para que sea más conductora de la electricidad. En la figura 30 se puede verificar que se usa agua destilada.



Figura 29: Agua destilada  $H_2O$ .

### 2.3.6. Recipiente de experimentación.

El recipiente que se utiliza de preferencia es transparente de plástico resistente, y es donde se va a efectuar la medición de la cantidad de hidrógeno producido, esto se puede verificar en la figura 31.



Figura 30: Recipiente de experimentación.

### 2.3.7. Probeta de 2000 ml.

Esta probeta se utiliza principalmente para la medida de cantidad de hidrógeno producido, es utilizada en un método de medición de cantidad obtenido, se puede verificar en la figura 32.



Figure 31: Probeta de 2000 ml.

### 2.3.8. Herramientas de corte.

Para las herramientas de corte como principal se utiliza la cizalla manual, para cortar el material de las placas que van a actuar como electrodos, para complementar el trabajo también se utiliza una tijera para cortar metal y una amoladora, esto se puede verificar en la figura 33.



Figure 32: Herramientas de corte.

### 2.3.9. Balanza.

La balanza es utilizada para medir la cantidad de compuesto de NaOH, este se encuentra en forma de perlas y este se va a ser mezclada con el agua destilada para generar el electrólito, esto se puede observar en la figura 34.



Figura 33: Balanza.

### 2.3.10. Multímetro.

El multímetro se utiliza para realizar mediciones de voltaje y amperaje en los diferentes puntos de la parte eléctrica del prototipo, es recomendable verificar como se mide el amperaje en cada multímetro, su constitución se puede ver en la figura 35.



Figura 34: Multímetro.

### **2.3.11. Fuente conmutada.**

La fuente conmutada es utilizada para transformar la corriente alterna que obtiene normalmente de los tomacorrientes domésticos, a corriente continua para realizar la experimentación de la electrólisis, ya que es necesario que este tipo de corriente sea la predominante en el electrolizador para no provocar un corto circuito. Esta se puede reemplazar por una batería. El componente físico se puede observar en la figura 35.

### **2.4. Formas de cuantificación del gas hidrógeno.**

Las maneras de cuantificación de gas hidrógeno son variadas, una más eficiente que otra, pero se van a enunciar las más importantes a continuación:

- Método de cuantificación de gases numérico.
- Método de cuantificación de gases por diferencias volumétricas.
- Método de cuantificación de gases por llenado de probeta.
- Método de cuantificación de gases con caudalímetro.

*Método de cuantificación de gases numérico.* Este método utiliza las leyes y el número de Faraday para electrólisis, este método funciona sin importar la variación de presiones o temperaturas, con tal que el flujo de electricidad tenga un comportamiento por conductividad iónica, las leyes actúan sin inconvenientes y estas son independiste de la cantidad de voltios usados para que se produzca la electrólisis, pero si se toma en cuenta para saber a qué condiciones se está efectuando el experimento.

La metodología se explica con más detalle en el apartado del diseño del extractor de hidrógeno.

*Método de cuantificación de gases por diferencia volumétrica.* Este método utiliza una serie de implementos para la medición de la cantidad de gas producido convencionalmente. Como la producción de gas es constante en el electrolizador. Se utiliza la manguera con una adaptación en la salida de la misma, se coloca una aguja que se utiliza para proporcionar aire a balones. Por lo tanto, esta adaptación suministra el gas a un balón completamente desinflado, que va a estar sumergido en un recipiente donde el mismo va a estar sostenido con una malla y un peso muerto, para que a medida que se

vaya inflando por el hidrógeno, el peso muerto y la malla no permita que salga a flote el balón.

El procedimiento es simple en el recipiente se coloca una cierta cantidad de agua, con un balón desinflado y el soporte que va a mantener al mismo dentro del agua todo el tiempo, este volumen ya tendrá una medida exacta proporcionada por el recipiente. El volumen de este recipiente posteriormente ya ha sido comprobado, con una probeta que tiene medidas volumétricas confiables. La comprobación es sencilla solo se coloca agua en la medida de la probeta y se vierte en el recipiente y se comprueba que la medida marque lo mismo, esto se hace cada 1000 ml o un litro.

El volumen que ocupan todos estos implementos será medido, para poder diferenciar después con el volumen que ocupa el hidrógeno dentro del balón, el gas ocupa un volumen en un determinado tiempo, el recipiente puede medir cada 500 ml, estos datos contribuyen a calcular un caudal para ser comparados, con los otros métodos de cuantificación de gas. Para la toma de datos se ha creado una tabla de recolección de datos que se muestra en el anexo 10, que ayuda a comprender mejor la cuantificación del hidrógeno.

El esquema de este método se presenta en la figura 36, mencionando cada elemento que se ha usado para la toma de datos, sus componentes son los siguientes:

1. Fuente conmutada.
2. Cables de poder.
3. Electrolizador (salida de hidrógeno)
4. Manguera.
5. Balón y sistema de sumergido.
6. Recipiente medidor de volumen.



Figura 35: Esquema de medición por diferencias volumétricas.

***Método de cuantificación de gases por llenado de probeta.*** Este método es similar al anterior, pero con la diferencia que ya no se utiliza un balón para medir la cantidad de volumen, sino una probeta de medición volumétrica. El método consta de una probeta que está llena de agua, que va a estar en posición contraria con un recipiente con agua, esto hace que el agua que este dentro de la probeta no se salga por la presión ejercida por el agua del recipiente, entonces se coloca la salida de gas dentro de la probeta en la parte superior para que a medida que vaya fluyendo el gas producido por el electrolizador, empuja el agua permitiendo tener una cantidad de hidrógeno dentro de la probeta y poder medir su volumen.

Es importante dejar que se igualen las presiones, como la probeta tiene un volumen de medición de 2000 ml los primeros 1000 ml serán para que se iguale la presión de salida del gas, y la presión del agua no absorba el electrólito que se encuentra dentro del generador, ya que el generador se encuentra sellado, y se trabaja con la presión que es generada por la producción de gas hidrógeno. Los otros 1000 ml ya sirven para tomar el dato de cuánto tiempo se demora en llenarse el volumen mencionado, este procedimiento se realiza cinco veces logrando tener los datos necesario para el análisis.

Por lo tanto, en este método también se realiza una tabla para comparar datos, esto se refleja en el anexo 11.

El esquema de este método se presenta en la figura 37, demostrando cada elemento que se ha usado para la toma de datos, sus componentes son los siguientes:

1. Fuente conmutada.
2. Cables de poder.
3. Electrolizador (salida de hidrógeno)
4. Manguera.
5. Recipiente con agua.
6. Probeta de medición volumétrica.

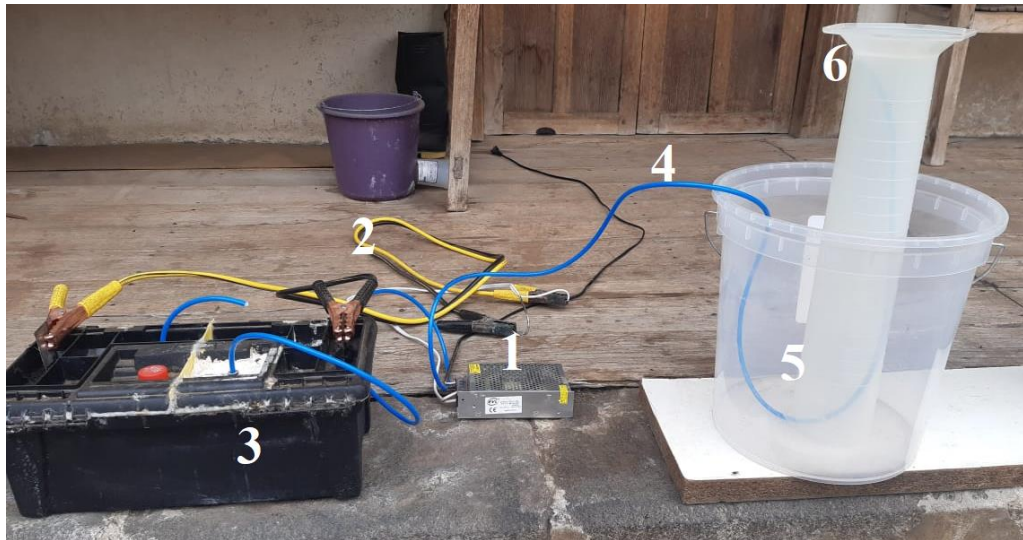


Figura 36: Esquema de medición por probeta volumétrica.

***Método de cuantificación de gases con caudalímetro.*** Con este método se podría determinar el caudal usando un caudalímetro digital para medición de gases que mide el flujo de masa, este aparato de medición puede medir caudales máxicos desde  $0.2\text{gr}/\text{cm}^3$ . Por motivos económicos no se pudo aplicar este método en el presente proyecto, pero se muestra en la figura 38 un modelo de caudalímetro digital.





Figura 37: Caudalímetro digital [21]

## CAPÍTULO III

### 3. Construcción del prototipo.

El diseño original del electrolizador conserva una conexión en serie donde en un solo compartimiento se encuentran los electrodos positivos y negativos, obteniendo una mezcla de oxihidrógeno resultante de la electrólisis. Mientras que el prototipo por motivo de cuantificar la cantidad de hidrógeno producido se separa en dos compartimientos, uno con el electrodo positivo que genera el oxígeno y otro con el electrodo negativo que genera el hidrógeno, ambos gases producidos están casi puros.

#### 3.1. Preparación del recipiente para el electrolizador.

El recipiente alternativo es una caja de herramientas que ya tiene una construcción determinada donde va a albergar el líquido para la electrólisis y las placas de acero inoxidable.

Como primer paso es el sellado completo de orificios por donde se pueda escapar los gases producidos. Para esto se utiliza silicón y cianoacrilato con bicarbonato para tener un sellado hermético y resistente del recipiente.

El sellado se logra con piezas diseñadas acorde a los orificios como se muestra en la figura 39, y estas partes están impresas en 3D facilitando el sellado.



Figura 38: Colocación de tapas impresas en 3D.

Para que el sellado sea completo se implementó un pegamento de cianoacrilato con bicarbonato como se muestra en la figura 40, y posterior a esto se coloca en la parte superior de las tapas silicón negro como se muestra en la figura 41.



Figura 39: Implementación de pegamento especial con bicarbonato en tapas 3D.



Figura 40: Colocación de silicón negro en sima de tapas 3D.

### **3.2. Preparación de celdas de acero inoxidable AISI 304.**

Para la preparación de las celdas se dimensiona la plancha de metal para cortar con una cizalla como se ve en la figura 42, posterior a este paso de igual manera se dimensiona la plancha para contar cada celda como se ve en la figura 43.



Figura 41: Corte de plancha de acero Inox AISI 304.



Figura 42: Corte de celdas de acero Inox AISI 304.

Como las celdas al ser cortadas con cizalla no se pierde las dimensiones, pero por el mismo esfuerzo que hace al prensar el material se dobla por lo que necesita ser enderezado, para esto se lo realiza golpeando el material para que quede recto como se ve en la figura 44.



Figura 43: Enderezado de celdas de acero Inox AISI 304.

Posterior a esto también es necesario esmerilar los filos de las celdas para evitar accidentes y para que puedan ser colocadas en el soporte para evitar que se peguen y se muevan en el electrolizador, esto se representa en la figura 45.



Figura 44: Esmerilado de celda de acero Inox AISI 304

### 3.3. Construcción del electrolizador.

Como ya se preparó previamente el recipiente y las celtas, la construcción del electrolizador es simple solo se coloca las celdas en las bases que están impresas en 3D como se ve en la figura 46, y se arman de manera que las placas no se topen entre sí y tengan la separación correcta, también se colocan los soportes como se ve en la figura 47.



Figura 45: Bases y soportes para placas.



Figura 46: Celdas armadas con soportes.

Una vez armadas las placas se colocan dentro del recipiente, como se ve en la figura 48, se deben colocar la entrada de agua y la salida de gas, esto se lo realiza con una tapa de una botella para alimentación de líquido, y para la salida de los gases se coloca un acople rápido de 1/4, esto se lo verifica en la figura 49.



Figura 47: Recipiente listo para pruebas.



Figura 48: Colocación de entrada de agua y acople rápido.

Con el recipiente casi listo se realizan las primeras pruebas antes de sellar por completo, se llega a determinar que el material de las separaciones de las placas no resiste al electrólito, porque se desintegra y se rompe fácilmente. Otro aspecto que se toma en cuenta en la experimentación, que son demasiadas placas ocasionando que el voltaje sea muy pequeño en cada celda, mientras tanto que el amperaje si se mantiene constante al utilizar una conexión en serie, pero como se usa una fuente conmutada de 12 voltios y 8.5 amperios para los primeros ensayos, se nota que es necesario reducir el número de placas y buscar otra alternativa para que las placas no se topen. La principal razón es que las placas funcionan como neutras generando una cantidad diminuta de gas. Precisamente como el prototipo se usa para la experimentación y controlar estas variables se hace una adaptación, se sueldan las placas con una separación de 2 cm en positivas y 2 cm en

negativas, este proceso se puede verificar en la figura 50, dando como resultado una manera hermética de que las placas no se topen, y poder realizar una nueva experimentación.



Figura 49: Elaboración de placas y soldadura

En la figura 50 se muestran los separadores que tienen la función de mantener a una sola distancia todas las placas para tener una mejor extracción de gas.

Al seguir experimentando con la fuente se llega a determinar que se puede variar el voltaje para determinar, cuanta cantidad de voltaje se puede repartir a cada placa para que efectúe la separación de las partículas, pero al momento de implementar una fuente que se puede variar el voltaje, al ser esta de un amperaje muy bajo resulta que se sobrecalienta, y no abastece para la experimentación.

Es por esta razón que se utiliza solo una fuente conmutada que transforma el voltaje alterno en continuo dando 12 voltios y 8.5 amperios consumibles. Con los cálculos usados en la fase de diseño, se llega a determinar que no depende tanto del voltaje que es suministrado sino, más bien del amperaje, ya que el mismo es el principal factor para que se efectúe de mejor manera la electrólisis. Entonces se llega a determinar que se necesita una fuente con amperaje más alto para que el flujo de voltaje sea más intenso y se puede realizar la separación de gases de una manera más rápida, pero esto también provoca que se sobrecalienten las placas, es por esta razón que solo se trabaja con la fuente conmutada ya mencionada.



Como el objetivo de este proyecto es determinar la cantidad de hidrógeno, se hace una nueva adaptación al prototipo, se separan las celtas en compartimientos diferentes una para la celda positiva y otra para la celda negativa, con el objetivo de poder cuantificar solo la cantidad de hidrógeno y ya no una mezcla de oxígeno e hidrógeno. Entonces para separar los electrodos, se cortan una cierta cantidad de placas positivas y una cierta cantidad de placas negativas, y haciendo una separación intermedia con un puente electrolítico, entonces esto provoca que los gases producidos por la electrólisis, ya no se mezclen y cada uno salga por distintos conductos. En la figura 51 se puede observar la nueva configuración.

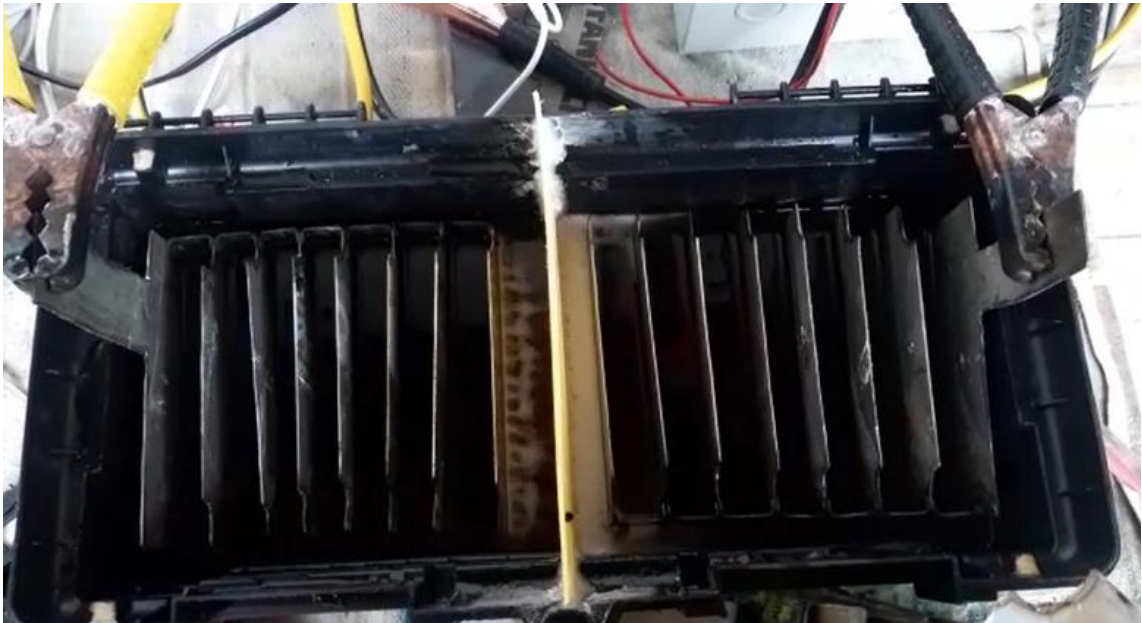


Figura 50: Experimentación con electrodos separados.

La nueva configuración es simple las celdas están separadas, pero con el puente electrolítico está por debajo, hay una abertura que conecta las dos celdas en la parte inferior, pero como está lleno el electrolito hasta la parte superior, es imposible que los gases se mezclen. Como se puede observar en la figura 51, se nota claramente que solo 2 placas son funcionales, esto se debe a que el resto de placas son neutras, y no tiene una secuencia positiva y negativa para que cada placa, pueda extraer oxígeno e hidrógeno. Por lo tanto, para el cálculo de la cantidad de hidrógeno se hace tomando algunas consideraciones.

Como ya está casi listo el electrolizador se procede a sellar por completo, para esto primero se coloca una capa de silicona en la parte interior del borde, después se coloca una capa de pegamento súper fuerte (cianoacrilato) con bicarbonato de sodio en la parte exterior por último se coloca silicón en la parte de los electrodos que sobresalen para realizar las conexiones. Esto se puede verificar en el anexo 1.

### **3.4. Preparación del electrólito.**

Para la preparación del electrólito se utiliza un recipiente aparte, donde primero se coloca 6 litros de agua destilada, después la sosa caustica o hidróxido de sodio, se usa para la experimentación 250 gramos (NaOH). Una vez colocado el compuesto se homogeniza hasta disolver todo y quede ya el electrólito listo para ser colocado dentro del electrolizador. Esto se lo realiza con un embudo para facilitar el ingreso del electrólito.

Anteriormente a manera de experimentación se utiliza una cantidad de 5 litros de agua destilada, y una cantidad de 500 gramos de sosa caustica (hidróxido de sodio), el problema que se pudo presenciar es que, al momento de homogenizar los compuestos, la reacción química genera demasiado calor, por esto se debe tener cuidado al momento de manipular, es por esta razón que usa menos sosa caustica y más agua. La conductividad iónica no se vio afectada por lo que se realiza la experimentación normalmente.

### **3.5. Experimentación.**

Con el prototipo terminado se entra a fase de experimentación, por lo tanto, para cuantificar el hidrógeno producido, se utiliza el método de cuantificación de gases numérico, el método de cuantificación de gases por diferencias volumétricas y el método de cuantificación de gases por llenado de probeta. Las condiciones utilizadas para la experimentación son las siguientes:

Primera condición es el voltaje y el amperaje utilizado como se puede observar en el anexo 2. El voltaje que se encuentra dentro de los electrodos es de 8.32 voltios y el amperaje es de 11.29 amperios.

Segunda condición es que el número de placas son 8 positivas y 8 negativas en total 16, siendo las cuales solo trabaja el área de una placa, ya que como se puede observar en la figura 51 solo trabaja una placa por celda las demás son neutras.

Tercera condición es el volumen efectivo de la placa la cual está comprendida con las mediciones de 14 cm de ancho y 10 cm de alto, pero tiene unas cejas en la parte superior esto se puede verificar en el anexo 3, para no complicar mucho el cálculo del volumen se utiliza un software de diseño para determinar el mismo, entonces nos da un volumen efectivo de  $13.64292 \text{ cm}^3$ , pero a este volumen se le debe restar un pequeño volumen de la parte superior, ya que no toda la placa está sumergida en el electrólito, se debe restar un volumen de 4 mm de altura al cual corresponde de  $0.40219 \text{ cm}^3$ , por lo tanto el volumen real que se utiliza para la experimentación de cuanto hidrógeno se puede conseguir es de  $13.24073 \text{ cm}^3$ . Esto se puede verificar en el anexo 4.

Cuarta condición es la cantidad de agua destilada que son 6 litros. mezclada con 250 gramos de hidróxido de sodio o sosa caustica.

Quinta condición pertenece a la cañería de salida de gases que es de diámetro de 1/4 y su material es de poliuretano. A continuación, se realiza cada método de medición.

### 3.6. Costos.

Los costos del proyecto están basados principalmente en la construcción del prototipo, para esto se usa los materiales netamente necesarios, tratando de economizar en algunos aspectos de la construcción. El costo usado para el prototipo se expresa en la tabla 19.

Tabla 17: Costos.

Material	Cantidad	Costo unitario	Conto total
Plancha de acero inoxidable 304	1	130 \$	130 \$
Caja de herramientas	1	7.15 \$	7.15 \$
Acople recto de 6 mm x 1/4	2	1.08 \$	2.16 \$

Material	Cantidad	Costo unitario	Conto total
Manguera de poliuretano	3 metros	0.75 \$	2.25 \$
Silicón negro	1	3.50 \$	3.50 \$
Pegamento extra fuerte (cianoacrilato)	20	0.50 \$	10 \$
Bicarbonato de sodio	2	1.50 \$	3 \$
Agua destilada	11 litros	1.50 \$	16.50 \$
Sosa caustica (hidróxido de sodio)	3 kilogramos	3.33 \$	10 \$
Fuente conmutada de 12 voltios a 8.5 amperios	1	18\$	18\$
Cables para baterías de auto	1	7.50\$	7.50\$
Cable gemelo #12	2 metros	1.20\$	2.40 \$
Cable toma corriente	1	2.40 \$	2.40 \$
Recipiente	1	8 \$	8 \$
Mano de obra	-	150 \$	150 \$
Transporte y otros gastos	-	30 \$	30 \$
Total			402.86 \$

### 3.6.1. Método de cuantificación de gases numérico.

Para este punto es necesario identificar las variables necesarias para el cálculo respectivo, esto se puede verificar en el capítulo dos. Como el prototipo está construido con la disposición de celdas en serie, se utiliza este método de cálculo.

Por lo tanto, el electrolizador del prototipo está constituido por 16 placas las cuales, por la configuración del mismo, 14 placas son neutras entonces solo se toman en cuenta 2 placas, y dos de estas son positivas, y las otras dos son negativas.

Se utiliza una fuente conmutada que arroja 12 voltios y 8.5 amperios, pero como la disposición de las placas es en serie, el voltaje se divide para cada placa, el voltaje que trabaja es de 8.36 voltios y el amperaje por motivo de que consume la capacidad máxima de la fuente conmutada arroja un amperaje mayor que es de 11.29 amperios, esto se puede verificar en el anexo 2.

Como el circuito está en serie se aplica la ley de Ohm y se determina que el amperaje se conserva. Por lo tanto, se tendrá en cada placa o celda 11.29 amperios.

El número de Faraday corresponde a la cantidad de electricidad por mol de electrones de un elemento, y se utiliza la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\# \text{ de Faraday} = \frac{11.29 \text{ Amp} * 60\text{seg}}{96500 \text{ Amp} * \text{seg coulomb}}$$

$$\# \text{ de Faraday} = 0.007019689$$

Como siguiente paso se calcula el equivalente químico del oxígeno que tiene como masa atómica 15.99 gr y la valencia de 2 entonces se utiliza la ecuación 4:

$$\text{Equivalente químico} = \frac{15.99 \text{ gr}}{2}$$

$$\text{Equivalente químico} = 7.995 \text{ gr}$$

Continuando se tiene que calcular el peso de productos con ayuda de la ecuación 5 que se presenta a continuación:

$$\text{Peso de productos } (O_2) = 0.007019689 * 7.995 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de productos } (O_2) = 0.05612 \frac{\text{gr}}{\text{min}}$$

Como definición una mol de gas equivale a 22.4lt por lo tanto se calcula las 0.5 moles de oxígeno en la ecuación 6:

$$\frac{22.4\text{lt}}{1\text{mol } O_2} * 0.5 \text{ moles de } O_2 = 11.2 \text{ moles de } O_2$$

Por medio de balanceo estequiométrico se necesita conseguir el oxígeno que se produce en gas, por lo tanto, se utiliza la ecuación 7:

X: es, una constante que se toma para el oxígeno sabiendo que 1 mol de oxígeno equivale a 22.4 litros de gas oxígeno, por lo tanto, se calcula con la ecuación 8:

$$X = \frac{\frac{22.4\text{lt}}{2}}{7.995 \text{ gr}}$$

$$X = 1.4008755 \frac{\text{lt}}{\text{gr}}$$

$$\text{gas producido } O_2 = \frac{1.4008755 \frac{\text{lt}}{\text{gr}} * 0.056122 \frac{\text{gr}}{\text{min}}}{2}$$

$$\text{gas producido } O_2 = 0.03931 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

Para el hidrógeno como es una relación de 2 a 1 para calcular el gas producido de H<sub>2</sub> es necesario solo multiplicar por dos el gas producido de oxígeno, con la ecuación 9:

$$\text{gas producido } H_2 = 0.03931 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * 2$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0.07862 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

$$\text{gas producido } H_2 = 0.07862 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1\text{lt}} = 78.62 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

El gas producido totalmente (H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>) por cada celda se determina sumando el hidrógeno producido más el oxígeno producido y se obtiene lo siguiente con la ecuación 10:

$$\text{gas producido total} = 0.07862 \frac{\text{lt}}{\text{min}} + 0.03931 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

$$\text{gas producido total} = 0.11793 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

El análisis concluye con la producción total del electrolizador, ya que los cálculos realizados están propuestos para un minuto y para cada celda, por lo tanto, para poder encontrar la producción total el gas producido total se debe multiplicar por el número de placas de la siguiente manera con la ecuación 11.

$$\text{producción total} = 0.23586 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

En unidades de caudal se presenta en la ecuación 12:

$$\text{producción total} = 0.23586 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ lt}}$$

$$\text{producción total} = 235.86 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Adicional al cálculo anterior se puede calcular la potencia del prototipo con la ecuación 13.

$$P = I * V \quad \text{ecuación (13)}$$

Donde:

*P*: es, la potencia se expresa en vatios (watts).

*I*: es, la intensidad se expresa en amperios (Amp).

*V*: es, el voltaje se expresa en voltios (V).

Por lo tanto, se calcula la potencia con los valores utilizados para el electrolizador.

$$P = 11.29 \text{ Amp} * 8.36 \text{ V}$$

$$P = 94.38 \text{ watts}$$

Complementando los cálculos se procede a determinar la masa de hidrógeno producida por el método número, la ecuación 14 expresa lo siguiente.

$$\rho = \frac{m}{Vol} \quad \text{ecuación (13)}$$

Donde:

$\rho$ : es, la densidad y sus unidades ( $\text{kg/m}^3$ ), pero para conveniencia del cálculo se expresa en ( $\text{gr/cm}^3$ ).

$m$ : es, la masa que se mide en gramos (gr)

$Vol$ : es, el volumen que se mide en ( $\text{cm}^3$ )

En este caso para obtener el volumen se usa la fórmula del caudal que se expresa en la ecuación 16.

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad \text{ecuación (16)}$$

Donde:

$Q$ : es, el caudal y sus unidades se expresan en ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ).

$Vol$ : es, el volumen que se mide en ( $\text{cm}^3$ ).

$t$ : es, el tiempo que se expresa en minutos (min).

Entonces se procede a utilizar el caudal que se obtiene con la ecuación 9, para calcular el volumen.

$$Vol = Q * t$$

$$Vol = 78.62 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} * 1 \text{ min}$$

$$Vol = 78.62 \text{ cm}^3$$



Por lo tanto, usando la ecuación 13, se calcula la masa de hidrógeno sabiendo que la densidad del mismo es  $8.99 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ .

$$m = \rho * Vol$$

$$m = 0.00899 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1000 \text{ gr}}{1 \text{ kg}} * \frac{(1\text{m})^3}{(100 \text{ cm})^3} * 78.62 \text{ cm}^3$$

$$m = 0.000706 \text{ gr}$$

Elaboración propia con base en García [18], con el método de calcular el oxyhidrógeno que es desprendido en un reactor.

### 3.6.2. Método de cuantificación por diferencia volumétrica

Este método es aplicado como se explica en el capítulo dos, y los resultados obtenidos se representan en la tabla 20.

Tabla 18: Recolección de datos por diferencias volumétricas.

Volumen inicial (lt)	Volumen con gas (lt)	Diferencia de volúmenes (lt)	Diferencia de volúmenes (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (min)	Potencia (watts)	Caudal es (cm <sup>3</sup> /min)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)
10	10.5	0.5	500	02.45	94.38	204.081	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$1.83 \cdot 10^{-3}$
10	10.5	0.5	500	03.46	94.38	144.508	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
10	10.5	0.5	500	03.01	94.38	166.112	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
10	10.5	0.5	500	04.50	94.38	111.111	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$9.99 \cdot 10^{-4}$
10	10.5	0.5	500	07.32	94.38	68.306	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$6.14 \cdot 10^{-4}$
Promedio						138.82	$8.99 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$

Este método presenta grandes variaciones esto se debe a los implementos utilizados no son los adecuados, el sistema de sumergimiento que mantiene el balón inmerso dentro del agua se usó rocas, esto provoca una pequeña variación en el volumen de agua por la absorción natural de las mismas. La aguja que se usa para inflar el balón fue defectuosa y permitió que el agua ingrese dentro de la misma obstaculizando el flujo de gas. El balón usado presenta problemas de contención del gas liberándolo y provocando alteraciones en

las mediciones. Por estos motivos el caudal presenta cambios bruscos y su promedio es 138.82 cm<sup>3</sup>/min.

### 3.6.3. Método de cuantificación por llenado de probeta.

Este método se utiliza al igual que el anterior el flujo constante de gas que provee el electrolizador, se usa llenando la probeta de llenado completamente con agua, y esta va a estar estancada por otro recipiente con agua, mientras el gas siga saliendo, el agua seguirá siendo empujada permitiendo medir el volumen en la probeta, la probeta tiene un volumen de 2000 ml, los primeros 1000 ml son usados para que se iguale las presiones de flujo de gas, que viene directo desde el electrolizador, los otros 1000 ml ya vendrían a ser usados para medir el tiempo en que se demora en llenar dicho volumen. Los resultados obtenidos se representan en la tabla 21.

Tabla 19: Recolección de datos usando llenado de probeta.

Volumen inicial (ml)	Volumen con gas (ml)	Diferencia de volúmenes (ml)	Diferencia de volúmenes (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (min)	Potencia (watts)	Caudal es (cm <sup>3</sup> /min)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)
1000	2000	1000	1000	2.26	94.38	442.477	8.99*10 <sup>-6</sup>	3.98*10 <sup>-3</sup>
1000	2000	1000	1000	2.42	94.38	413.223	8.99*10 <sup>-6</sup>	3.71*10 <sup>-3</sup>
1000	2000	1000	1000	2.36	94.38	423.728	8.99*10 <sup>-6</sup>	3.8*10 <sup>-3</sup>
1000	2000	1000	1000	2.21	94.38	452.488	8.99*10 <sup>-6</sup>	4.1*10 <sup>-3</sup>
1000	2000	1000	1000	2.38	94.38	420.168	8.99*10 <sup>-6</sup>	3.78*10 <sup>-3</sup>
Promedio						430.42	8.99*10 <sup>-6</sup>	3.87*10 <sup>-3</sup>

Los datos obtenidos representan una variación de tiempos aceptable, entonces esto se puede interpretar de la siguiente manera, el generador de hidrógeno con un voltaje de 120 voltios de corriente alterna tomada desde la red eléctrica, es transformada por la fuente conmutada a un voltaje de 12 voltios en corriente continua, con una salida de intensidad de corriente de 11.26 amperios, estos valores son llevados hasta el generador, lo cual por el número de placas que son 16, ocho positivas (ánodo) y ocho negativas (cátodo), por su conexión en serie se distribuye el voltaje, teniendo un voltaje en cada placa de 8.36 voltios como se puede verificar en la figura 47. Internamente en el generador está el electrólito que es una mezcla de H<sub>2</sub>O con NaOH, permitiendo el flujo de corriente eléctrica, y

produciendo la separación de gases en el ánodo el oxígeno y en el cátodo el hidrógeno. Este hidrógeno producido en un volumen constante de 1000 ml, da como resultado un caudal promedio de  $\pm 430.42 \text{ cm}^3/\text{min}$ , y una masa promedio de 0.00387 gr.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES.

- El prototipo no está basado en el diseño original por el motivo de cuantificar la cantidad de hidrógeno producido, es por esto que las celdas fueron separadas en dos compartimientos, uno positivo (ánodo) que extrae el oxígeno y otro negativo (cátodo) que extrae el hidrógeno. El diseño original tiene las celdas positivas y negativas unidas en un mismo recipiente con placas neutras en la mitad, para se le logre obtener una mejor extracción la conductividad iónica del electrolito debe ser excelente.
- La mejor alternativa de producción de hidrógeno son los electrolizadores tipo PEM por su configuración y fácil construcción, como es el caso se puede utilizar otro tipo de electrodos no necesariamente los electrodos poliméricos. La principal razón por la que no se utiliza estos electrodos en construcción del prototipo, es por dichos electrodos son de materiales de difícil acceso y son de un valor económico elevado, por este motivo se usa electrodos de acero inoxidable AISI 304 en la construcción del prototipo.
- El método de cuantificación de hidrógeno numérico da como resultado un volumen de hidrógeno  $78.62 \text{ cm}^3/\text{min}$ , este resultado se obtiene solo con la intensidad introducida por la fuente conmutada de 11.29 amperios, sin tomar en cuenta las variables que se pueden controlar como el voltaje, área de contacto del electrodo, cantidad de electrolito, proporciones del compuesto del electrolito. Por lo tanto, este método de cuantificar el gas producido no es viable.
- El método de cuantificación de hidrógeno por diferencias volumétricas, da como resultado un caudal de  $138.82 \text{ cm}^3/\text{min}$ , utilizando un volumen constante de 500 ml, se llega a determinar que las mediciones tomadas de tiempo tienden a variar demasiado, por factores de configuración del mismo método y del extractor. Por lo tanto, este método de cuantificar el gas producido no es viable.
- El método de cuantificación de gas por llenado de probeta volumétrica, da como resultado un caudal de  $430.42 \text{ cm}^3/\text{min}$  de hidrógeno utilizando un volumen de 1000 ml constante, y una masa promedio de 0.00387 gr con un margen de error

pequeño en comparación a los otros métodos. Por lo tanto, este método de cuantificación es viable para la configuración del prototipo.

- Para producir esta cantidad de hidrógeno mencionada, se utiliza un voltaje de 8.32 voltios y un amperaje de 11.29 amperios, 250 gr de sosa caustica disuelta en 6000 ml de agua destilada y un volumen de contacto de electrodo en la placa de  $13.24073 \text{ cm}^3$ .

## **5. RECOMENDACIONES.**

- Sería conveniente realizar la celda PEM con iridio y platino, para que se mejore la producción de hidrógeno en el electrolizador.
- Para mejorar la eficiencia de producción de hidrógeno, se podría realizar la construcción del prototipo usando una celda seca en vez de una celda húmeda como es el caso de este proyecto.
- Si se construye el prototipo con celda húmeda, es recomendable usar 2 baterías de vehículos conectadas en serie, para que la extracción del hidrógeno sea en un volumen mayor, se debe tener cuidado de sellar el recipiente con materiales y pegamento que resista el calor, porque parte de la energía que se libera en la electrolisis podría genera un aumento de temperatura en los electrodos.
- Para el electrolito se podría utilizar una mezcla de agua destilada con hidróxido de potasio, para poder aumentar la conductividad iónica del electrolito y poder comparar cual genera un mejor desempeño en la producción de gas, ya que en el presente proyecto solo se utilizó hidróxido de sodio.
- Convendría construir el prototipo sin separar las celdas para poder hacerlo funcional, pero se necesitaría un purificador de gas, un resta llama y una perilla para regular la velocidad de salida del gas, para evitar accidentes al momento de quemar el combustible.
- Al utilizar la medición de gas, con el método de diferencias volumétricas, sería recomendable usar un recipiente con escala de volumen más exacta, materiales que no absorban la humedad como contrapeso, una boya especial con su respectivo

sistema de llenado de gas para evitar filtraciones y atascos en el llenado del hidrógeno y poder realizar mejor las medidas.

- Para tener una mayor precisión en el corte del material para los electrodos, se recomienda utilizar una guillotina para poder conservar las medidas tomadas inicialmente, porque si se utiliza una herramienta de corte como la amoladora se pueden perder las medidas originales y desperdiciar material.
- Cuando se manipule el pegamento súper fuerte se recomienda utilizar mascarilla, porque este pegamento al mezclarse con el bicarbonato de sodio, genera un gas tóxico que puede causar daños a la integridad de la persona.
- Al momento de mezclar el agua destilada con la sosa caústica es recomendable utilizar un recipiente que resista altas temperaturas, porque al mezclar estos químicos libera calor por la energía de la reacción, y este depende de la cantidad de sosa caústica se mezcla, por esta razón se debe mezclar por partes en intervalos de tiempo prolongados.
- Para mayor eficiencia en la extracción del hidrógeno se recomienda que las placas estén soldadas, por que brinda una mayor estabilidad y confiabilidad a los electrodos de tener la distancia correcta y no sufrir fallos por contacto.
- Es recomendable que se verifique que el electrolizador este completamente sellado, para que las mediciones de la cantidad de gas producido sea la más exacta posible y no presente fallos.

## **6. BIBLIOGRAFÍA.**

- [1] O. Reyes y R. Trujillo, "Generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por medio de electrólisis" (Tesis de pregrado), Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, 2016.
- [2] J. C. López, "Alimentación de un motor monocilíndrico con hidrógeno obtenido a través de la electrólisis del agua", (Tesis de pregrado), Facultad de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador, 2018.

- [3] D. A. Pineda, "Evaluación técnico económica de una planta de producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua utilizando energía eléctrica producida con celdas fotovoltaicas de alta eficiencia", Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2009.
- [4] A. B. Martínez, "Desarrollo de un sistema de generación de hidrógeno acoplado al tratamiento electroquímico de aguas superficiales utilizando energía solar", (Tesis de Maestría), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2013.
- [5] J. D. Velásquez y J.F. Quiceno, "Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis", Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2012.
- [6] M.R. Reta. *Estudio experimental de la química inorgánica: hidrógeno y halógeno*. 1ra ed. Posadas: EdUNaM- Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones, 2009.
- [7] M. Aguer y A. L. Miranda. *El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado*. 2da Edición. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2012.
- [8] J. I. Vermeersch, "Diseño y construcción de una celda demostrativa para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua", (Tesis de pregrado), Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile, 2018.
- [9] K. Chang y J. Overby. *Química*. 13va Edición. México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. 2021.
- [10] S. Montecinos y D. Carvajal. *Energías renovables: escenario actual y perspectivas futuras*. 1ra Edición. La Serena: Editorial Universidad de la Serena, 2018.
- [11] C. Fúnez Guerra y L. Reyes-Bozo. *El hidrógeno como vector energético*. 1era Edición. Santiago: Centro de Comunicación de las Ciencias, 2019.
- [12] W. S. Guerrero y M.A. Pesantes, "Optimización de la Producción de Energía de un

- Celda tipo PEM", (Tesis de pregrado), Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [13] R. Vásquez, F. Salinas. *Tecnologías del Hidrógeno y perspectivas para Chile*. 1ra Edición. Santiago: Internationale Zusammenarbeit, 2018, p. 135.
- [14] A. Rodríguez. *Tecnología del hidrógeno y pilas de combustible*. 1ra Edición. Madrid: Editorial ELERNING S.L., 2019
- [15] J. N. Pesántes y J. V. Tacuri, "Adaptación de un generador de hidrógeno tipo celda seca en un motor endotérmico 150cc de 4 tiempos como fuente alternativa de combustible", (Tesis de pregrado), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2021.
- [16] C. G. Morales, "Análisis de los circuitos eléctricos" para 5to año Electricidad, Escuela Técnica RAGGIO, Buenos Aires, 2021.
- [17] G. N. Quiñonez. (2022, Enero 20). Leyes de Faraday (1ra ed) [Online]. Available: [https://aprendizaje.mec.edu.py/dw-recursos/system/materiales\\_academicos/materiales/000/002/951/original/QU%C3%8DMICA\\_3%C2%B0\\_CURSO-PLAN\\_COM%C3%9AN.pdf](https://aprendizaje.mec.edu.py/dw-recursos/system/materiales_academicos/materiales/000/002/951/original/QU%C3%8DMICA_3%C2%B0_CURSO-PLAN_COM%C3%9AN.pdf)
- [18] J. A. García, "Diseño y construcción de un electrolizador de agua para obtención de oxihidrógeno como combustible," (Tesis de pregrado), Instituto Politécnico Nacional, Azcapotzalco, México, 2013.
- [19] Catálogo 2020. Productos de Acero, DIPAC, Manta Ecuador. pp. 198–201.
- [20] C. E. Núñez. (2022, Enero 20). Notas sobre el hidróxido de sodio (1ra ed) [Online]. Available: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/50-notassonreelhidrxidodesodio.pdf>.



## 7. ANEXOS.

Anexo 1.- En este nexo se presenta el electrolizador o extractor de hidrógeno totalmente sellado y listo para realizar la experimentación correspondiente.



Anexo 1: Prototipo de Extractor de hidrógeno.

Anexo 2.- Multímetro digital marca Data Hold, modelo DT850L. Instrumento de medida utilizado para medir voltaje y amperaje del prototipo en funcionamiento.



Anexo 2: Voltaje y amperaje utilizados en la experimentación.

Anexo 3.- Recipiente donde se mezcla el hidróxido de sodio o sosa caustica con el agua destilada.



Anexo 3: Recipiente de mezclado de la sosa caustica y agua destilada.

Anexo 4.- Volumen real de la placa de contacto con el electrólito dentro del extractor de hidrógeno, este volumen varía según el nivel del electrólito.

Sistema de coordenadas: predeterminado

Densidad = 0.01 gramos por milímetro cúbico

Masa = 109.14 gramos

Volumen = 13642.92 milímetros cúbicos

Área de superficie = 27757.26 milímetros cuadrados

Centro de masa: ( milímetros )

X = 0.00  
Y = -1.19  
Z = 0.50

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: ( gramos \* milímet  
Medido desde el centro de masa.

lx = ( 1.00, 0.00, 0.00)	Px = 87295.77
ly = ( 0.00, 1.00, 0.00)	Py = 172253.79
lz = ( 0.00, 0.00, 1.00)	Pz = 259531.37

Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de r

Lxx = 87295.77	Lxy = 0.00	Lxz = 0.00
Lyx = 0.00	Lyy = 172253.79	Lyz = 0.00
Lzx = 0.00	Lzy = 0.00	Lzz = 259531.37

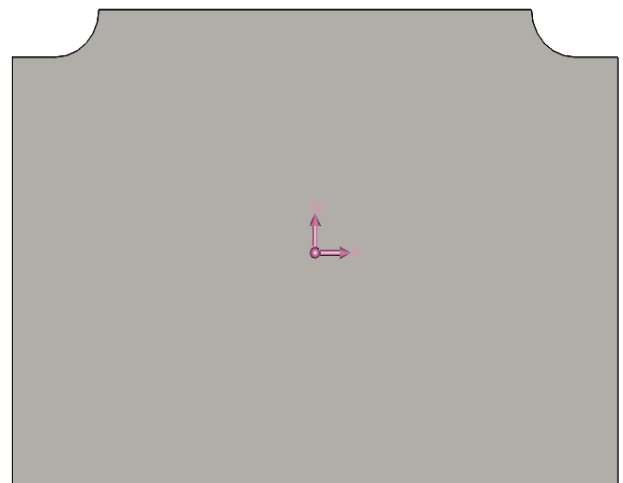
Momentos de inercia: ( gramos \* milímetros cuadrados )

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

lxx = 87476.71	lxy = 0.00	lzx = 0.00
lyx = 0.00	lyy = 172281.07	lyz = -64.75
lzx = 0.00	lzy = -64.75	lzz = 259685.02

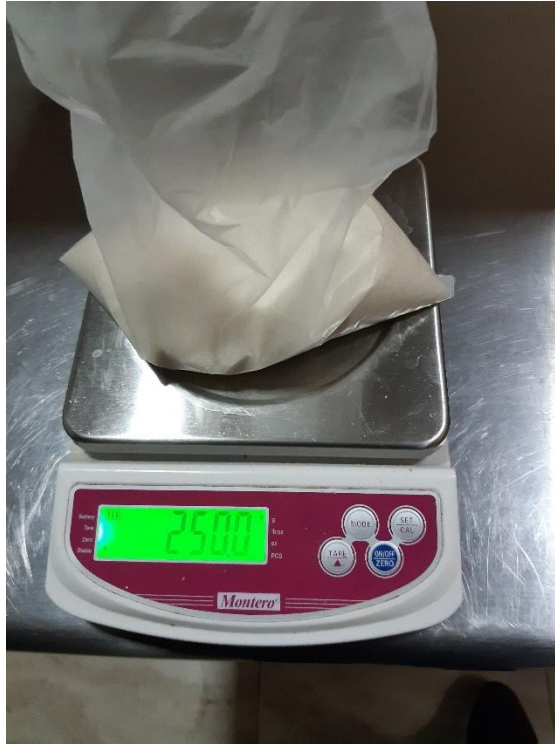
< >

Ayuda Imprimir... Copiar al portapapeles



Anexo 4: Volumen de la placa que se encuentra en el interior del electrolizador.

Anexo 5.- Medición en balanza digital de la cantidad de sosa caustica para posterior a esto ser mezclada con el agua destilada.



Anexo 5: Pesado de sosa caustica.

Anexo 6.- Experimentación en el método de diferencias volumétricas.



Anexo 6: Experimentación método de diferencia volumétrica.

Anexo 7.- Estos tiempos son los tomados en la experimentación del método de diferencias volumétricas, tomados desde un cronometro digital en el teléfono celular.

07 : 23 . 70		
Vuelta	Tiempos parciales	Tiempo total
03	04:50.68	05:59.17
02	00:41.45	01:08.49
01	00:27.04	00:27.04
Vuelta	Tiempos parciales	Tiempo total
03	03:01.55	10:53.64
02	03:46.38	07:52.09
01	04:05.71	04:05.71

Anexo 7: Tiempos que se toman del método de diferencias volumétricas.

Anexo 8.- Experimentación con el método de llenado de probeta.



Anexo 8: Experimentación método de llenado de probeta.

Anexo 9.- Estos tiempos son los tomados en la experimentación del método de llenado de probeta, tomados desde un cronometro digital en el teléfono celular.

Vuelta	Tiempos parciales	Tiempo total
01	02:36.92	02:36.92
03	04:50.68	05:59.17
01	02:42.57	02:42.57
01	02:21.99	02:21.99
01	02:38.12	02:38.12

Anexo 9: Tiempos tomados con método de llenado de probeta.

Anexo 10.- Tabla de recolección de datos para el método de diferencias volumétricas.

Volumen inicial (lt)	Volumen con gas (lt)	Diferencia de volúmenes (lt)	Diferencia de volúmenes (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (min)	Potencia (watts)	Caudal es (cm <sup>3</sup> /min)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)
Promedio								

Anexo 10: Tabla de recolección de datos para método de diferencias volumétricas.

Anexo 11: tabla de recolección de datos para el método llenado de probeta.

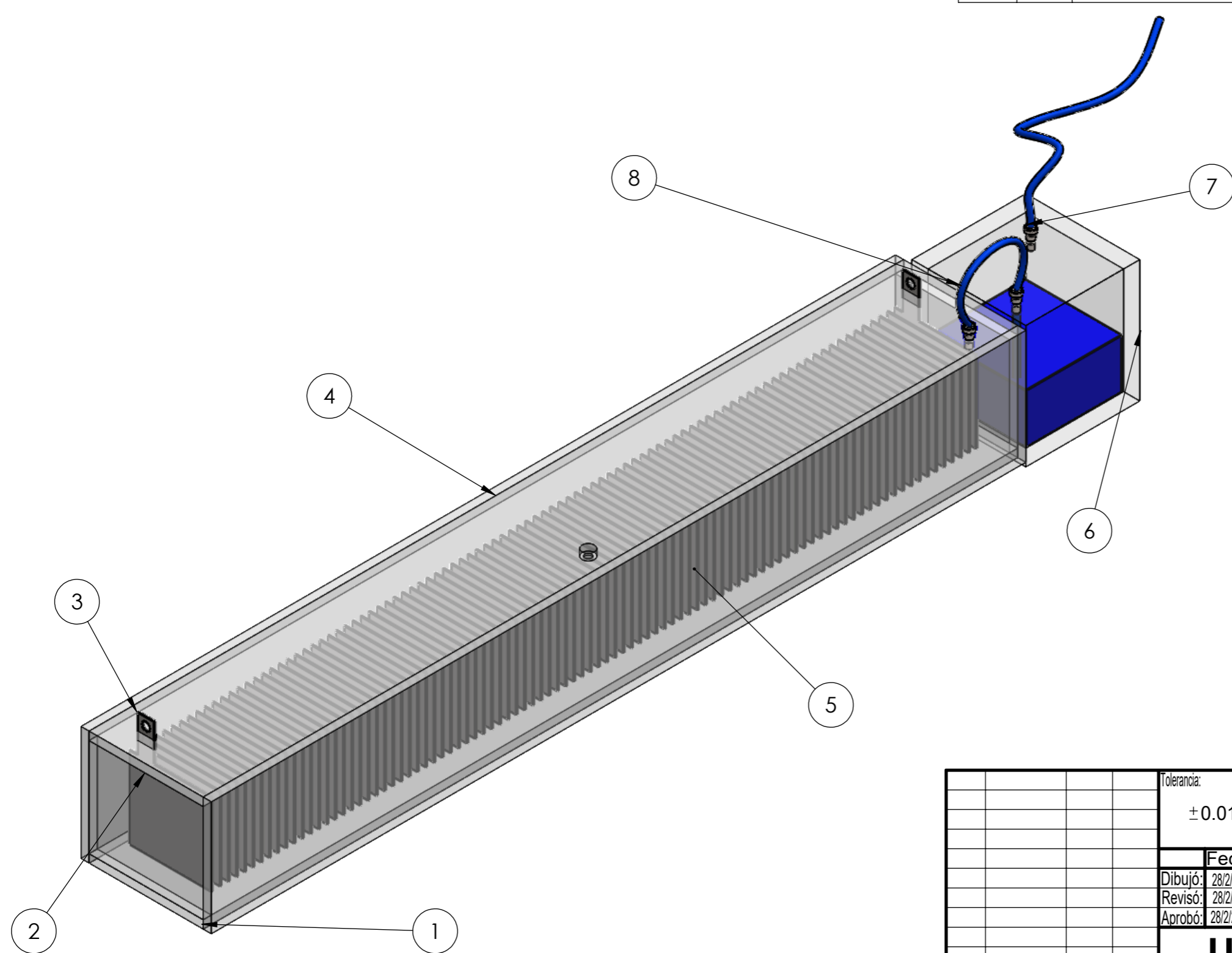
Volumen inicial (ml)	Volumen con gas (ml)	Diferencia de volúmenes (ml)	Diferencia de volúmenes (cm <sup>3</sup> )	Tiempo (min)	Potencia (watts)	Caudal es (cm <sup>3</sup> /min)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)
Promedio								

Anexo 11: Tabla de medición de datos para método de llenado de probeta.

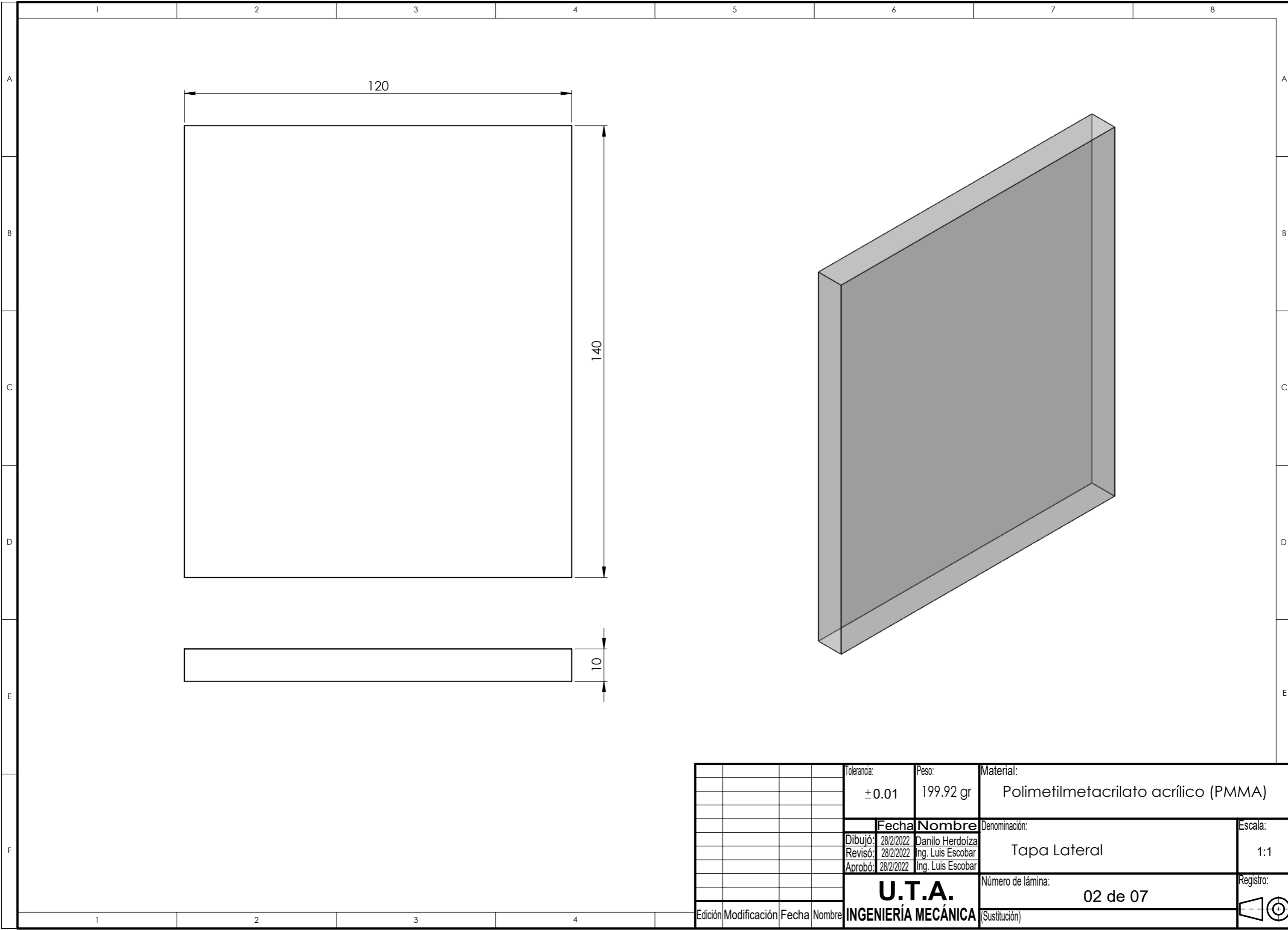
Anexo 10.- Planos del modelo real del extractor de hidrógeno.

No. de orden	Ni. de pieza	Denominación	No. de norma o dibujo	Observaciones
1	3	TAPA LATERAL LARGA	Acrílico	Mecanizado
2	2	Tapa Lateral	Acrílico	Mecanizado
3	2	ELECTRODO PRINCIPAL	AISI 304	Mecanizado
4	1	Tapa Superior	Acrílico	Mecanizado
5	88	ELECTRODO NEUTRO	AISI 304	Mecanizado
6	1	Purificador	Acrílico	Mecanizado
7	3	Acoples rapidos	1/2 in	Adquirido
8	3	Manguera	1/2 in	Adquirido

No. de orden	Característica técnica	Magnitud
1	Volumen de electrolito	1.41 m <sup>3</sup>
2	Amperaje de entrada	45 Ah
3	Voltaje de entrada	24 V
4	Potencia	1080 watts
5	Peso	16.82 Kg
6	Caudal de producción	470.43 cm <sup>3</sup> /min

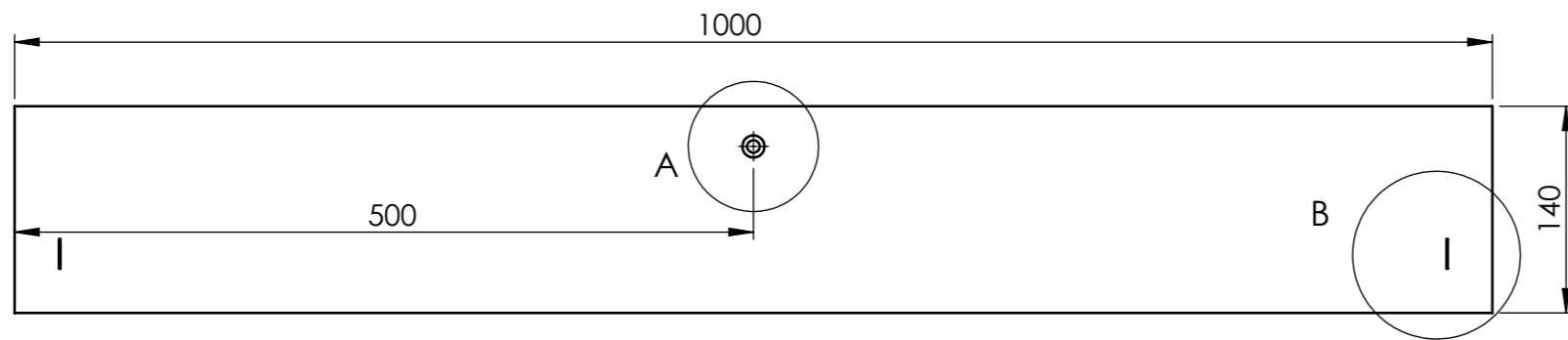


Tolerancia:	±0.01	Peso:	16862.23 gr	Material:	Varios	
Fecha:	28/2/2022	Nombre:	Daniilo Herdoíza	Denominación:	Ensamblaje	
Dibujó:	28/2/2022	Revisó:	Ing. Luis Escobar	Escala:	1:4	
Revisó:	28/2/2022	Aprobó:	Ing. Luis Escobar	Número de lámina:	01 de 07	
Aprobó:	28/2/2022	<b>U.T.A.</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>		Registro:		
Edición	Modificación			Fecha	Nombre	(Sustitución)

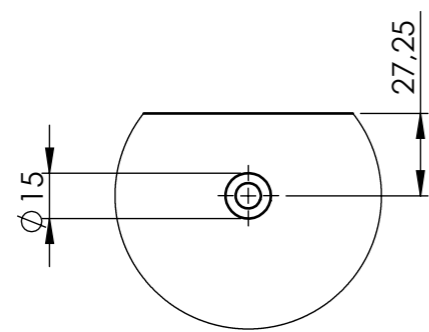
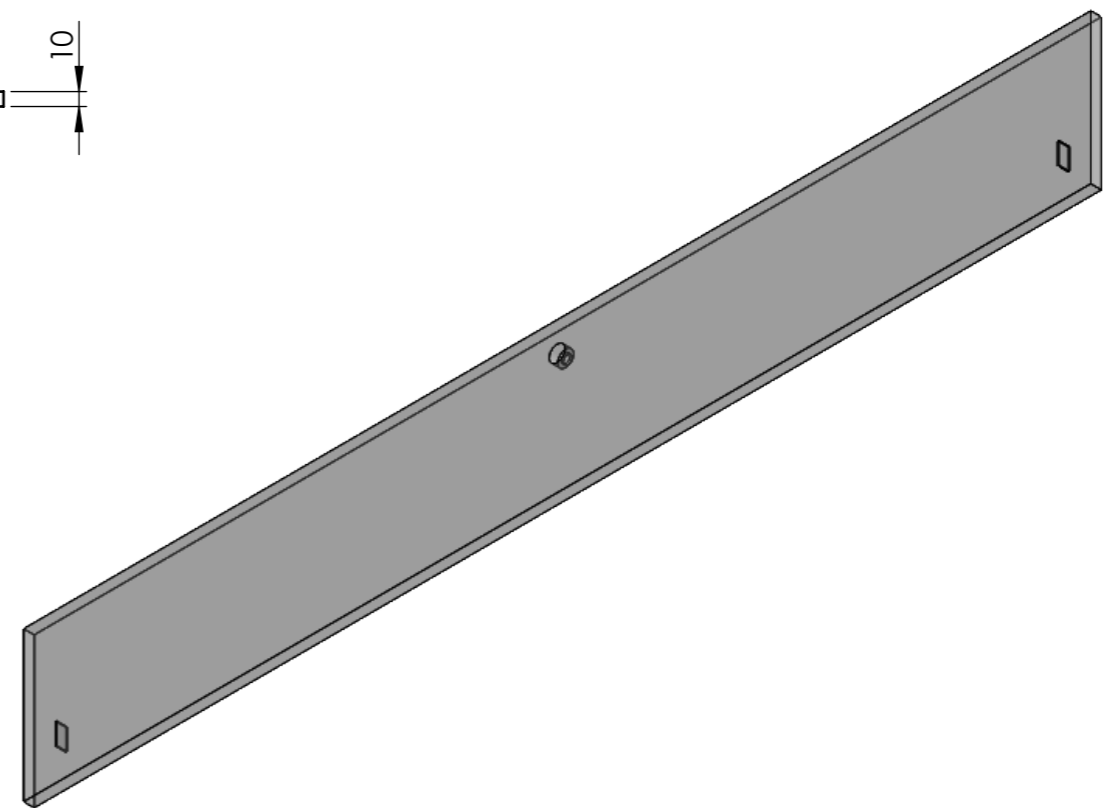
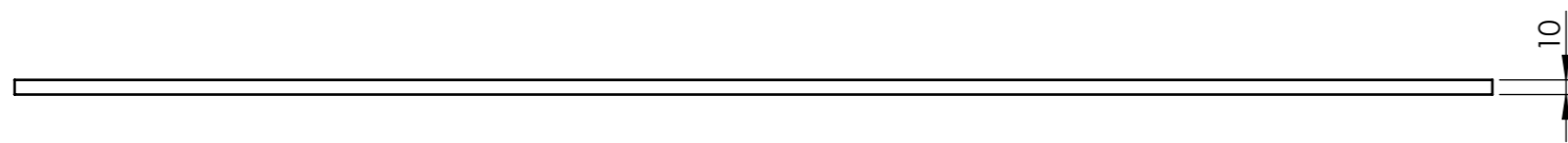


Tolerancia:		Peso:		Material:	
±0.01		199.92 gr		Polimetilmetacrilato acrílico (PMMA)	
		<b>Fecha</b>		<b>Nombre</b>	
Dibujó:		28/2/2022		Danilo Herdoíza	
Revisó:		28/2/2022		Ing. Luis Escobar	
Aprobó:		28/2/2022		Ing. Luis Escobar	
<b>U.T.A.</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Denominación:	
				Tapa Lateral	
				Escala:	
				1:1	
				Número de lámina:	
				02 de 07	
Edición				Registro:	
Modificación					
Fecha					
Nombre					

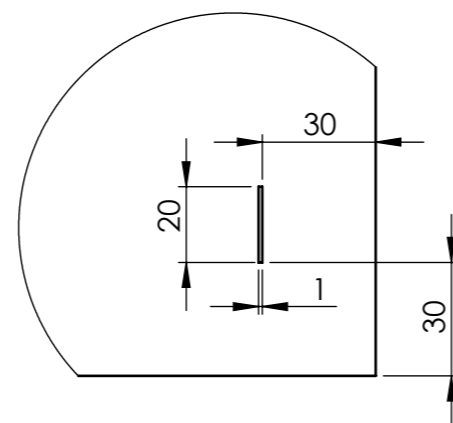




Nota:  
Corte con sierra

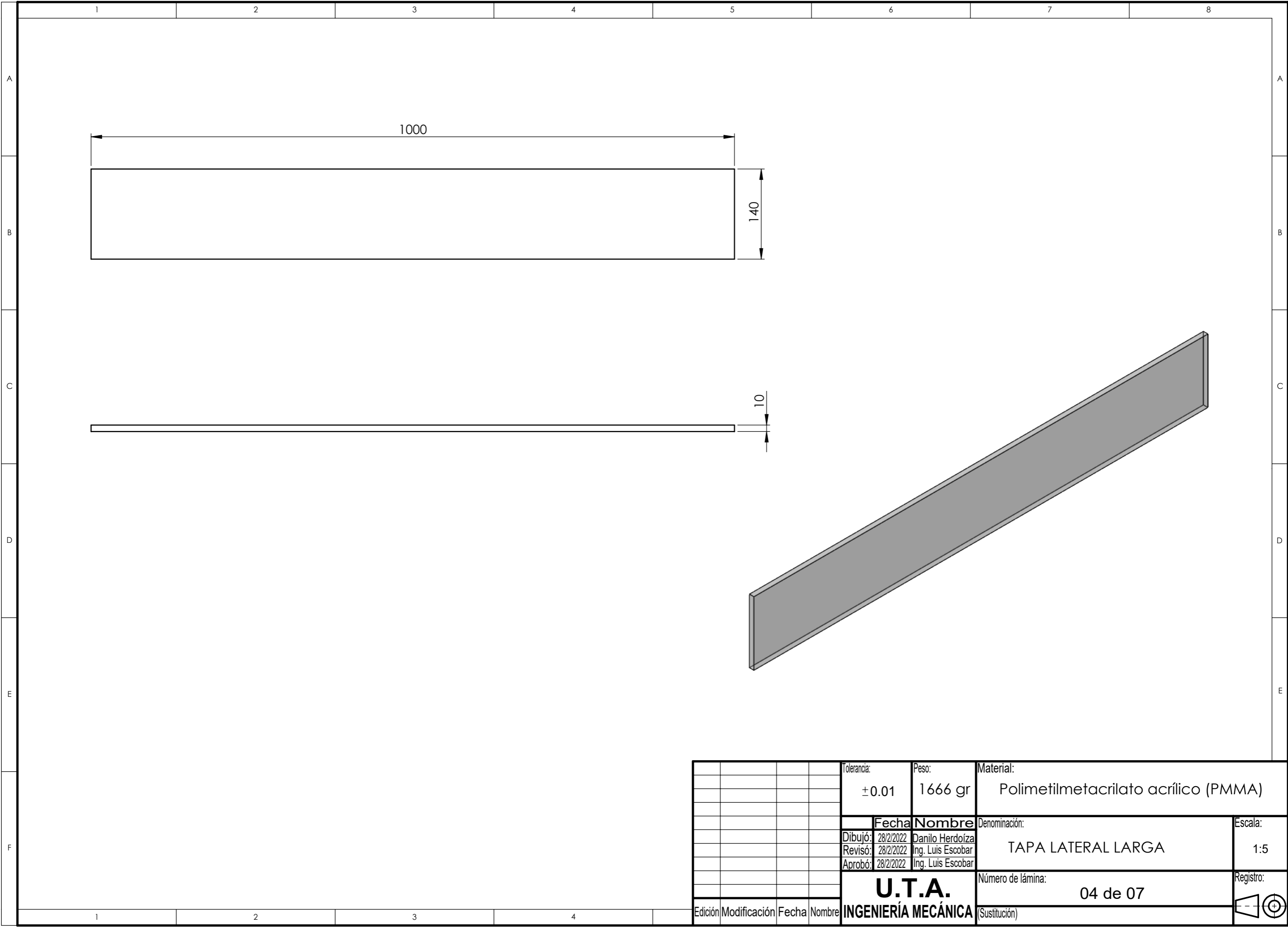


DETALLE A  
ESCALA 2 : 5  
Nota:  
Taladrado con broca

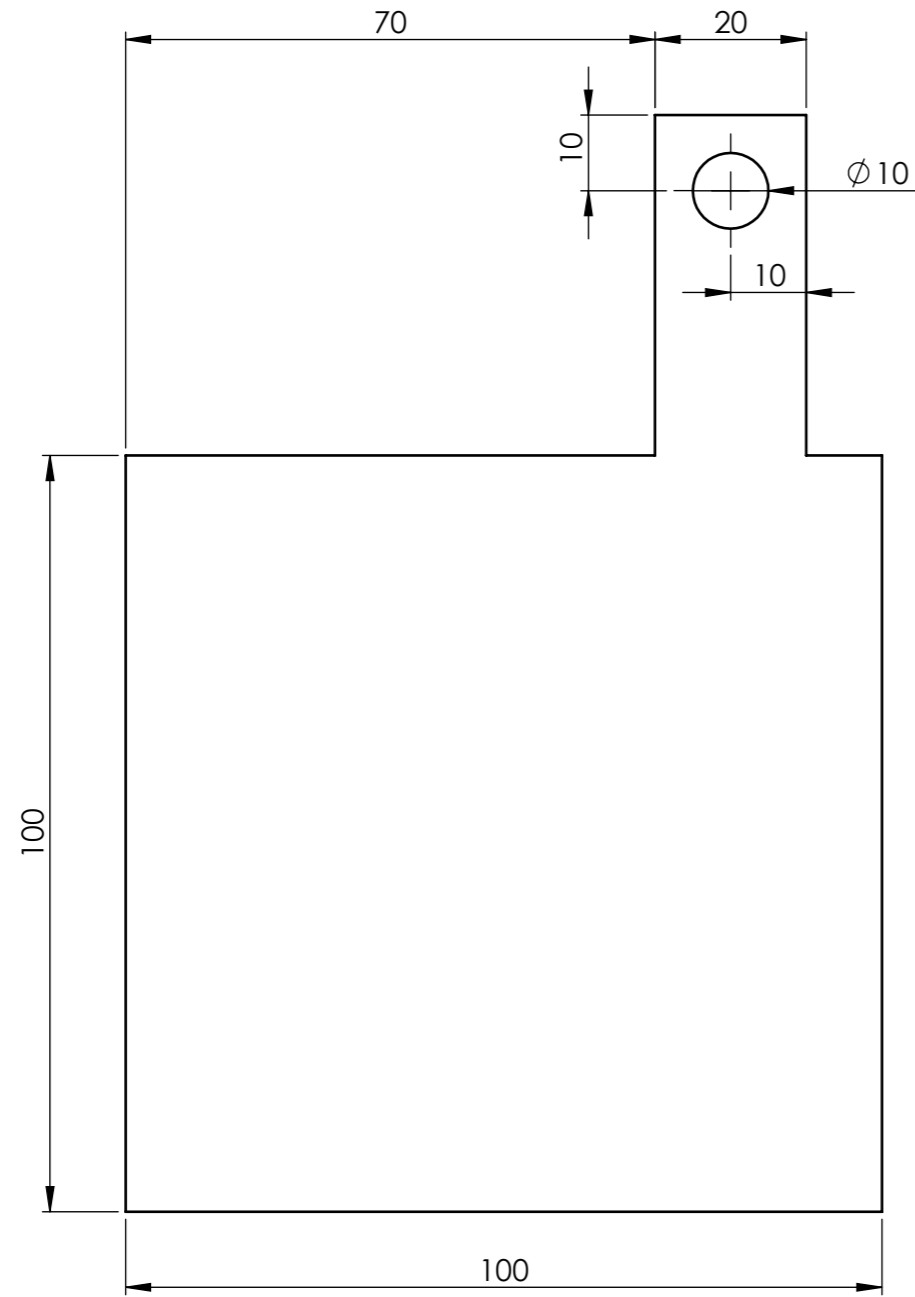


DETALLE B  
ESCALA 1 : 2  
Nota:  
Corte laser

Tolerancia:		Peso:		Material:	
±0.01		1663.71gr		Polimetilmetacrilato acrílico (PMMA)	
Fecha		Nombre		Denominación:	
Dibujó: 28/2/2022		Danilo Herdoíza		Tapa Superior	
Revisó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		Escala:	
Aprobó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		1:5	
<b>U.T.A.</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Número de lámina:	
				03 de 07	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Registro:	

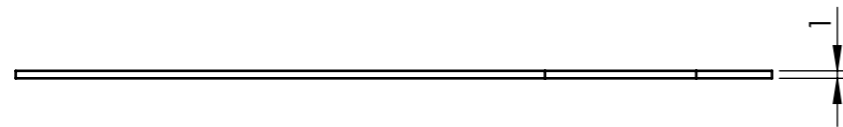
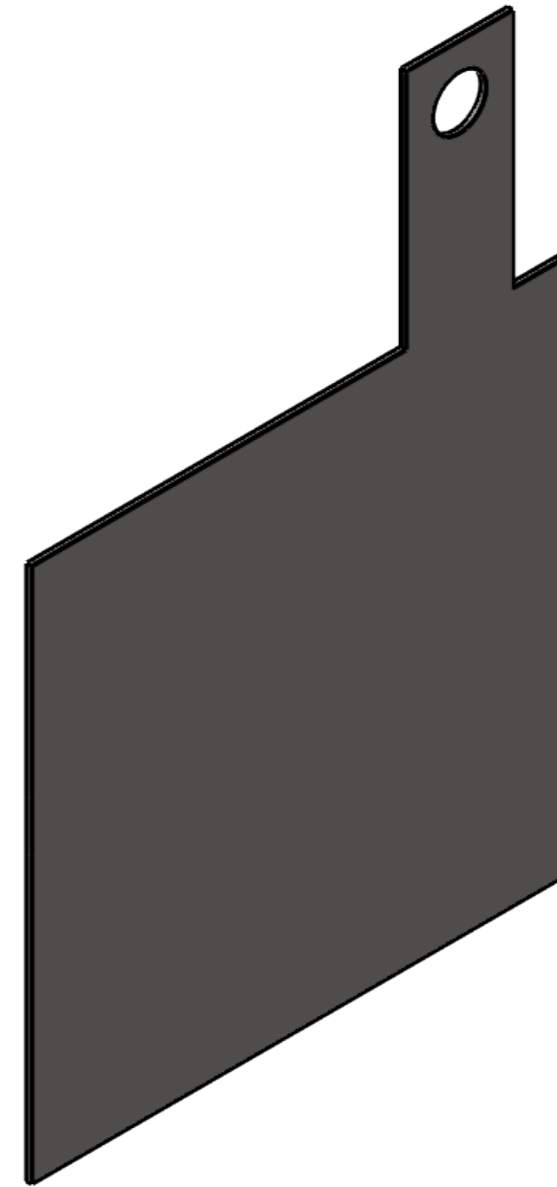


Tolerancia:		Peso:		Material:	
±0.01		1666 gr		Polimetilmetacrilato acrílico (PMMA)	
Fecha		Nombre		Denominación:	
Dibujó: 28/2/2022		Danilo Herdoíza		TAPA LATERAL LARGA	
Revisó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		Escala:	
Aprobó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		1:5	
U.T.A.		Número de lámina:		Registro:	
INGENIERÍA MECÁNICA		04 de 07			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	(Sustitución)	

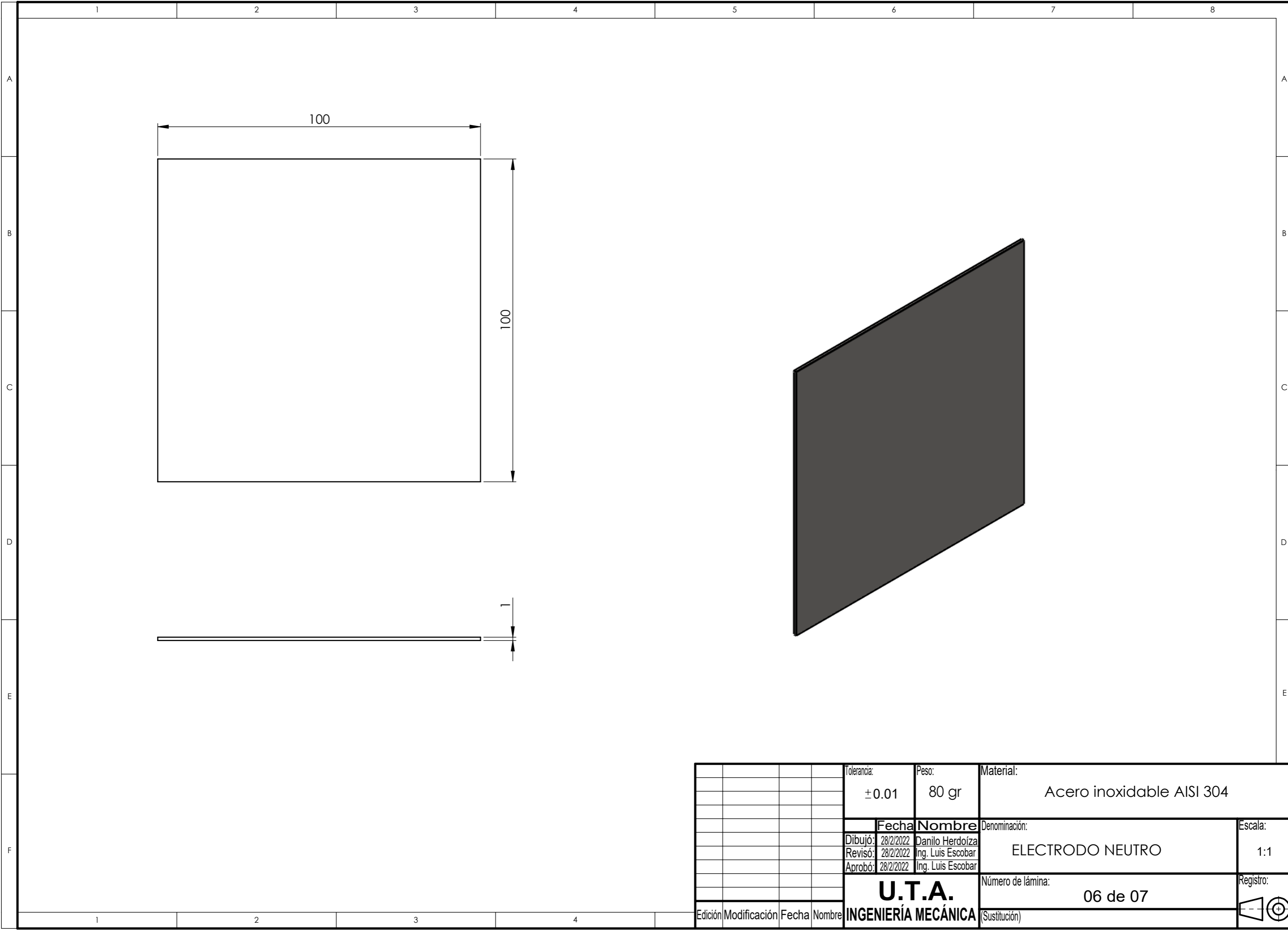


Nota:  
Taladrado con broca

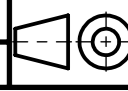
Nota:  
Corte con cizalla

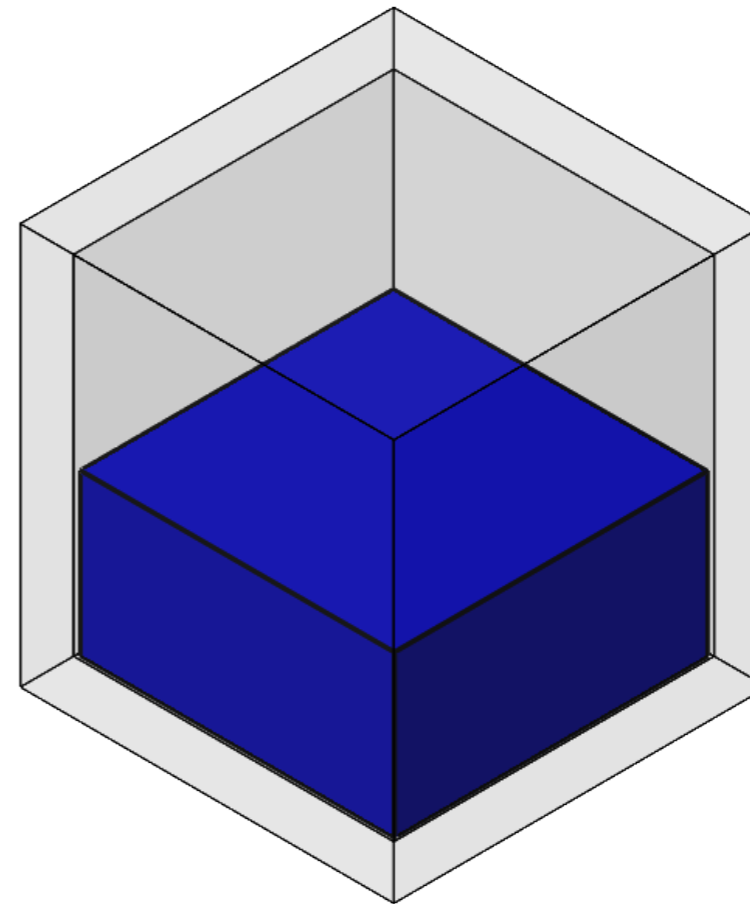
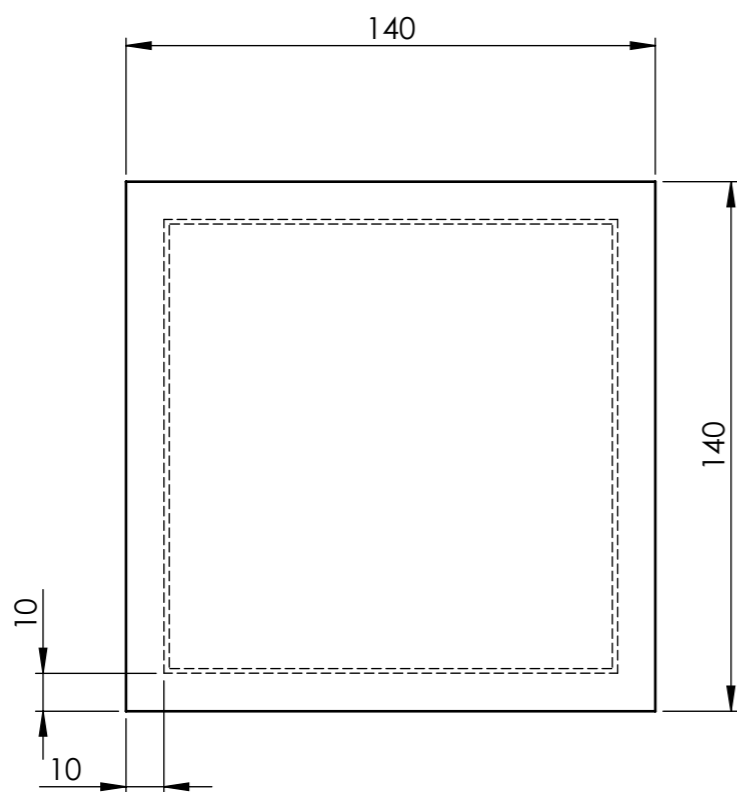
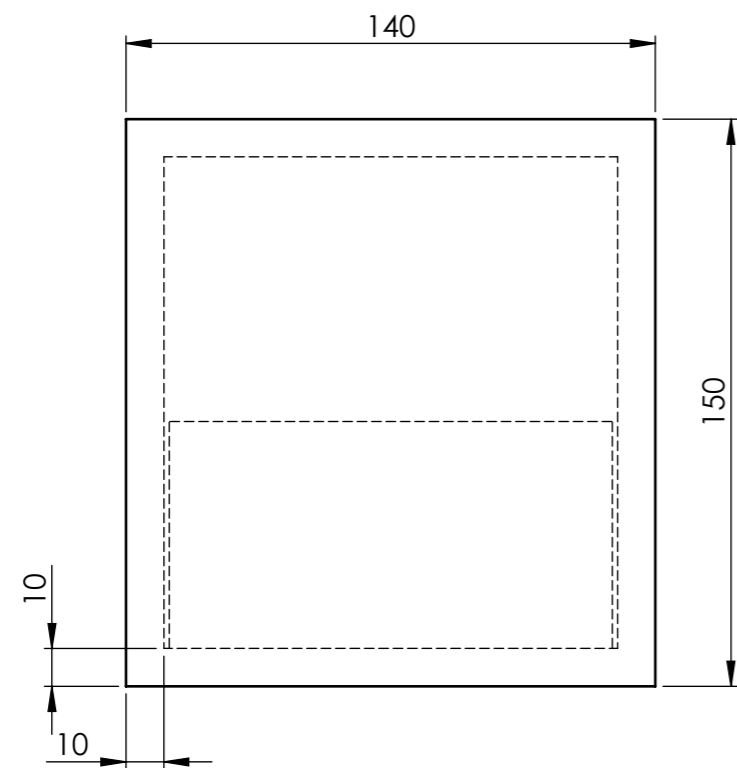


Tolerancia:		Peso:		Material:	
±0.01		86.57 gr		Acero inoxidable AISI 304	
Fecha		Nombre		Denominación:	
Dibujó: 28/2/2022		Danilo Herdoíza		ELECTRODO PRINCIPAL	
Revisó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		Escala:	
Aprobó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		1:1	
<b>U.T.A.</b> <b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>				Número de lámina:	
				05 de 07	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Registro:	



				Tolerancia:	Peso:	Material:	
				± 0.01	80 gr	Acero inoxidable AISI 304	
					<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	Denominación:
				Dibujó:	28/2/2022	Danilo Herdoíza	ELECTRODO NEUTRO
				Revisó:	28/2/2022	Ing. Luis Escobar	
				Aprobó:	28/2/2022	Ing. Luis Escobar	
				<b>U.T.A.</b>			Número de lámina:
							INGENIERÍA MECÁNICA
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				Registro:
							(Sustitución)





				Tolerancia: ±0.01	Peso: 2254.64 gr	Material: Polimetilmetacrilato acrílico (PMMA)		
						Fecha Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 28/2/2022		Daniilo Herdoíza	Purificador	1:2
				Revisó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		
				Aprobó: 28/2/2022		Ing. Luis Escobar		
				<b>U.T.A.</b> INGENIERÍA MECÁNICA		Número de lámina:	07 de 07	Registro:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)		