



Universidad
de O'Higgins

Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Diseño, fabricación y caracterización de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde a partir de energía solar fotovoltaica

Marcelo Fabian Miranda Millacoy

Profesor guía: Miguel Torres López

Comisión evaluadora: Daniel Casagrande

Enrique Ortiz

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile

Abril, 2022

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, hermana y mis más cercanos, con todo mi aprecio y valoración, por y para ellos.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mi familia, mis padres, hermana, sobrinos, por su amor y apoyo incondicional, por entregarme las herramientas valóricas para ser una persona de bien y por brindarme las herramientas necesarias para salir adelante.

Agradezco a la vida por darme la oportunidad de ser quien soy, estar donde debo estar y compartir con las personas que se crucen en mi camino.

Agradezco a cada persona que colaboro en la realización de este trabajo, especialmente a Leopoldo Fonseca, por toda la ayuda prestada desde la Fábrica Digital O'Higgins.

Agradezco también a Miguel Torres, quien hace de profesor guía y fue quien me propuso el desarrollo de este trabajo, aparte de ser profesor durante toda la carrera y también agradecer a los miembros de la comisión por su ayuda y apoyo.

Agradezco también a quienes han sido parte de este largo proceso de vida universitaria.

El trabajo realizado se enmarca dentro de los temas abordados por el Centro Chileno de Investigación en Energía Solar SERC-Chile ANID/FONDAP/15110019.

ÍNDICE

RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2.3. ALCANCES	12
2.4. LIMITACIONES	13
3. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1. HIDRÓGENO	14
3.2. ELECTRÓLISIS.....	15
3.2.1. PRINCIPIOS ENERGÉTICOS DE LA ELECTRÓLISIS	16
3.3. TIPOS DE ELECTROLIZADORES	19
3.3.1. ELECTROLIZADOR ALCALINO	19
3.3.2. ELECTROLIZADOR PEM.....	21
3.3.3. ELECTROLIZADOR SOE.....	22
3.3.4. ELECTROLIZADOR AEM	23
3.3.5. COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE ELECTROLIZADORES	24
3.4. MODELO MATEMÁTICO DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO	27
3.4.1. CURVA V-I CARACTERÍSTICA DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO	27
3.5. MODELO MATEMÁTICO DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA.....	29
4. MARCO METODOLÓGICO.....	33
4.1. DISEÑO DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.	33
4.2. CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.	33
4.3. PRUEBAS DE OPERACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.	33
4.4. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO.	34
4.5. CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DE LA OPERACIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.	34
4.6. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.	35
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA	37

5.1. DISEÑO DE LA CELDA	37
5.2. CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA ELECTROLÍTICA.....	39
6. PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS.....	41
6.1. PRUEBAS DE RENDIMIENTO DE LOS MATERIALES DISPUESTOS PARA ELECTRODOS.....	42
6.2. PRUEBAS DE RENDIMIENTO DE LA CELDA CON ELEMENTO DIVISOR DE COMPARTIMIENTOS.....	46
6.3. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	53
7. CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DEL ELECTROLIZADOR.....	56
8. ANÁLISIS TEÓRICO PARA LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	60
9. CONCLUSIÓN.....	68
9.1. TRABAJO FUTURO.....	69
10. REFERENCIAS.....	70
11. ANEXOS.....	74
11.1. ANEXO 1.....	74
11.2. ANEXO 2.....	75
11.3. ANEXO 3.....	76
11.4. ANEXO 4.....	76

Índice de figuras

Figura 1: Matriz energética primaria nacional 2019 [3].	9
Figura 2: Esquema básico de un electrolizador [11].	16
Figura 3: Circuito eléctrico análogo para la electrólisis [12].	17
Figura 4: Esquema de un electrolizador alcalino [11].	20
Figura 5: Esquema de un electrolizador alcalino en configuración monopolar [10].	21
Figura 6: Esquema de un electrolizador alcalino en configuración bipolar [10].	21
Figura 7: Esquema de un electrolizador tipo PEM [11].	22
Figura 8: Esquema de un electrolizador SOE [11].	23
Figura 9: Curva característica V-I típica para una celda de electrólisis alcalina a alta y baja temperatura [21].	29
Figura 10: Circuito equivalente de una celda fotovoltaica [23].	30
Figura 11: Diagrama de bloques de actividades.	33
Figura 12: Diseño AutoCAD de la celda de electrólisis.	38
Figura 13: Vista superior de la celda electrolítica.	39
Figura 14: Celda electrolítica.	40
Figura 15: Setup del espacio de trabajo.	41
Figura 16: Curva de rendimiento de electrodos de tamaño 50x100 mm.	43
Figura 17: Curva de rendimiento de placas de tamaño 100x100 mm.	44
Figura 18: Rendimiento general de las configuraciones de electrodo.	45
Figura 19: División de acrílico.	47
Figura 20: Curvas de rendimiento del electrolizador en presencia de una división de acrílico variando el tamaño de los electrodos.	47
Figura 21: Diafragma experimental diseñado.	49
Figura 22: Curvas de rendimiento del electrolizador en presencia de un diafragma experimental variando el tamaño de los electrodos.	49
Figura 23: Curvas de rendimiento del electrolizador con diferentes barreras variando el tamaño del electrodo.	50

Figura 24: Operación de la celda sin barrera divisora.	51
Figura 25: Operación de la celda con barrera divisora de acrílico.	52
Figura 26: Vista alterna de la operación de la celda con el uso de la división de acrílico.	52
Figura 27: Operación de la celda con diafragma experimental.	53
Figura 28: Curvas V-I dependiente de la temperatura del electrolito.....	57
Figura 29: Curvas experimentales versus modelo matemático a diferentes temperaturas.	58
Figura 30: Zoom Figura 29.....	59
Figura 31: Bloque correspondiente al panel solar en Simulink.....	61
Figura 32: Corriente generada por el panel a diferentes valores de irradiancia.	61
Figura 33: Irradiancia promedio diaria en la UOH [34].....	62
Figura 34: Resultado gráfico del ajuste de curva para la irradiancia del lugar.	63
Figura 35: Vinculación de sistema de bloques de los modelos matemáticos de la celda de electrólisis y panel solar.....	64
Figura 36: Comportamiento de la corriente del panel en función de la irradiancia para un voltaje constante.	65
Figura 37: Comportamiento eléctrico del sistema de electrólisis en presencia de energía solar fotovoltaica.	66
Figura 38: Potencia del sistema de electrólisis en presencia de energía solar fotovoltaica.	67
Figura 39: Planos de la celda en AutoCAD.....	74
Figura 40: Planos para corte en herramienta EPILOG.	75
Figura 41: Plano de corte para división de acrílico.....	76
Figura 42: Plano de corte para marco de diafragma experimental.....	76

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades del hidrógeno molecular.....	14
Tabla 2: Densidades energéticas de distintos combustibles.....	15
Tabla 3: Comparación entre los distintos tipos de electrolizador.....	24
Tabla 4: Composición de las variedades de acero disponibles [28].	42
Tabla 5: Parámetros de simulación para el panel solar.....	60

Resumen

Es imperativo para el desarrollo de la sociedad buscar nuevas fuentes energéticas que reemplacen las ya existentes que en su mayoría corresponden a fuentes en base a combustibles fósiles. Sin embargo, estas nuevas fuentes energéticas deben cumplir criterios de sustentabilidad y confiabilidad del suministro energético.

Una alternativa en este proceso de diversificación es la producción de hidrógeno verde, concepto que hace referencia a la producción de hidrógeno mediante la utilización de energías renovables como la solar, eólica, entre otras. Este concepto se instaura por su versatilidad energética, pudiendo ser aprovechado en más de un proceso, como lo pueden ser la generación de electricidad, combustión, electromovilidad, etc. Un método de producción de hidrógeno verde es la electrólisis basada en energía solar fotovoltaica.

El presente trabajo trata sobre el diseño, fabricación y caracterización de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde mediante la utilización de energía solar fotovoltaica.

El objetivo es probar distintos electrodos, ya sea el tipo de material y el tamaño. Además de realizar pruebas de una división de los compartimientos anódicos y catódicos. Esto con el fin de establecer una configuración (electrodos más división) de mejor rendimiento para caracterizar el comportamiento eléctrico de la celda y estudiar la operación de esta a partir de la energía solar fotovoltaica en un día promedio.

Los resultados muestran que la configuración de celda de electrólisis de mejor rendimiento es bajo la utilización de electrodos de níquel de 100x100 mm en conjunto con una barrera divisora de acrílico. Además, se tiene que cuando la temperatura del electrolito es baja se necesita una mayor potencia eléctrica para llevar a cabo el proceso, por el contrario, cuando se aumenta la temperatura del electrolito, la potencia eléctrica requerida es menor, obteniendo una noción del balance energético del electrolizador y como asociarlo al requerimiento de la energía solar fotovoltaica mediante una simulación computacional.

Palabras clave: hidrógeno verde, electrólisis, electrolizador alcalino, energía solar.

1. Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano y las distintas civilizaciones han resultado dependientes de una fuente energética para el desarrollo de distintas actividades, apoyándose en estas fuentes energéticas para progresar y evolucionar como sociedad. Sin embargo, esta energía en su mayoría ha provenido y proviene desde el procesamiento de los combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural, lo que provoca una serie de efectos adversos para el medioambiente [1]. Los tratamientos y usos de estos combustibles fósiles para fines energéticos corresponden a una de las tantas acciones responsables de la gran cantidad de emisiones de CO₂ al ambiente contribuyendo al efecto invernadero, siendo este el principal causante del cambio climático [2]. Contextualizando esto a nivel nacional, la dependencia de los combustibles fósiles se ve representada en la demanda energética actual nacional. Esta dependencia se puede evidenciar en la matriz energética primaria nacional correspondiente al año 2019 (la más actual a la fecha) presentada en la Figura 1, donde se puede observar que entre petróleo crudo, carbón y gas natural se alcanza un 68% de dicha matriz [3].

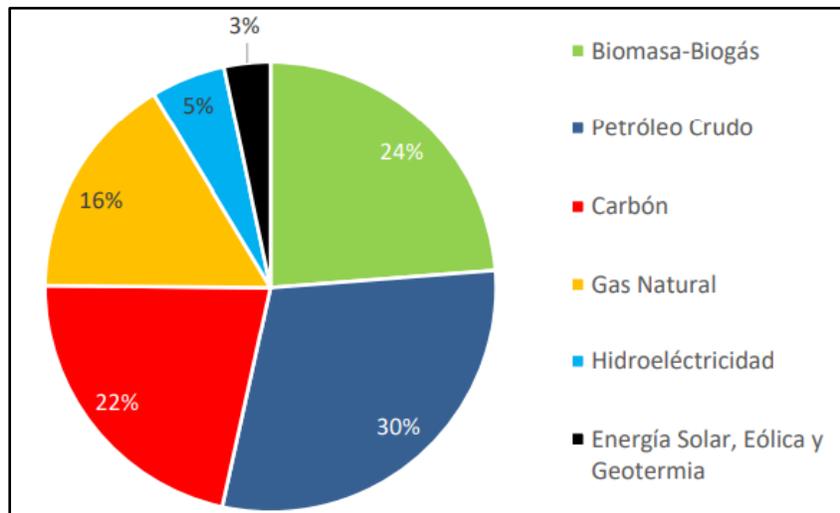


Figura 1: Matriz energética primaria nacional 2019 [3].

Del lado opuesto, gracias a los compromisos ambientales y de la mano de la política energética nacional apuntada al año 2050, es que se desea combatir el problema del cambio climático atacando esta dependencia de los combustibles fósiles mediante la diversificación del origen de suministro de las distintas fuentes energéticas, es decir, agregar fuentes energéticas

alternativas, manteniendo los estándares de sustentabilidad, viabilidad y seguridad del suministro energético [4].

En la búsqueda e investigación de nuevas fuentes de energía, el hidrógeno se presenta como una alternativa de cambio debido a sus capacidades energéticas. Esto sumado a que se puede obtener mediante distintos métodos, los que se clasifican según la materia prima a utilizar, es decir, hidrocarburos, agua, biomasa u otra, siendo los métodos más comunes el reformado con carbón, oxidación parcial, gasificación de biomasa y electrólisis. Además, se tiene que el hidrógeno producido presenta distintos usos posteriores. Por estas razones es que se instala el concepto de vector energético para el hidrógeno dado que corresponde a una fuente de energía secundaria, pero con diversas aplicaciones como lo son la electromovilidad, generación de electricidad, uso doméstico, industria, etc. Otro aspecto importante es que, dependiendo del método de producción del hidrógeno, este proceso puede ser llevado a cabo de manera limpia y amigable con el medioambiente, es decir, un proceso libre de emisiones de CO₂ [5].

Para la producción de hidrógeno se requiere de diversos procesos y subprocesos interactuando entre sí, a lo que generalmente se le conoce como planta, donde el funcionamiento e interacción de estos procesos definen y/o caracterizan la operación de la planta de producción de hidrógeno. Un buen acercamiento al funcionamiento de una planta de hidrógeno puede ser obtenido mediante el desarrollo de un prototipo a menor escala, donde se puede estudiar cómo se comporta cada variable dentro del sistema para así luego definir la operación de esta planta.

Esto motiva a que el siguiente trabajo presente una orientación general sobre la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua con la utilización de la energía solar fotovoltaico. Sin embargo, presentando un enfoque específico en la construcción y análisis del electrolizador con el objetivo de obtener características sobre requerimiento energético, producción, operación, etc., del electrolizador.

En este caso la materia prima a utilizar es el agua (H₂O), dado que el proceso para producir hidrógeno es la electrólisis del agua. Es importante mencionar que existen distintos tipos de electrolizadores actualmente, como lo son los electrolizadores de tipo alcalino, PEM (membrana

de intercambio de protones), de óxido sólido y AEM (membrana de intercambio de aniones), los que se diferencia tanto en aspectos técnicos y de funcionamiento [6].

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es el diseño, construcción, caracterización y análisis de un electrolizador alcalino para estudiar su comportamiento eléctrico en la generación de hidrógeno utilizando la energía solar fotovoltaica como suministro eléctrico al proceso.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar y fabricar un electrolizador de carácter experimental que cuente con una barrera divisora entre los compartimientos anódicos y catódicos con el fin de que no se mezclen los gases producidos.
- Efectuar diversas pruebas de rendimiento para determinar el efecto del material del electrodo, su tamaño y cómo influye una barrera divisora.
- Caracterizar el comportamiento eléctrico de la celda electrolítica mediante el modelo propuesto por el autor O. Ulleberg.
- Simular el comportamiento de la celda electrolítica utilizando la energía eléctrica producida por un panel solar en un día promedio de radiación en la zona de interés, con el fin de obtener un perfil de consumo eléctrico.

2.3. Alcances

El electrolizador a desarrollar es de carácter experimental, por lo que los alcances para este trabajo son los siguientes:

- Diseñar una celda electrolítica permeable con la finalidad de evitar fugas tanto del electrolito como de los gases producidos durante el proceso.
- Evaluar el rendimiento de la celda bajo el uso de distintos electrodos, los que se diferencian en material (acero inoxidable 304, 316 y níquel) y tamaño (50x100 mm y 100x100 mm).
- Evaluar el comportamiento de la distribución de los gases producidos (hidrógeno y oxígeno) en presencia de una barrera divisora de los compartimientos anódicos y catódicos.

- Estimar la producción de hidrógeno desde el electrolizador en condiciones de operación constantes.
- Modelar matemáticamente el comportamiento eléctrico del electrolizador desarrollado.
- Simular el comportamiento eléctrico de la celda utilizando como fuente de suministro eléctrico la energía solar fotovoltaica.

2.4. Limitaciones

Las limitaciones al trabajo son las siguientes:

- Fuente de poder con una corriente de salida máxima de 3 A teóricamente.
- Acrílico de 6 mm de espesor para la fabricación de la celda.
- Se dispone de 4 placas de níquel de 100x100 mm, 4 placas de acero inoxidable 316 de 100x100 mm, y 2 placas de acero inoxidable de 100x100 mm.

3. Marco teórico

3.1. Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante y simple del universo dado que está compuesto solo por un electrón y un protón. En la tierra específicamente, este elemento se encuentra por lo general como un compuesto, por ejemplo, con el oxígeno en proporciones estequiométricas para formar agua (H_2O), carbón y nitrógeno en otros casos. Normalmente el hidrógeno puro existe como una molécula de dos átomos de hidrógeno, es decir, H_2 . Como propiedades de este elemento se tiene que es un gas incoloro e inodoro a temperatura y presión ambiente y es el gas más ligero, siendo aproximadamente $1/14$ de la densidad del aire. Se destaca además que el H_2 al ser combustionado en presencia de oxígeno libera $1,4 \cdot 10^{-8}$ [J/kg] formando agua y sin emitir gases derivados del carbono. Otras propiedades de este elemento se detallan en la Tabla 1 [7], [8]. Además, en comparación a otros combustibles, el hidrógeno contiene más del doble de energía por peso que cualquier otro (kWh/kg), sin embargo presenta una baja densidad de energía por unidad de volumen (kWh/m³) lo que se traduce en dificultades en el almacenamiento de este elemento, esto se puede visualizar en la Tabla 2 [9].

Tabla 1: Propiedades del hidrógeno molecular.

Parámetro	Valor	Unidad
Peso molecular	$2,0159 \cdot 10^{-3}$	kg/mol
Densidad como gas (0°C, 1 atm)	0,08988	g/L
Densidad como liquido (-253°C)	70,8	g/L
Densidad como sólido (-268.95°C)	89	g/L
Punto de fusión	-259,35	°C
Punto de ebullición	-252,88	°C

Tabla 2: Densidades energéticas de distintos combustibles.

Combustible	Energía específica (kWh/kg)	Densidad de energía (kWh/m ³)
Hidrógeno líquido	33,3	2,37
Hidrógeno (200 bar)	33,3	0,53
Gas natural licuado	13,9	5,6
Gas natural (200 bar)	13,9	2,3
Petróleo	12,8	9,5
Carbón	8,2	7,6
Metanol	5,5	4,4

3.2. Electrólisis

La electrólisis se define como la separación o división de una molécula compuesta por la circulación de una corriente eléctrica continua. Con esta lógica, la descomposición del agua (H₂O) en hidrógeno (H₂) y oxígeno (O₂) se produce cuando pasa una corriente continua entre dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en una solución, separados por un electrolito acuoso o sólido no conductor eléctrico para transportar iones (H⁺ y OH⁻) y completar el circuito. El potencial eléctrico aplicado a los electrodos sumergidos en la solución debe ser mayor al ya existente en la misma (caracterizado por la energía libre presente en la masa acuosa) más las correspondientes pérdidas de activación y óhmicas para lograr la división de la molécula de agua [10]. A continuación, se presenta una figura que caracteriza el proceso.

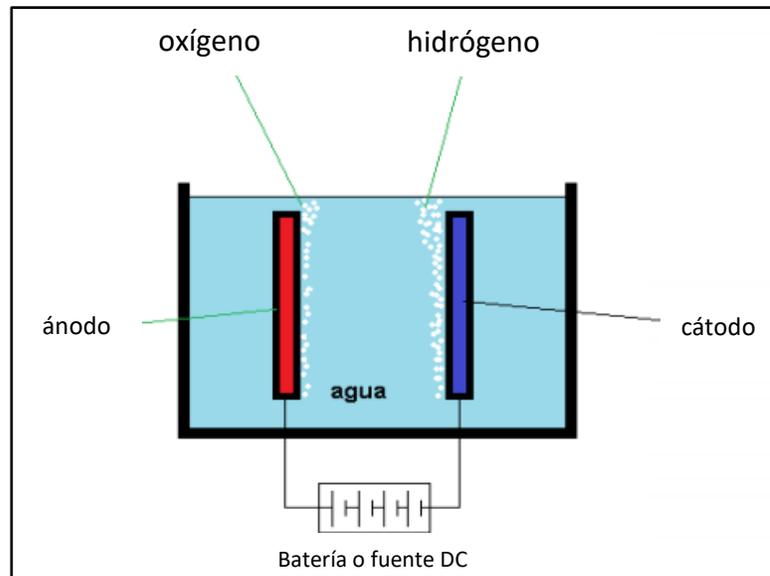
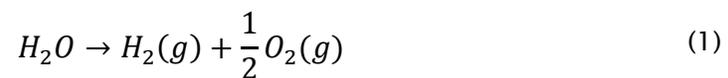


Figura 2: Esquema básico de un electrolizador [11].

En la Figura 2 se puede apreciar el esquema básico de un electrolizador, donde se puede observar que, gracias a las reacciones electroquímicas, en el cátodo se produce hidrógeno gaseoso H_2 , mientras que en el ánodo se produce oxígeno gaseoso O_2 . Independiente del método de electrólisis a utilizar, la reacción global resulta ser la misma, descrita por la ecuación (1) [6].



3.2.1. Principios energéticos de la electrólisis

Para llevar a cabo el proceso de electrólisis, se deben cumplir ciertas condiciones que tienen directa relación con la ruptura de ciertas barreras energéticas propias de la reacción electroquímica. Estas barreras apuntan a resistencias eléctricas del circuito, energías de activación en los electrodos y resistencias en el electrolito que se deben al comportamiento de las burbujas producidas. Desde el punto de vista eléctrico, una buena aproximación del proceso se puede apreciar en la Figura 3 [12], [13].

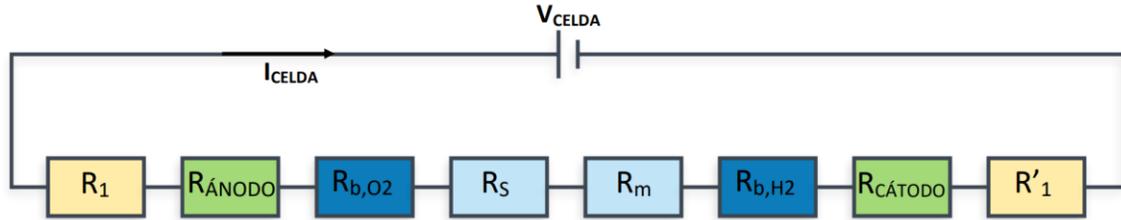
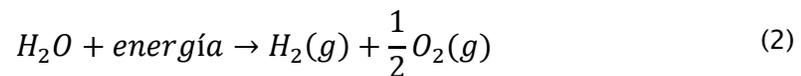


Figura 3: Circuito eléctrico análogo para la electrólisis [12].

Donde R_1 y R'_1 se relacionan a resistencias eléctricas del circuito externo, es decir, a los conductores que entregan la energía eléctrica a la celda por lo que dependen de la longitud, conductividad específica y área transversal de los conductores. R_{b,O_2} , R_s , R_m y R_{b,H_2} se conocen como resistencia de transporte que son típicas en el proceso, y responden al comportamiento de las burbujas de hidrógeno y oxígeno (R_{b,O_2} , R_{b,H_2}) mientras que R_s y R_m , están asociadas a la resistencia que opone el electrolito y la membrana respectivamente. Finalmente, $R_{ÁNODO}$ y $R_{CÁTODO}$ tienen relación con el comportamiento electroquímico presente en la superficie de los electrodos [12].

Se tiene además que la reacción de separación del agua es una transformación que no ocurre de manera espontánea, sin embargo, puede ser impulsada suministrando energía al sistema a través de una fuente externa, en este caso, por la energía eléctrica. Es por este motivo, que estas condiciones deben ser analizadas en aspectos termodinámicos con el fin de determinar el potencial de operación de la celda [12], [13].

Siguiendo esta lógica, la ecuación (1) ahora puede ser vista de la siguiente manera [14]:



El concepto de energía presente en la ecuación (2) puede llegar a ser muy amplio, sin embargo, en este proceso la energía necesaria para que ocurra la electrólisis del agua está definida por el cambio de entalpía del proceso ΔH . Esta energía es suministrada por energía eléctrica y por energía térmica, donde la primera tiene directa relación al cambio de energía libre de Gibbs ΔG , mientras que la segunda, tiene directa relación con el producto de la temperatura T (en °K) y el cambio de entropía en el proceso ΔS [11], [14].

La relación entre estas magnitudes está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta H(T) = \Delta G(T) + T\Delta S(T) \quad (3)$$

Se tiene que el balance energético durante la electrólisis puede ser considerado un proceso reversible, es decir, que la variación de energía química dentro del sistema es suministrada en su totalidad por la fuente de energía externa, en este caso la eléctrica, dando origen al término de voltaje reversible V_{rev} . Este voltaje, aplicado a los electrodos, corresponde al trabajo eléctrico mínimo o tensión mínima que se necesita para la descomposición de la molécula de agua (H_2O). Esta relación está caracterizada por la ecuación (4) que está en función de ΔG .

$$V_{rev} = \frac{\Delta G(T)}{zF} \quad (4)$$

En la ecuación (4), z corresponde a la cantidad de electrones transferidos por molécula de hidrógeno durante la reacción electroquímica que es igual a 2, mientras que F corresponde a la constante de Faraday que tiene un valor de $96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Análogamente, si la energía térmica es suministrada también mediante una fuente de energía eléctrica la tensión requerida para el proceso es mayor y a esta tensión se le conoce como voltaje termoneutral V_{tn} . Esta relación queda en evidencia en la ecuación (5), en función del cambio de entalpía ΔH .

$$V_{tn} = \frac{\Delta H(T)}{zF} \quad (5)$$

En condiciones de laboratorio estándar, es decir a 25°C y 1 bar de temperatura y presión respectivamente, se tiene que $V_{rev} = 1,229 \text{ V}$ y que $V_{tn} = 1,482 \text{ V}$ [13], [15].

Además, es importante agregar que el comportamiento de un electrolizador se ve influenciado por la respuesta cinética de los electrodos, por la estructura física y geometría de la celda y por el tipo de electrolito utilizado. Estos factores se manifiestan como pérdidas de eficiencia, aumento del voltaje requerido respecto el teórico, y dan lugar al concepto de sobrepotencial o sobrevoltaje. Estos sobrevoltajes se clasifican según al fenómeno termodinámico que responden, como se presenta a continuación [16]:

- Sobrevoltaje de activación: Tiene relación con la dinámica presente durante la transferencia de carga en el proceso de electrólisis [16].

- Sobrevoltaje de concentración: Este fenómeno hace alusión a la falta de condiciones estacionarias y homogeneidad de la concentración del electrolito en cuestión, más aún, este se ve afectado por cambios de presión y comportamiento de los líquidos y gases presentes [16].
- Sobrevoltaje de reacción: Tiene relación con la respuesta termodinámica en la superficie del electrodo en contacto con el electrolito [16].
- Sobrevoltaje de transferencia: Es el sobrevoltaje que tiene relación el flujo de corriente desde o hacia un electrodo dentro del proceso [16].
- Sobrevoltaje óhmico: Está directamente relacionado con la ley de Ohm, donde se puede vincular la circulación de una corriente eléctrica a través de una resistencia, resistencias que en este caso son asociadas a electrodos y electrolito [16].

3.3. Tipos de electrolizadores

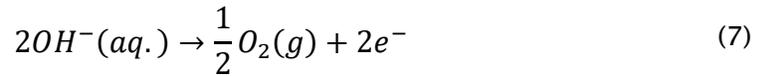
Un electrolizador está compuesto por elementos básicos y comunes para todos los sistemas de electrólisis. Los elementos que lo componen son los electrodos (ánodo y cátodo), una fuente de alimentación eléctrica de carácter continua, un electrolito, y un separador o diafragma [11]. Cabe mencionar que difieren con respecto al electrolito a utilizar, donde principalmente se pueden destacar cuatro, que se describen a continuación:

3.3.1. Electrolizador alcalino

El electrolizador alcalino está conformado por un par de electrodos que por lo general son de acero recubierto con níquel, los cuales están separados por un diafragma que cumple la función de separar los gases y a la vez de transportar los iones. Estos elementos se encuentran introducidos en una disolución acuosa de KOH (hidróxido de potasio) o NaOH (hidróxido de sodio) que corresponde al electrolito encargado de producir los iones para las distintas reacciones electroquímica. Comúnmente estas disoluciones se trabajan en concentraciones de 25% a 30%, esto con el fin de optimizar la conductividad iónica del sistema. Este tipo de

electrolizadores tienen un consumo específico de potencia con valores entre 4,2 y 4,8 kWh/Nm³¹ y una eficiencia aproximada del 50%-60%.

Las reacciones para el cátodo y ánodo están representadas por las ecuaciones (6) y (7) respectivamente, respondiendo a la reacción global electroquímica presente en el sistema, mencionada en la ecuación (1) [6], [11] .



El esquema general de un electrolizador alcalino se muestra a continuación:

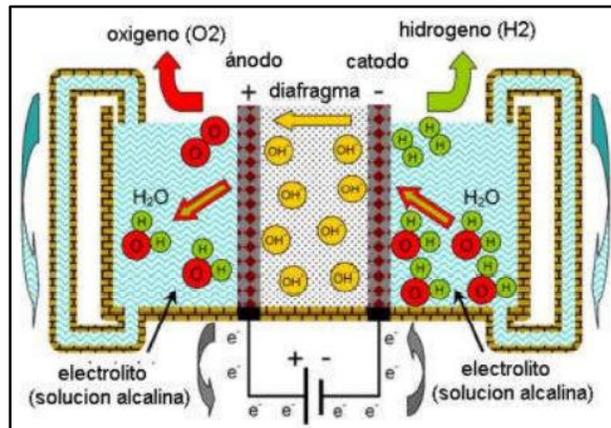


Figura 4: Esquema de un electrolizador alcalino [11].

Cabe mencionar que este tipo de electrolizadores cuenta con dos configuraciones de montaje distintas, las cuales son monopolar y bipolar. En la configuración monopolar se suelen montar los electrodos en paralelo, es decir, las placas positivas o ánodos todas conectadas a un terminal positivo y por lo consiguiente de la misma manera para las placas negativas o cátodos, pero estas conectadas al terminal negativo, como se puede apreciar en la Figura 5. Mientras que la configuración bipolar, corresponde a electrodos conectados en serie, es decir, con la sucesión positivo-negativo-positivo como se puede evidenciar en la Figura 6 [10].

¹ Nm³: Normal metro cubico; Unidad de medición de gases en determinadas condiciones.

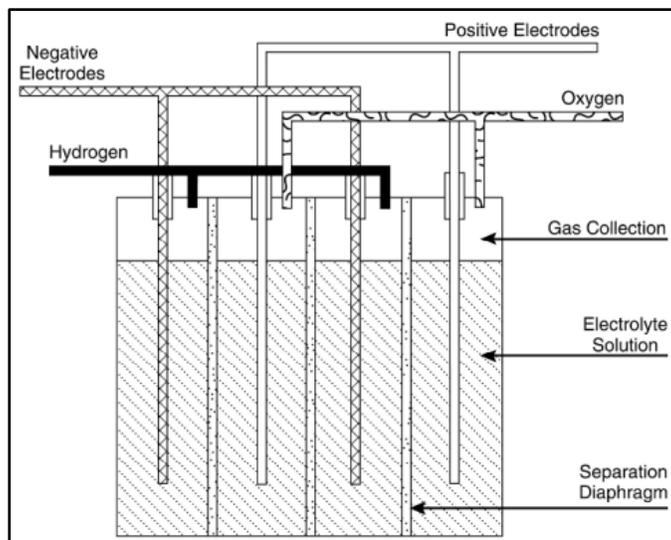


Figura 5: Esquema de un electrolizador alcalino en configuración monopolar [10].

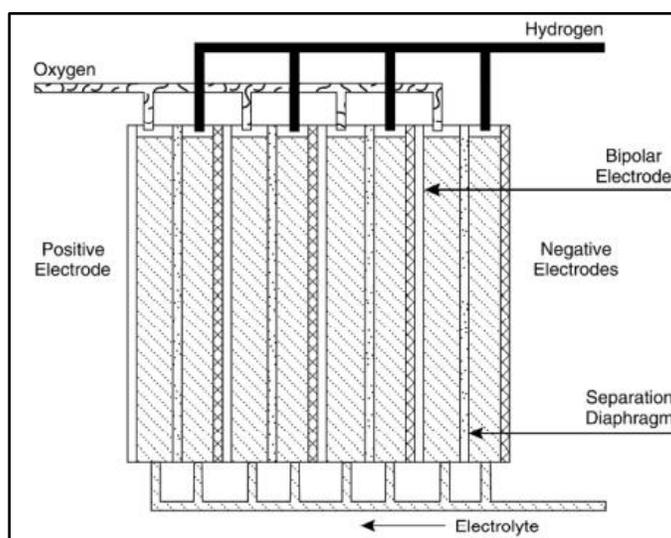


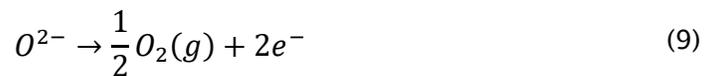
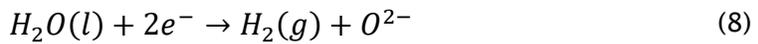
Figura 6: Esquema de un electrolizador alcalino en configuración bipolar [10].

3.3.2. Electrolizador PEM

El electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM por sus siglas en inglés), al igual que el anterior, cuenta con dos electrodos los cuales son aislados mediante un electrolito, el cual consiste en una membrana polimérica delgada, la encargada de evitar que se mezclen los gases como también evitar la conducción electrónica de los iones. Esta membrana posee propiedades de acidez muy características, lo que impone un uso de materiales resistentes a estas condiciones, utilizando electrodos a base de metales nobles como lo son el platino, iridio,

rutenio. La membrana que usualmente se utiliza en este tipo de electrolizadores es el Nafión 117, que corresponde a una lámina de plástico transparente capaz de transportar iones H^+ a través de la estructura del polímero. A diferencia de los electrolizadores alcalinos, utilizan solamente agua desmineralizada sin ningún aditivo como insumo para la producción de hidrógeno. Este tipo de electrolizador presenta consumos de potencia específica con valores de 4,4–5,0 kWh/Nm³, mientras que su eficiencia se encuentra entre el 55%–70%.

Las reacciones para el cátodo y ánodo están representadas por las ecuaciones (8) y (9) respectivamente, respondiendo a la reacción global electroquímica presente en el sistema, mencionada en la ecuación (1) [6], [11], [17].



El esquema general de un electrolizador tipo PEM se muestra a continuación:

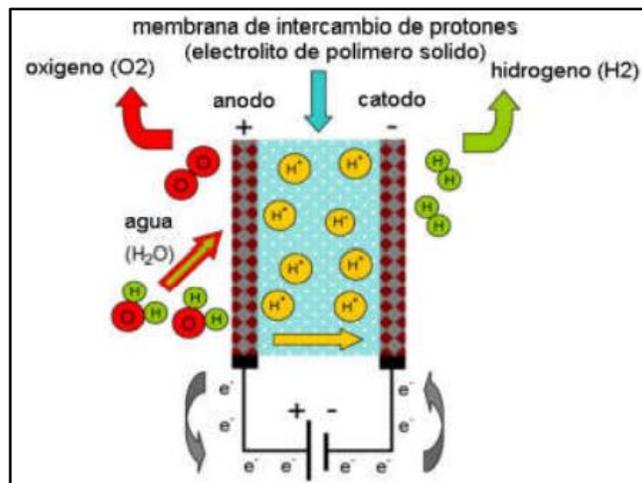


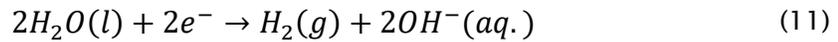
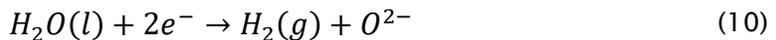
Figura 7: Esquema de un electrolizador tipo PEM [11].

3.3.3. Electrolizador SOE

El electrolizador de óxido sólido (SOE por sus siglas en inglés), permite la electrólisis del vapor de agua a temperaturas comprendidas entre 600 y 900°C, lo que acelera la cinética de la reacción reduciendo así la energía en la polarización de los electrodos, esto se traduce a mayor eficiencia, rozando el 100%. En base a lo anterior, este tipo de electrolizador trabaja con

potenciales más bajos con relación a los otros. Como electrolito cuenta con celdas de cerámica sólidas, buenas conductoras del ion O^{2-} . Al igual que los electrolizadores anteriores cuenta con electrodos que en este caso generalmente son elementos cermets². La potencia específica consumida por este tipo de electrolizadores tiene valores entre 2,5–3,0 kWh/Nm³. Cabe mencionar que esta tecnología aún se encuentra en el estado de I+D.

Las reacciones para el cátodo y ánodo están representadas por las ecuaciones (10) y (11) respectivamente, donde la reacción global responde a la ecuación (1) [6], [11], [18].



El esquema de un electrolizador de óxido sólido se presenta a continuación:

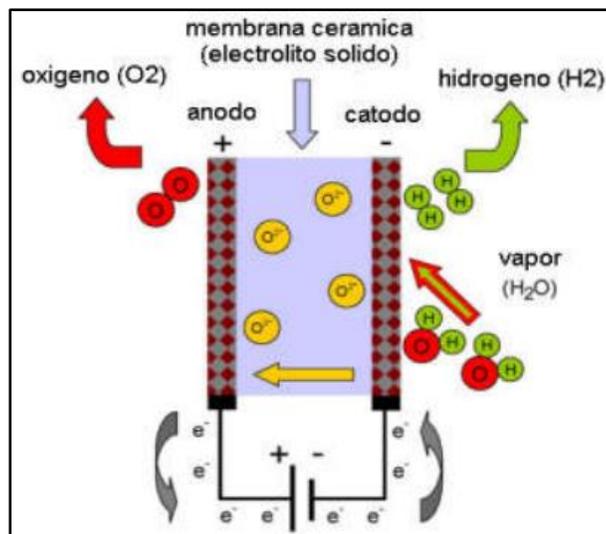


Figura 8: Esquema de un electrolizador SOE [11].

3.3.4. Electrolizador AEM

El electrolizador de membrana de intercambio de aniones (AEM por sus siglas en inglés), tiene un funcionamiento similar al tipo PEM con la principal diferencia de que este transporta los aniones OH^- , en lugar de los protones H^+ , es decir, las reacciones involucradas son las mismas que ocurren en un electrolizador alcalino representadas por las ecuaciones (6) y (7) para el cátodo

² Cermet: termino proveniente de la unión de las palabras cerámica y metal.

y ánodo respectivamente. Como información importante con respecto a esta tecnología, se tiene que aún se encuentra en etapa de investigación [6].

3.3.5. Comparación entre los distintos tipos de electrolizadores

En los incisos anteriores se detallaron los distintos tipos de electrolizadores, evidenciando sus características más importantes de funcionamiento. Con esta información y en conjunto con lo presentado en el estado del arte, a continuación, se presenta una tabla comparativa de las tres principales tecnologías de electrólisis del agua.

Tabla 3: Comparación entre los distintos tipos de electrolizador.

Tipo de electrolizador	Alcalino	PEM	SOE
Electrolito utilizado	-Agua + NaOH -Agua + KOH	-Nafión 117 -Teflón.	-Cerámica
Material de los electrodos	-Acero inoxidable -Acero niquelado -Níquel	-Grafito con platino -Acero inoxidable -Cobre	-Níquel -Cerámica
T° operación [°C]	80-90	80-90	600-900
Consumo energético [kWh/Nm³]	4,2-4,8	4,4-5,0	2,5-3,0
Densidad de corriente [A/cm²]	<0,45	1,0-2,0	0,3-1,0
Eficiencia [%]	50-60	55-70	≈100
Otros atributos	-Tecnología establecida y confiable	-Pureza del H ₂ (99,9995%) -Ecológicamente limpio.	-Demanda poca energía.

Cabe mencionar que los valores de consumo energético [kWh/Nm³], densidad de corriente [A/cm²] y eficiencia [%] mostrados anteriormente corresponden a la operación de plantas industriales de producción de hidrógeno. Sin embargo, se muestran como un estado de referencia para el desarrollo de un prototipo a escala [6]. Por ejemplo, el consumo teórico de un electrolizador a condiciones estándar de presión y temperatura (1 bar y 25°C) es de 2,94 kWh

para lograr producir 1 Nm³ de hidrógeno. Este valor depende del voltaje de operación del electrolizador, de la corriente en los electrodos y de la eficiencia del sistema. Es más, tomando en cuenta el desempeño de estas variables dependiendo de la temperatura y presión, la potencia práctica consumida suele ser sobre los 4,0 kWh y esto aplica a cualquier escala de alguna planta de producción de hidrógeno [19].

Contextualizando la Tabla 3 hacia un análisis a un prototipo de menor escala, se presenta la siguiente observación revelando los aspectos de ventaja y desventaja de los distintos tipos de electrolizadores mencionados en anteriormente, enfocándose en los electrolizadores tipo alcalino y PEM que son los más utilizados para diseños de plantas a escala piloto.

Para el electrolizador tipo alcalino:

Ventajas:

- Tecnología confiable y establecida: Se refiere a la seguridad de operación de este tipo de electrolizadores independiente de la escala de aplicación.
- Material de electrodos de fácil obtención: Tanto el acero inoxidable, como el níquel tienen fácil obtención, ya sea, de manera directa o por internet.
- Fácil elaboración del electrolito: Hace referencia al uso de agua destilada en conjunto con KOH o NaOH y su concentración.
- Distintas posibles configuraciones para experimentar: Se presentan la configuración monopolar y bipolar.
- Fácil manufactura: Un electrolizador tipo alcalino es más fácil de implementar a escala piloto.
- Visualización de la operación: Por su diseño, suele ser más fácil visualizar el “burbujeo” de H₂ y O₂.

Desventajas:

- Obtención del diafragma óptimo: Con respecto a la difícil adquisición del Zirfon® para desarrollar el diafragma, ya sea por alto costo o el difícil acceso.
- Electrolito corrosivo: De no utilizar los electrodos resistentes a las condiciones de operación se pueden corroer.

- Demanda constante de una solución electrolítica: Hace referencia a una fuente de electrolito ($H_2O + NaOH$ o KOH) constante, lo que propone un sistema de bombeo para suministro.
- Mayor tamaño por uso de electrolito líquido: Esta condición propone un reto ya que al utilizar un electrolito líquido circula una menor corriente por los electrodos lo que se traduce en aumentar el tamaño de estos (densidades de corriente) y por lo consiguiente, el tamaño del electrolizador.

Para el electrolizador tipo PEM:

Ventajas:

- Independencia de una solución electrolítica: Para su funcionamiento se puede emplear solo agua destilada y en los peores casos, agua de la llave, de manera directa.
- Electrolito sólido: Propone un diseño más compacto dado que por la condición del electrolito, por los electrodos circula una mayor corriente que se traduce en un electrolizador más consistente.
- Puede trabajar a distintas presiones: Ofrece una producción de hidrógeno bajo ciertas condiciones de presión.

Desventajas:

- Altos costos de los elementos de manufactura: Al considerar un sistema a escala piloto, los elementos tanto de electrodos y membranas óptimos suelen tener un valor elevado.
- Máxima prolijidad durante la manufactura: Hace referencia a lo detallista que debe ser la implementación como, por ejemplo, sellar de manera óptima la celda, cuidar la membrana de malas posturas, etc.
- Trabaja a altas presiones: Se suele asociar un sistema para entregar el agua (H_2O) a cierta presión para un mejor funcionamiento.
- Poca visualización de operación: Por su diseño compacto, es complejo visualizar el “burbujeo” del proceso.

Se puede apreciar que la evaluación con respecto a las ventajas y desventajas de los dos principales tipos de electrolizadores tienden a enaltecer el electrolizador tipo alcalino sobre el PEM para una posible implementación a menor escala. Esto se debe a que en general los elementos presentes en este tipo de electrolizadores son más accesibles a excepción del diafragma de Zirfon®, pero que puede ser reemplazado por otro material que cumpla relativamente bien con su tarea. Esto a su vez se complementa con la tarea de manufactura o armado de la celda electrolítica, que resulta ser una tarea asequible. Con respecto a las desventajas, estas pueden ser minimizadas por la ejecución correcta de la implementación del electrolizador alcalino. Esto contrasta con las ventajas y desventajas del electrolizador PEM. Por lo mencionado anteriormente, se explorará la posibilidad de implementar una celda electrolizadora de tipo alcalino.

3.4. Modelo matemático de un electrolizador alcalino

Con el objetivo de tener una noción válida de la operación del electrolizador, es que se busca modelar eléctricamente el comportamiento la celda electrolítica. En base a la información expuesta anteriormente se puede mencionar que la operación de un electrolizador se ve influenciado por diversos factores asociados a la termodinámica de las reacciones electroquímicas. Estos factores son caracterizados por un sobrevoltaje. Es por esta razón que, para modelar de manera eléctrica la celda, es conveniente estudiar el comportamiento del voltaje en bornes del electrolizador en función de la corriente que circula a través de este.

3.4.1. Curva V-I característica de un electrolizador alcalino

La curva característica de un electrolizador alcalino corresponde a una curva de carácter empírico, es decir, que se basa en la experimentación y observación del electrolizador, que modela la cinética de la reacción electroquímica presente en una celda electrolítica. Mediante esta curva es posible determinar los puntos de operación de la celda, además de evidenciar el comportamiento de los sobrevoltajes producidos por las irreversibilidades del proceso. A pesar de que se han propuesto diferentes modelos matemáticos el del autor Ulleberg resulta ser el más utilizado y eficiente para representar el comportamiento de un electrolizador alcalino [20], [21].

Para una temperatura conocida de operación la forma básica la curva V-I es expresada por la siguiente ecuación [21]:

$$V_{cel} = V_{rev} + \frac{r}{A}I + slog\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (12)$$

Donde

V_{cel} : voltaje en bornes del electrolizador [V]

V_{rev} : voltaje reversible [V]

I : corriente a través de la celda [A]

r : parámetro de resistencia óhmica del electrolito [Ω]

s, t : parámetros por sobrevoltaje en electrodos

A : área del electrodo [m^2]

Sin embargo, para modelar correctamente la dependencia de la temperatura de las sobretensiones la ecuación (12) puede ser modificada para entregar un modelo más detallado con una dependencia de la temperatura asociada a los parámetros r, s y t . La curva V-I dependiente de la temperatura esta dad por la siguiente ecuación [21]:

$$V_{cel} = V_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A}I + slog\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A}I + 1\right) \quad (13)$$

Donde;

r_i : parámetros de resistencia óhmica del electrolito.

s_i, t_i : parámetros por sobrevoltaje en electrodos.

T : temperatura del electrolito [$^{\circ}C$].

Los parámetros empíricos (r_i, s_i y t_i) presentes en la ecuación (13), se pueden obtener mediante la utilización de métodos numéricos aplicado a técnicas de regresión no lineal sobre las medidas experimentales previamente obtenidas.

La forma básica de la curva V-I de un electrolizador alcalino se puede apreciar en la Figura 9, la cual muestra la operación del electrolizador a una baja temperatura de $20^{\circ}C$ y una alta temperatura de $80^{\circ}C$. La principal diferencia entre una curva y otra es la influencia de la

temperatura en los sobrevoltajes. En síntesis, esta figura entrega una referencia general del comportamiento que debe tener un electrolizador alcalino [20], [21].

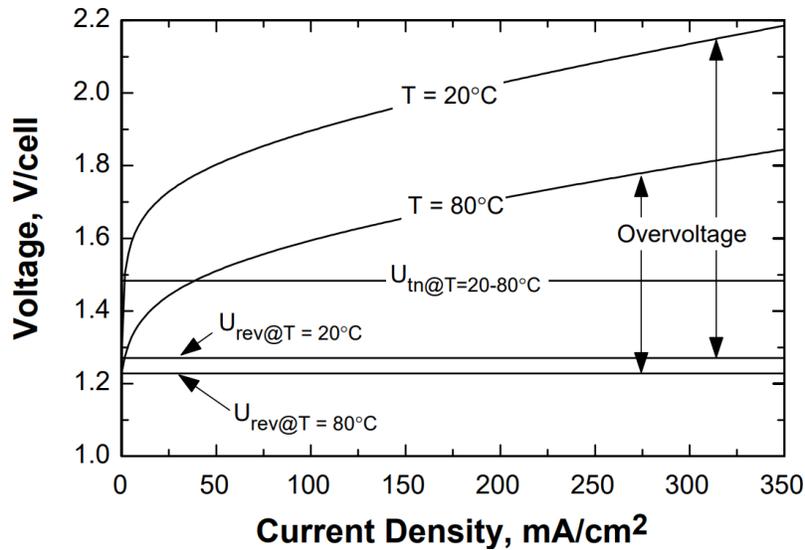


Figura 9: Curva característica V-I típica para una celda de electrólisis alcalina a alta y baja temperatura [21].

3.5. Modelo matemático de una celda fotovoltaica

Los dispositivos o celdas fotovoltaicos o solares están compuestos por semiconductores que son capaces de convertir la radiación solar incidente en la placa en energía eléctrica de carácter continuo. Mientras que un panel solar es el conjunto de un determinado número de celdas solares, por lo general 36 o 72, conectadas en serie/paralelo y montadas sobre una placa metálica. Finalmente, un arreglo fotovoltaico es el conjunto de un determinado número de paneles solares conectados en serie/paralelo para la generación de una cantidad determinada de energía eléctrica. Es importante mencionar que existen dos parámetros que influyen fuertemente en el rendimiento del panel solar: la irradiancia (la luz solar que incide sobre el panel) y la temperatura presente en el panel [22], [23].

Para proponer el modelo matemático es necesario recurrir al circuito eléctrico equivalente de una celda solar que se muestra en la Figura 10.

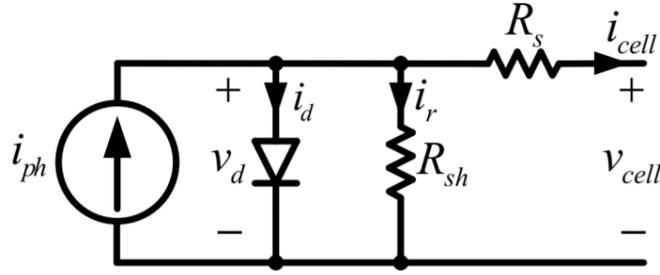


Figura 10: Circuito equivalente de una celda fotovoltaica [23].

Aplicando leyes de voltajes y corrientes de Kirchoff (LKV y LKC) al circuito equivalente presentado anteriormente, se puede obtener la relación de voltaje–corriente para la celda solar. De este modo se obtienen las siguientes ecuaciones [22], [23].

$$i_{cell} = i_{ph} - i_d - i_r \quad (14)$$

Donde

i_{cell} : corriente de salida de la celda [A].

i_{ph} : corriente fotogenerada [A].

i_d : corriente a través del diodo [A].

i_r : corriente a través de la resistencia R_{sh} [A].

Detallando el modelo se tiene que:

$$i_{ph} = \frac{S(t)}{S_{ref}} \left(i_{ph,ref} + c_{sc} (T_c(t) - T_{c,ref}) \right) \quad (15)$$

Siendo

$S(t)$: irradiancia solar de operación [W/m²].

S_{ref} : irradiancia solar de referencia o en condiciones estándar (STC) [W/m²].

$i_{ph,ref}$: corriente foto generada en condiciones de referencia [A] (toma el valor de I_{sc}).

c_{sc} : coeficiente de temperatura de corriente de corto circuito [%/°C].

$T_c(t)$: temperatura de operación [°C o °K]

$T_{c,ref}$: temperatura de referencia [°C o °K].

Luego, se tiene que la corriente a través del diodo está descrita por la siguiente ecuación:

$$i_d = i_o \left(e^{\frac{q(v_{cell} + i_{cell} R_s)}{K T_c(t) A}} - 1 \right) \quad (16)$$

Donde

i_o : corriente de saturación inversa del diodo [A].

q : carga del electrón ($1,6 * 10^{-19}$) [C].

K : constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$).

A : factor de idealidad.

Además, la corriente de saturación inversa del diodo viene dada por la ecuación

$$i_o = i_{o,ref} \left(\frac{T_c(t)}{T_{c,ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c(t)} \right)}{KA}} \quad (17)$$

Donde

$i_{o,ref}$: corriente de saturación inversa en condiciones de referencia [A].

E_g : energía del semiconductor en su banda de gap.

Por lo consiguiente, se tiene que la corriente a través de la resistencia R_{sh} viene determinada por la siguiente ecuación:

$$i_r = \frac{v_{cell} + R_s i_{cell}}{R_{sh}} \quad (18)$$

Cabe mencionar que R_{sh} suele tomar valores relativamente altos, por lo que las pérdidas de corriente asociadas a esta resistencia son casi nulas.

Ahora bien, reuniendo estas expresiones y reemplazando término a término en la ecuación (14), una celda fotovoltaica puede ser representada matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$i_{cell} = \frac{S(t)}{S_{ref}} \left(i_{ph,ref} + c_{SC} (T_c(t) - T_{c,ref}) \right) - i_o \left(e^{\frac{q(v_{cell} + i_{cell} R_s)}{KT_c(t)A}} - 1 \right) - \frac{v_{cell} + R_s i_{cell}}{R_{sh}} \quad (19)$$

Sin embargo, para modelar un panel fotovoltaico se requiere que las celdas solares estén conectadas en una configuración serie/paralelo, por lo que el modelo para un panel fotovoltaico es el siguiente [22], [24]:

$$i_{panel} = N_p i_{ph} - N_p \left(i_o \left(e^{\frac{q(v_{cell} + i_{cell} R_s)}{N_s K T_c(t) A}} - 1 \right) \right) - \frac{v_{cell} + R_s i_{cell}}{R_{sh}} \quad (20)$$

Donde N_s y N_p corresponde a las celdas conectadas en serie y paralelo respectivamente, es importante visualizar además que, si N_s y N_p tienen valor unitario, solo se habla de una celda solar lo que implica que los parámetros de voltaje de circuito abierto y corriente de cortocircuito deben ser fraccionados dependiendo del valor de N_s y N_p respectivamente [25]. En base a esto además se tiene que $i_{o,ref}$ queda determinado por la ecuación (21) [22].

$$i_{o,ref} = \frac{I_{SC}}{e^{\left(\frac{qV_{OC}}{N_sKT_c(t)A}\right)} - 1} \quad (21)$$

Siendo

I_{SC} : corriente de corto circuito [A].

V_{OC} : voltaje de circuito abierto [V].

4. Marco metodológico

La finalidad del siguiente trabajo es diseñar, fabricar y caracterizar la operación de un electrolizador alcalino, para un posterior análisis teórico de la operación de este electrolizador utilizando la energía solar fotovoltaica, mediante diferentes simulaciones. Para cumplir con la finalidad del trabajo, se presentan a continuación las actividades necesarias, dispuestas en secuencia.



Figura 11: Diagrama de bloques de actividades.

Las directrices mínimas aplicadas para llevar a cabo cada actividad mencionada en la Figura 11, se muestran a continuación.

4.1. Diseño de la celda electrolítica.

Para proponer un diseño de la celda electrolítica se debe comenzar por definir una serie de requerimientos mínimos de funcionalidad que tienen que estar directamente acotados por los alcances del proyecto. Estos requerimientos definirán así un criterio mínimo de armado para la celda. Posteriormente, este diseño debe ser plasmado en 3D mediante algún software CAD o equivalente para ofrecer una vista realista del objeto.

4.2. Construcción de la celda electrolítica.

La construcción de la celda se realiza a partir del diseño 3D planteado anteriormente. Para llevar a cabo esta tarea, se debe realizar una adaptación del diseño 3D propuesto anteriormente y llevarlo a una serie de representaciones 2D para poder trabajarlos en alguna herramienta de corte, encargada de entregar el material dimensionado. Finalmente, se debe armar la celda uniendo cada corte antes realizado.

4.3. Pruebas de operación de la celda electrolítica.

Las pruebas de operación tienen el objetivo de evaluar el rendimiento de la celda bajo distintas condiciones con el fin de proponer una configuración de funcionamiento óptima bajo

las limitaciones del proyecto. Estas condiciones están determinadas por los electrodos utilizados, una barrera divisora de los compartimientos anódicos y catódicos y la temperatura de operación del electrolito dispuesto. Por esta razón, las pruebas deben estar destinadas a evaluar como influyen al comportamiento de la celda las siguientes variables:

- Tipo de material y tamaño de los electrodos.
- Tipo de barrera divisora de compartimientos.
- Temperatura del electrolito.

Para esto, se obtendrán y analizarán curvas de corriente-voltaje, dado que es lógico evaluar la circulación de corriente en la celda en función del voltaje que se le aplica a esta, ya que la generación de hidrógeno tiene directa relación a la transferencia o flujo de electrones en el electrolizador, esto queda evidenciado también en las ecuaciones (6) y (7) donde se puede apreciar una reacción de oxido-reducción [26], [27].

4.4. Producción de hidrógeno.

Para una configuración determinada de operación del electrolizador, es decir, electrodos y división de compartimientos ya establecidos, se debe estudiar la capacidad de producción del electrolizador. Para esto se debe medir el volumen del gas de hidrógeno producido bajo condiciones de operación constantes y de máximo rendimiento.

4.5. Caracterización matemática de la operación de la celda electrolítica.

La caracterización matemática del electrolizador se realizará en base a la ecuación (12) propuesta por el autor Ulleberg [21], ecuación que proporciona un perfil de voltaje en función de la corriente y temperatura de la celda, descrita por sus coeficientes r , s y t . Este perfil obtenido mediante este método entrega noción con respecto a al comportamiento de los sobrevoltajes presentes durante el proceso de generación de hidrógeno, indicando el requerimiento energético de la celda de electrólisis.

Para encontrar las expresiones de $r(T)$, $s(T)$ y $t(T)$ se utilizara el procedimiento sistemático de siete pasos para ajuste de curvas propuesto por Ulleberg, detallado a continuación [21].

- (1) Recopilar datos experimentales u operativos para la corriente I , tensión V y temperatura T .

(2) Organización de los valores medidos para I y V en conjuntos de datos con respecto a valores constantes para T.

(3) Realizar ajustes de curvas individuales de los tres coeficientes r, s, y t en la ecuación (12).

(4) Repita el paso (3) para algunas otras temperaturas entre T =20°C y 80°C.

(5) Realizar ajustes de curvas intermedias en los coeficientes dependientes de la temperatura r y t.

(6) Verificar que los coeficientes dependientes de la temperatura se comportan de acuerdo con las expresiones:

$$r(T) = r_1 + r_2T \quad y \quad t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}$$

(7) Realizar un ajuste de curvas general para todo el conjunto de datos, utilizando los valores r_i , s_i y t_i , encontrado de los pasos (1) a (6) como valores iniciales para el análisis de regresión.

Es importante mencionar que este paso a paso se presenta como una guía para realizar el ajuste de curvas, por lo que puede presentar variaciones en las expresiones que se vinculan al comportamiento de los parámetros r_i , s_i y t_i . Además, los datos deben ser trabajados mediante algún software como Excel, MatLAB, o equivalente.

4.6. Simulación del sistema de producción de hidrógeno utilizando energía solar fotovoltaica.

Para estudiar el efecto de la utilización de la energía solar fotovoltaica como suministro eléctrico a la celda, se desarrollará una simulación de los modelos matemáticos tanto del electrolizador obtenido mediante el apartado 4.5 y del modelo matemático del panel solar, con el fin de estudiar el comportamiento en un día promedio del sistema de producción de hidrógeno mediante energía solar fotovoltaica. Con respecto al modelo matemático del panel solar se tiene que este está descrito por la ecuación (20), donde se puede apreciar que el comportamiento de la corriente de salida de la celda solar tiene directa relación con los parámetros temperatura de operación de la celda y el parámetro de irradiancia presente en el lugar [22], [23]. Cabe mencionar que para durante esta tarea se deben tomar en consideración los datos de generación fotovoltaica asociados a la zona de interés.

La simulación debe desarrollarse en algún software que entregue un entorno agradable y de fácil entendimiento en relación a los datos resultantes, como Simulink, PSIM o un equivalente.

5. Diseño y construcción de la celda electrolítica

5.1. Diseño de la celda

Para el diseño de la celda electrolizadora de tipo alcalino, se definieron los requerimientos mínimos que debe cumplir para un funcionamiento aceptable. Los requerimientos son los siguientes:

- Debe ser construida con forma de una cubeta (geometría cuadrada), con el fin de simplificar la tarea de manufactura.
- La cubeta debe tener altas cualidades de permeabilidad.
- Debe ser construida con acrílico transparente para lograr apreciar el fenómeno de la producción de hidrógeno y oxígeno y además de presentarse como un elemento no conductor.
- Debe ofrecer la opción de cambio de electrodos, para efectuar diversas pruebas de funcionamiento.
- Debe ofrecer la opción de utilización de una división o diafragma experimental y el cambio de estos elementos para efectuar diversas pruebas de funcionamiento.
- Debe ofrecer la opción de apertura y cierre constante de la celda para modificaciones, sin implicar un mayor deterioro.
- Debe ofrecer vías de salida para el hidrógeno y oxígeno producido.

El estanque o fuente contenedora de electrólisis tuvo más de un diseño preliminar, diseños que no cumplían del todo los requerimientos mencionados anteriormente. Sin embargo, gracias a los aprendizajes obtenidos con los diseños preliminares se obtuvo el diseño final para la celda electrolizadora que se muestra en la Figura 12. Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, el estanque o fuente constará de piezas de acrílico transparente de 6 mm de espesor, las cuales se montarán de manera de formar una fuente rectangular para almacenar los electrodos, diafragmas y la solución electrolítica.

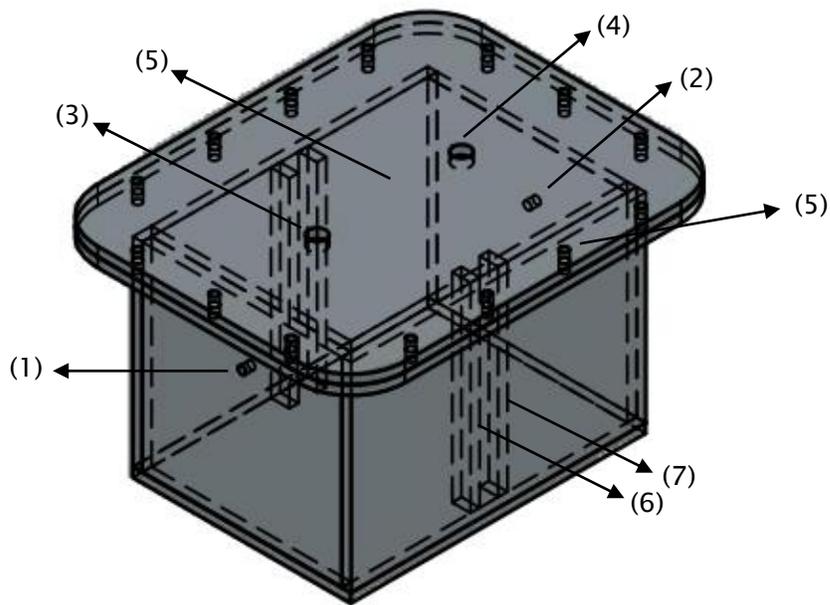


Figura 12: Diseño AutoCAD de la celda de electrólisis.

(1), (2): Orificios para entrada de conector para ánodo y cátodo respectivamente.

(3), (4): Salidas de O₂ y H₂ respectivamente.

(5): Tapa superior.

(6), (7): Soportes para introducir pieza extra, con su equivalente al extremo opuesto.

(8): Orificios para utilización de pernos para el cierre.

Las medidas interiores de la celda propuesta son de 130 mm x 130 mm x 180 mm de ancho, alto y largo respectivamente, siendo capaz de almacenar cerca de 3 litros de electrolito. Mientras que las medidas exteriores son de 142 mm x 136 mm x 192 mm de ancho, alto y largo respectivamente. Los orificios destinados a la entrada del conector de ánodo y cátodo están centrados a 90 mm de la base y tienen un diámetro aproximado de 5 mm, mientras que los orificios de salida de oxígeno e hidrógeno están ubicados estratégicamente en la tapa del electrolizador y poseen un diámetro de 11 mm aproximadamente. Además, esta configuración de montaje del estanque brinda la posibilidad de cambiar su geometría, para ofrecer una distribución variada del electrolito (KOH 25%), o el uso de un material como diafragma para el sistema de electrólisis. Esto se realizaría situando diferentes elementos (cortes de acrílico,

especies de diafragma, etc.) entre los espacios disponibles como se puede apreciar con el elemento “División” presente en la Figura 13. Para más detalles sobre el diseño y sus medidas consultar el Anexo 1, en el que pueden verse los planos del electrolizador.

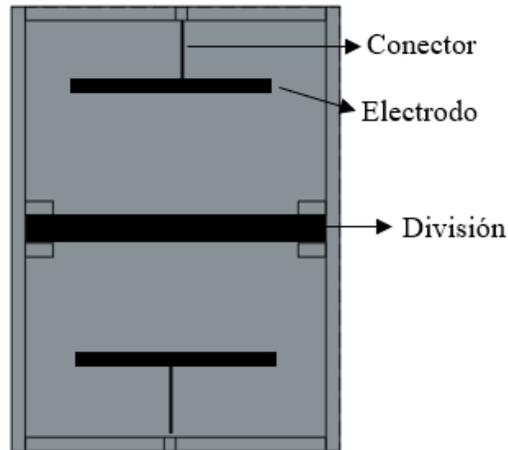


Figura 13: Vista superior de la celda electrolítica.

5.2. Construcción de la celda electrolítica.

Para llevar a cabo la construcción de la fuente o celda electrolizadora, se dispuso de los materiales, herramientas y maquinas presentes en la Fábrica Digital O’Higgins de la Universidad de O’Higgins.

En particular, se utilizó la cortadora laser EPILOG MINI 24 que corresponde a una máquina capaz de cortar y grabar en dos dimensiones, mediante la utilización de un rayo láser, distintos tipos de materiales como el papel, cartón, madera, acrílico, etc., hasta un espesor determinado de aproximadamente 10 mm en una superficie de 24” x 12”. Esta herramienta se apoya en diversos softwares computacionales para la realización del trabajo, siendo Inkscape el principal, entregando una interfaz de diseño y ajuste para un posterior traspaso de datos. Otra herramienta importante de mencionar también es AutoDesk Fusion 360, herramienta capaz de caracterizar los diseños en dos dimensiones para luego ser transferido a Inkscape.

Siguiendo con esta lógica, la materialización de la celda de electrólisis se realizó apoyándose en la secuencia de pasos descrita a continuación:

- (1) Adaptación en dos dimensiones del diseño presente en la Figura 12, parte por parte (tapa, base, soportes, etc.).
- (2) Modelamiento en dos dimensiones de estas partes en software AutoDesk Fusion 360.
- (3) Ajuste del modelo de AutoDesk Fusion 360 mediante el software Inkscape, con el fin de entregar las directrices de corte/grabado hacia la cortadora laser EPILOG MINI 24.
- (4) Preparación de la materia prima a utilizar, en este caso, acrílico de 6 mm de espesor.
- (5) Preparación de las condiciones de trabajo asociadas al uso correcto de la cortadora laser EPILOG MINI 24.
- (6) Corte de las distintas partes del diseño en acrílico de 6mm.
- (7) Unión y pegado de las partes formando la celda electrolítica con adhesivo para acrílico (cloroformo).

Una vez completada la secuencia de pasos descrita anteriormente, el resultado se muestra en la Figura 14.



Figura 14: Celda electrolítica.

6. Pruebas experimentales y resultados.

En base a las diferentes configuraciones posibles determinada por la variedad de elementos para operar la celda electrolítica, es que nace la necesidad de estudiar el comportamiento de estos con el fin de evaluar aspectos operacionales de importancia, para así determinar un modelo o configuración fija de la celda de electrólisis.

A continuación, se muestra una figura con la configuración general del espacio de trabajo para la realización de diversas pruebas.

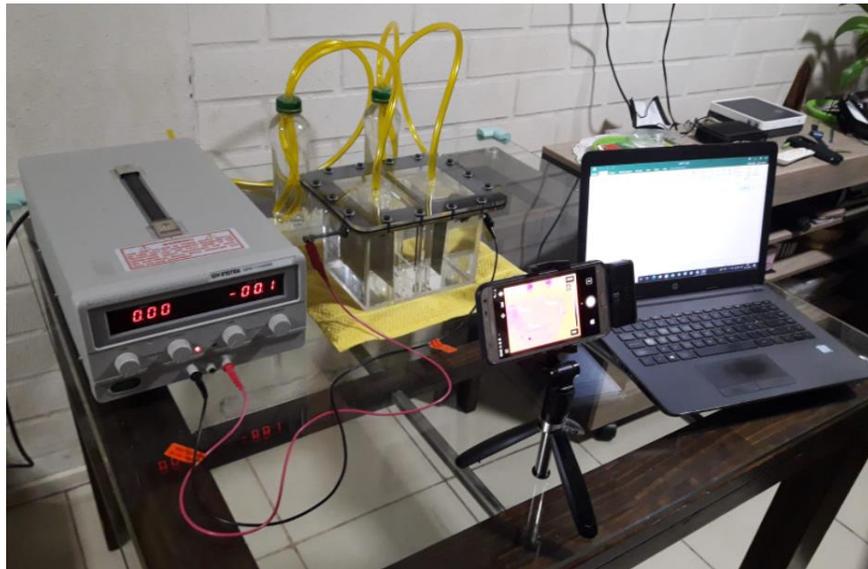


Figura 15: Setup del espacio de trabajo.

También, es necesario establecer las condiciones por las que se registrarán estas pruebas, las cuales están descritas a continuación:

- El electrolizador debe ser llenado con 2,7 litros de electrolito (KOH 25%).
- Los electrodos deben estar 100% cubierto por el electrolito.
- La temperatura de inicio del electrolito debe ser de 20–21°C aproximadamente.
- La separación entre los electrodos debe ser de 80 mm.

Una vez dispuestas las condiciones antes mencionadas, se vinculará la fuente de poder que la energía eléctrica que circulará a través de la celda electrolítica. Además, las pruebas deben realizarse en dos segmentos, en el primer segmento se opera el electrolizador bajo las condiciones antes mencionadas durante 30 min. Una vez completado el primer periodo de

pruebas y teniendo los datos recolectados se comienza con el segundo segmento con una duración de 30 min, del cual también se deben obtener datos de posterior análisis. Este procedimiento tiene la finalidad de evaluar la influencia de la temperatura inicial del electrolito en cada segmento. Cada vez que se finalice una prueba en sus dos segmentos, las condiciones para la prueba siguiente deben ser las mencionadas anteriormente, por lo que se debe vaciar el electrolizador y realizar una limpieza en la superficie en caso de haber restos para luego establece otra configuración y nuevamente llenar la celda con electrolito en las condiciones mencionadas.

6.1. Pruebas de rendimiento de los materiales dispuestos para electrodos.

Estas pruebas están destinadas a determinar cuál es el material y tamaño de electrodo que brinda un mejor rendimiento con respecto a la generación de hidrógeno en presencia de una solución electrolítica de hidróxido de potasio KOH al 25%, es importante mencionar que la conductividad del electrolito en esta concentración es máxima [20].

Se dispone de distintos materiales para los electrodos: placas de acero inoxidable 304, placas de acero inoxidable 316 y placas de níquel con 99.99% de pureza.

La diferencia entre las variedades de acero inoxidable antes mencionadas recae principalmente en su composición en base a diversos metales como se detalla en la Tabla 4 [28].

Tabla 4: Composición de las variedades de acero disponibles [28].

Tipo de acero	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]
AI 304	≤0,08	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,03	18,0–20,0	8,0–10,5	---
AI 316	≤0,08	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,03	16–18	10–14	2–3

Con respecto al tamaño disponible para cada material se tiene que para acero inoxidable 304 las placas dispuestas son de 50 mm x 100 mm, para acero inoxidable 316 las placas dispuestas son 50 mm x 100 mm y de 100 mm x 100 mm, mientras que para níquel las placas dispuestas son de 50 mm x 100 mm y de 100 mm x 100 mm.

Se comienza por analizar las curvas de corriente en función voltaje para los electrodos de tamaño 50x100 mm como se puede apreciar en la Figura 16. Se puede visualizar que por cada tipo de material existen dos curvas, esto se debe al método de pruebas en dos segmentos.

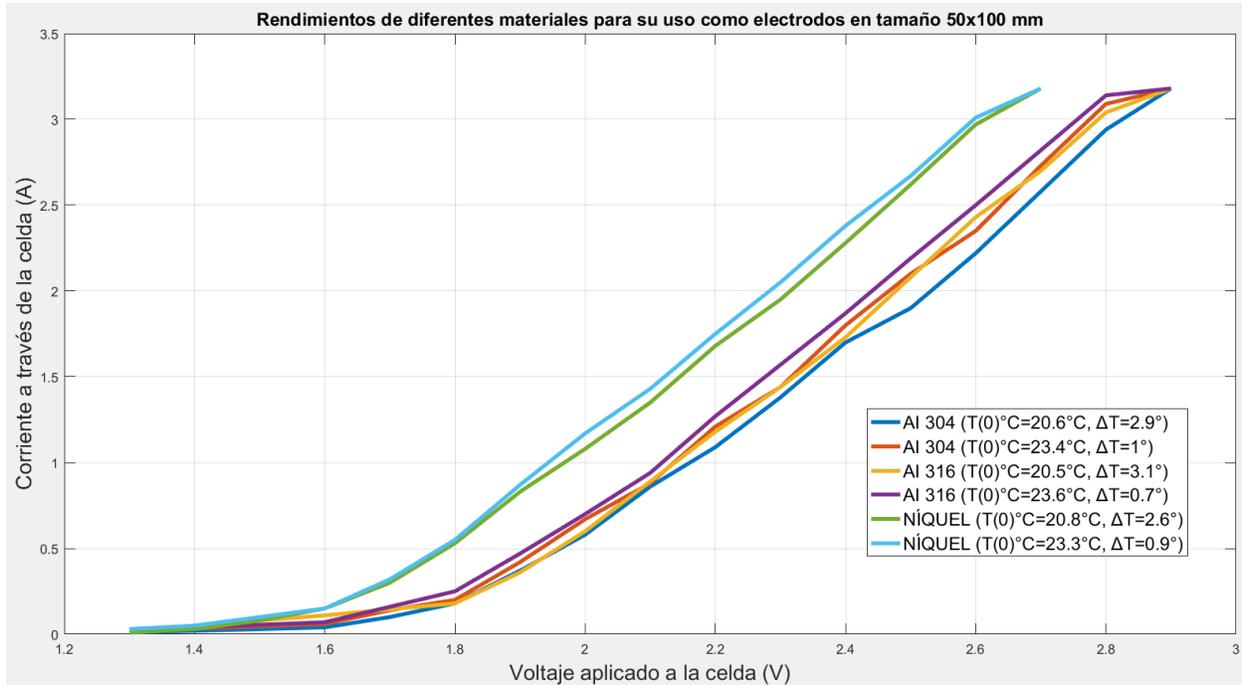


Figura 16: Curva de rendimiento de electrodos de tamaño 50x100 mm.

En la Figura 16 se puede distinguir de manera clara que las variedades de acero inoxidable tienen un comportamiento similar; sin embargo, el acero inoxidable 316 se posiciona de mejor manera en comparación a su otra variedad el acero inoxidable 304. Esto se debe a la composición del acero inoxidable 316 y a cómo los elementos que lo componen interactúan con el ambiente de carácter alcalino impuesto en la celda [29]. A pesar de ello el material que se muestra con mejor rendimiento es el níquel, alcanzando los mismos valores de corriente a un menor voltaje en comparación al resto.

Otro punto importante de visualizar en la Figura 16, es el comportamiento de la temperatura donde se puede apreciar de manera general que al aumentar la temperatura inicial del electrolito se mejora el rendimiento de los electrodos, esto se debe a que los sobrevoltajes implícitos en la reacción disminuyen, es decir, las resistencias eléctricas disminuyen [30].

Se presenta a continuación el comportamiento de los dos tipos de materiales disponibles en tamaño de 100x100 mm.

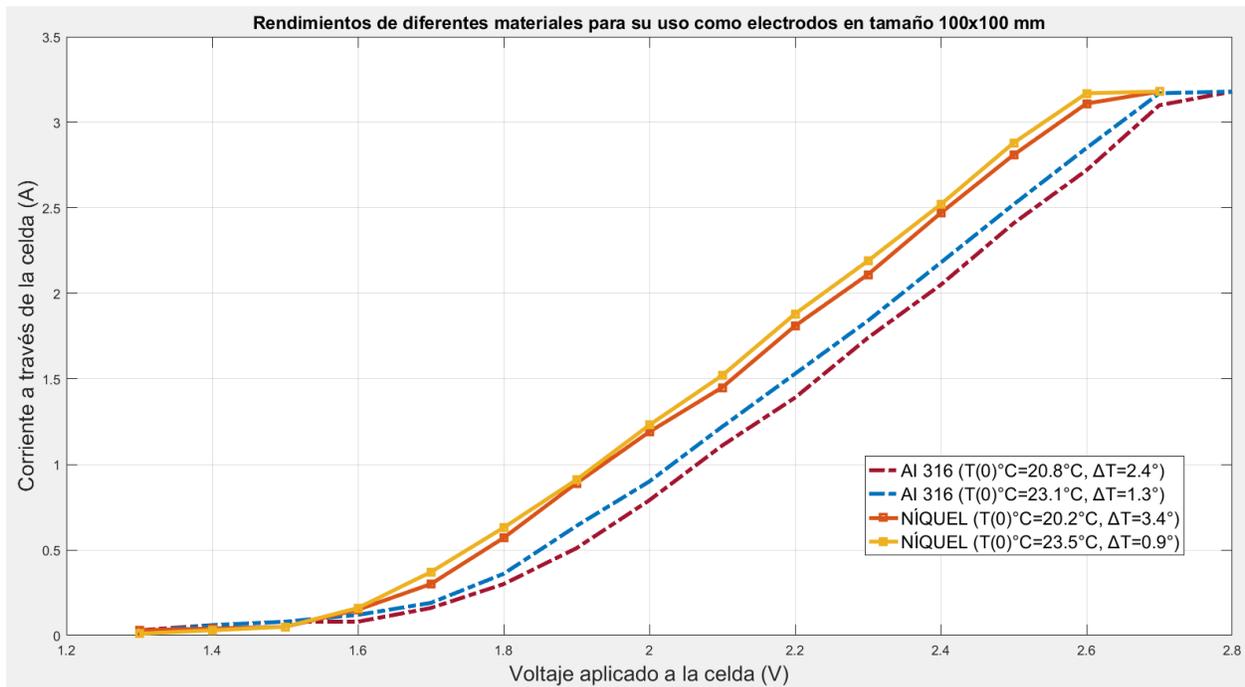


Figura 17: Curva de rendimiento de placas de tamaño 100x100 mm.

En la Figura 17 se puede distinguir el comportamiento de los electrodos de acero inoxidable 316 y los electrodos de níquel. Se observa que el material que presenta un rendimiento superior es el níquel, tanto en el primer como en el segundo segmento de pruebas, corroborando así lo expuesto en la literatura asociada a electrolizadores alcalinos [29]. Este gráfico, además, entrega noción de cómo influye el aumentar el tamaño de los electrodos en el rendimiento del electrolizador bajo las condiciones de operación dispuestas para la celda de electrólisis, observándose que se requiere menor energía eléctrica para el funcionamiento del electrolizador. Otro punto importante de mencionar con respecto a la figura anterior es que el electrodo de acero inoxidable 316 presenta una mejora significativa al aumentar la temperatura del electrolito, pese a esto el electrodo de níquel tiene un comportamiento más efectivo.

Integrando las curvas de las Figuras 16 y 17 en un mismo gráfico se tiene lo siguiente:

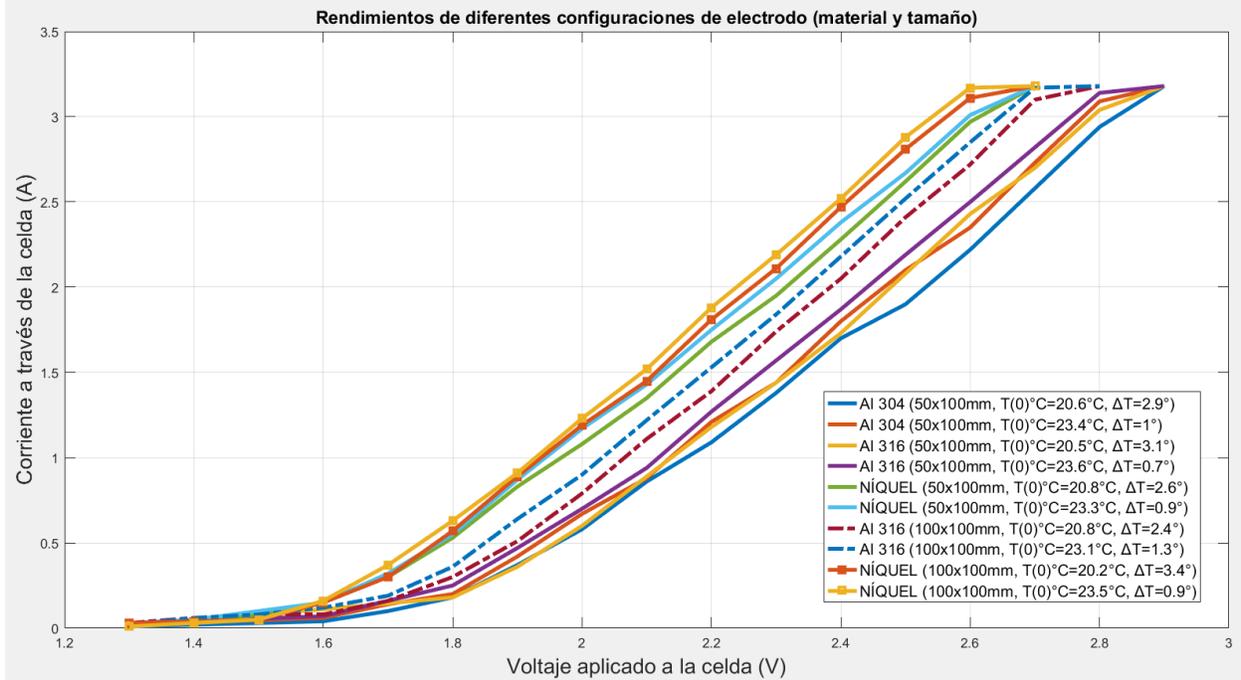


Figura 18: Rendimiento general de las configuraciones de electrodo.

En la Figura 18 se puede corroborar que el tamaño del electrodo influye de manera directa en el rendimiento de la celda, es decir, que a mayor tamaño del electrodo el rendimiento de la celda aumenta, o visto desde otro punto, la energía eléctrica requerida para la operación del electrolizador es menor. Esto se debe a que la superficie de contacto del electrodo con la solución electrolítica es mayor, ayudando en la cinética de las reacciones electroquímicas lo que implica una disminución en los sobrevoltajes [15]. Otro punto para tener en consideración es la influencia de la temperatura, presentándose como un parámetro de importancia en el rendimiento de la celda, ya que a mayor temperatura los sobrevoltajes disminuyen [20].

La Figura 18 confirma que el material de mejor comportamiento es el níquel, ya que incluso en su tamaño de 50x100 mm presenta un comportamiento superior al electrodo de acero inoxidable 316 de tamaño 100x100 mm. Además, la curva de mejor rendimiento bajo las condiciones de operación entregadas al electrolizador es la asociada al electrodo de níquel de tamaño 100x100 mm a mayor temperatura, alcanzando el valor máximo de corriente entregado por la fuente a los 2,6 V, mientras que el resto de las configuraciones disponibles lo alcanza con valores sobre los 2,7 V.

Otro aspecto de importancia es la temperatura final, donde se puede observar que ΔT no es mayor a 5°C en ningún caso, es decir, que el aumento de temperatura luego de realizados ambos segmentos de pruebas no es mayor a 5°C.

6.2. Pruebas de rendimiento de la celda con elemento divisor de compartimientos.

Establecido el material de electrodos de mejor rendimiento correspondiente a las placas de níquel, se explora la idea de evaluar el rendimiento de la celda con una barrera divisora del compartimiento anódico y catódico capaz de evitar la mezcla de los gases producidos (hidrógeno y oxígeno). La utilización de una barrera divisora otorga una serie de aspectos positivos, como por ejemplo, mejoras en la productividad y también el aumento de pureza del hidrógeno obtenido en el proceso [31].

En este trabajo se propone evaluar dos tipos o diseños de barrera, la primera corresponde a una barrera de acrílico de 6 mm de espesor con ciertas cualidades que se detallaran a continuación, mientras que la segunda barrera corresponde a un diafragma experimental desarrollado en el trabajo de Y. Sanath, K. De Silva, P. H. Middleton, y M. Kolhe, titulado Performance Analysis of Single Cell Alkaline Electrolyser Using Mathematical Model.

Además, se observará también que por cada tamaño de electrodo se obtendrán dos curvas, lo que responde a la realización de las pruebas en dos segmentos.

El primer caso por evaluar es el de la barrera divisora de acrílico, la que corresponde a una barrera o división de acrílico transparente de 6 mm espesor con medidas de 128 mm de ancho x 130 mm de alto, que presenta una apertura en la parte inferior con el fin de permitir un traspaso de electrolito entre los compartimientos anódico y catódico. Esta apertura es necesaria para permitir la conductividad eléctrica dentro de la celda ya que el acrílico es un material sólido no conductor por sus propiedades físicas. El elemento divisor puede evidenciarse en la Figura 19.

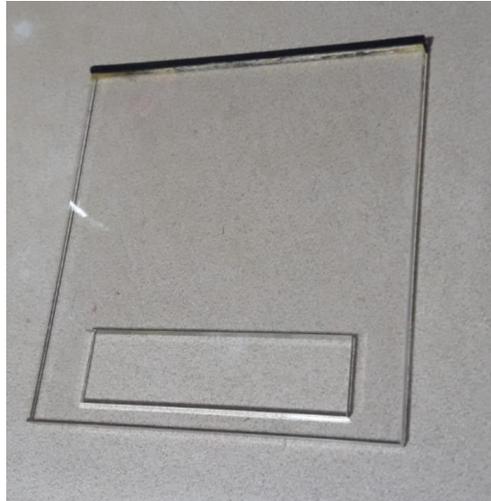


Figura 19: División de acrílico.

Se presentan a continuación las curvas de rendimiento, utilizando la barrera divisora presentada en la Figura 19.

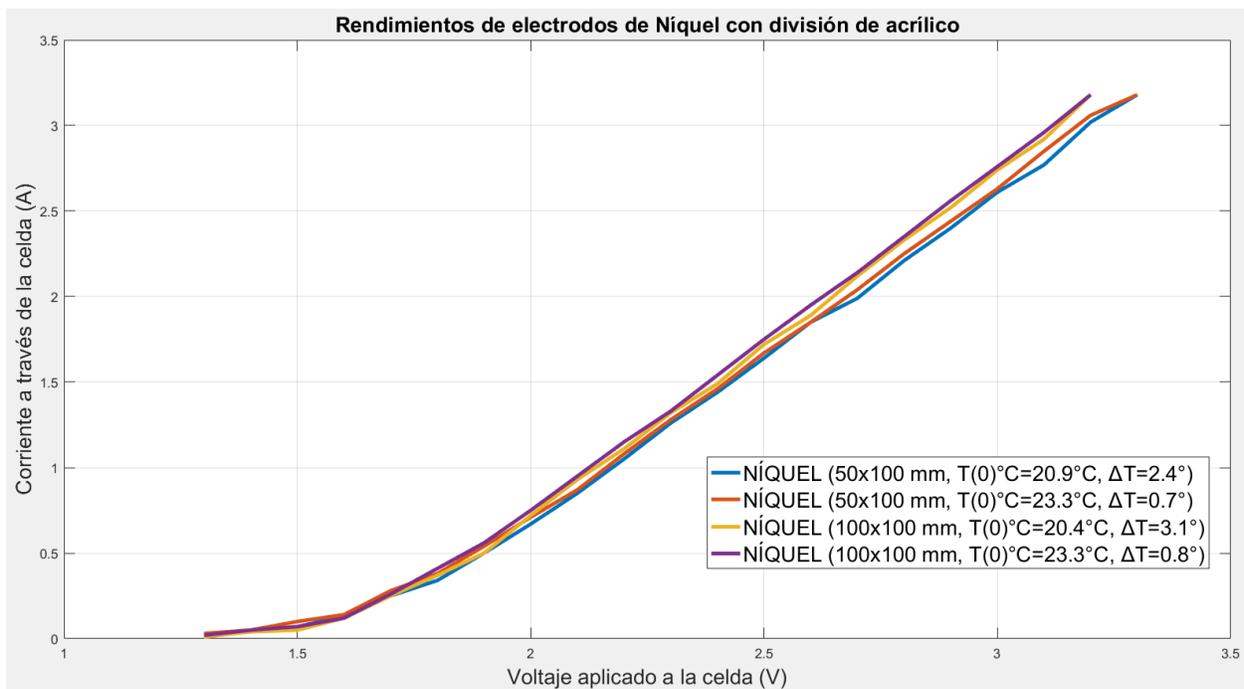


Figura 20: Curvas de rendimiento del electrolizador en presencia de una división de acrílico variando el tamaño de los electrodos.

En la Figura 20 se puede apreciar que, a diferencia de los resultados mostrados en el apartado anterior que tienen relación al caso base establecido (celda sin la utilización de una

barrera divisora), en este proceso se tiene que para alcanzar los mismos valores con respecto a la corriente los voltajes deben ser mayores, desplazándose aproximadamente 1 V hacia la derecha si se visualiza el eje de las abscisas. Cabe mencionar que se mantiene la tendencia con relación al rendimiento en función del tamaño y temperatura, ya que se puede apreciar que la curva asignada al electrodo de tamaño 100x100 mm y con una temperatura inicial de 23,3°C se asocia con el mejor rendimiento.

El segundo caso a evaluar corresponde a un diafragma experimental desarrollado en un trabajo similar para operar en un electrolizador alcalino. Este diafragma experimental está formado por papel filtro y malla de nylon, conformándose por la secuencia papel filtro–malla de nylon–papel filtro. La utilización de este diafragma experimental tiene su respaldo en el trabajo de los autores Y. Sanath, K. De Silva, P. H. Middleton, y M. Kolhe donde se puede apreciar que la utilización de este elemento no influencio un cambio significativo del modelo experimental versus su modelo matemático [32].

Con el fin de adaptar esta idea al modelo de electrolizador presentado en este trabajo es que se propone un diseño de diafragma experimental. Este diseño consta de un marco de acrílico encargado de sostener los componentes interiores, los cuales son el papel filtro y la malla de nylon de 200 mesh, de medidas de 128 mm de ancho x 130 mm de alto. La conformación de este diafragma responde la secuencia marco de acrílico–papel filtro–malla de nylon–papel filtro–marco de acrílico, siendo el resultado final de este el que se muestra en la Figura 21.



Figura 21: Diafragma experimental diseñado.

Se presentan a continuación las curvas de rendimientos para este caso.

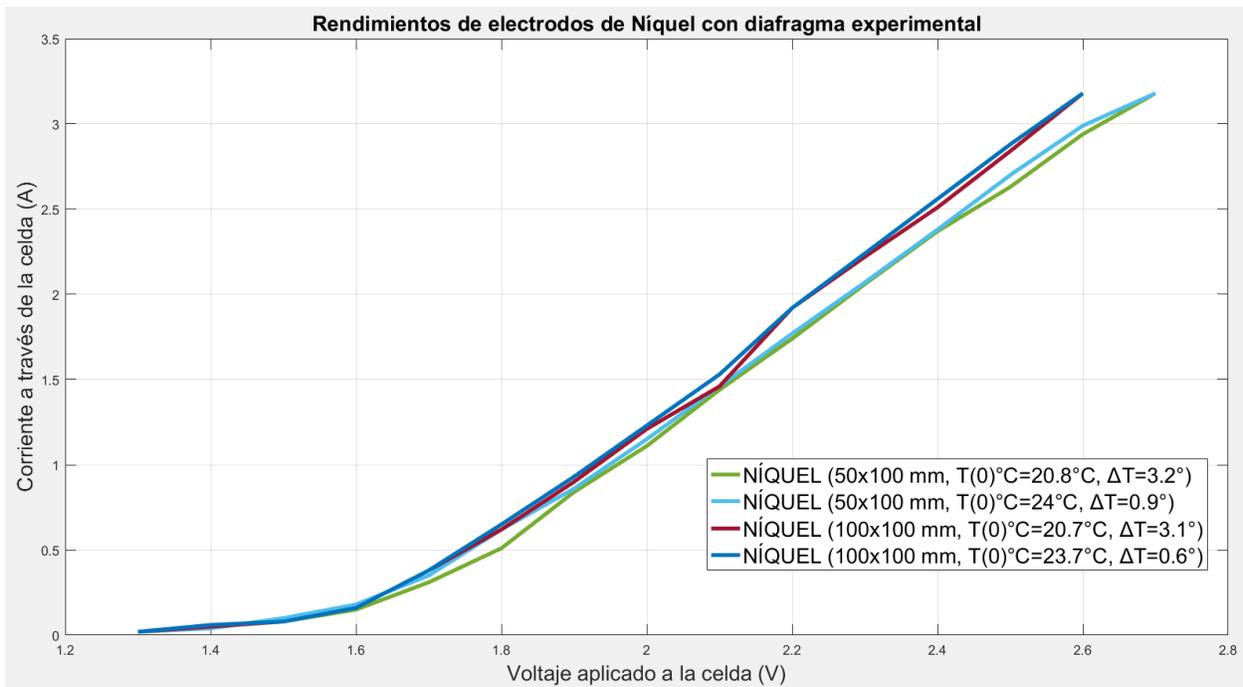


Figura 22: Curvas de rendimiento del electrolizador en presencia de un diafragma experimental variando el tamaño de los electrodos.

En las curvas que se muestran en la Figura 22 si bien se mantiene la tendencia presente en las curvas anteriores, donde a mayor tamaño del electrodo y mayor temperatura del electrolito la celda obtiene un mejor rendimiento, esta vez se puede evidenciar que el rendimiento general

de la celda mejora, ya que se requiere un menor voltaje para conseguir los niveles de corriente vistos en comparación al caso anterior donde se utiliza una barrera divisora de acrílico.

Integrando las curvas de las Figuras 21 y 22 en un mismo gráfico se tiene lo siguiente.

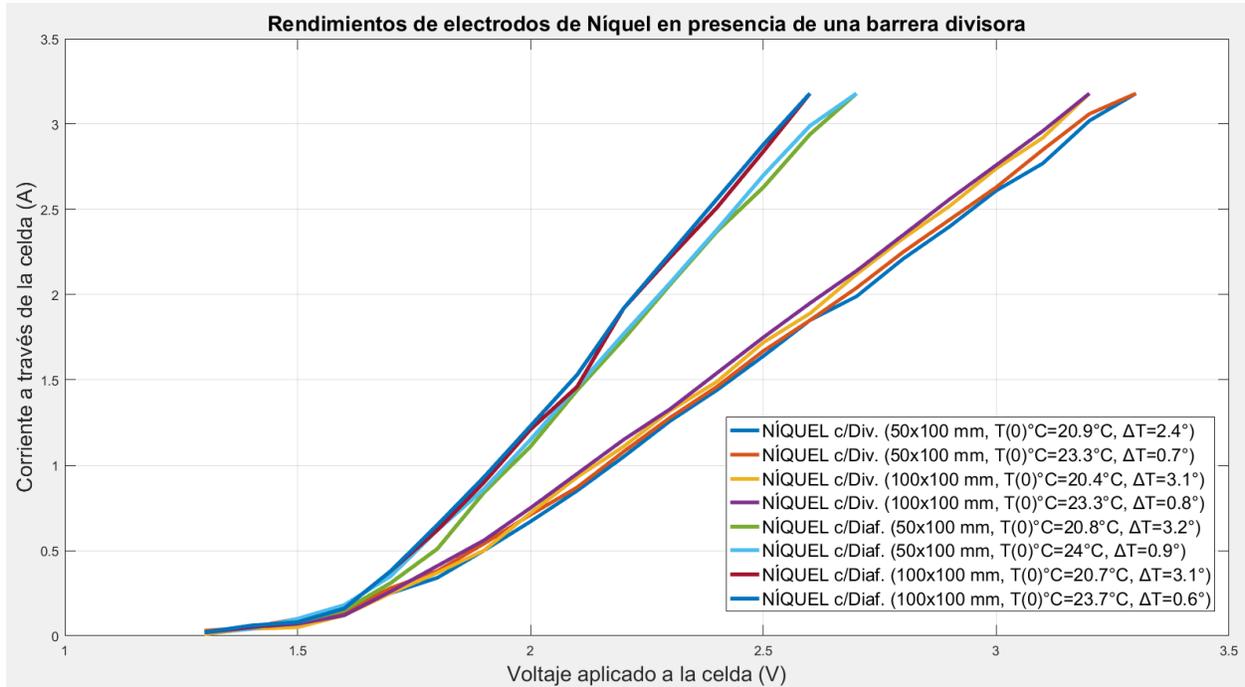


Figura 23: Curvas de rendimiento del electrolizador con diferentes barreras variando el tamaño del electrodo.

En la Figura 23 se puede observar que la utilización del diafragma experimental desarrollado en base al trabajo de Y. Sanath, K. De Silva, P. H. Middleton, y M. Kolhe se traduce en un menor consumo energético para la generación de hidrógeno, en comparación con la utilización de la barrera divisora de acrílico, alcanzando los valores de corriente máxima a los 2,6 V con los electrodos de 100x100 mm, de manera similar al caso base. La principal razón de la diferencia de rendimiento entre la división de acrílico y el diafragma experimental es que el acrílico se presenta como un materia sólido, dificultando de manera significativa la conductividad dentro de la celda, es decir, opone una mayor resistencia lo que finalmente implica un aumento de voltaje, mientras que el diafragma experimental se presenta como un filtro, lo que no opone mayor resistencia [12].

Un fenómeno importante de apreciar se produce en la celda electrolítica que tiene directa relación con la utilización de alguna de estas barreras y la distribución de los gases generados dentro del electrolizador. La Figura 24 muestra una fotografía de la celda en el caso base.

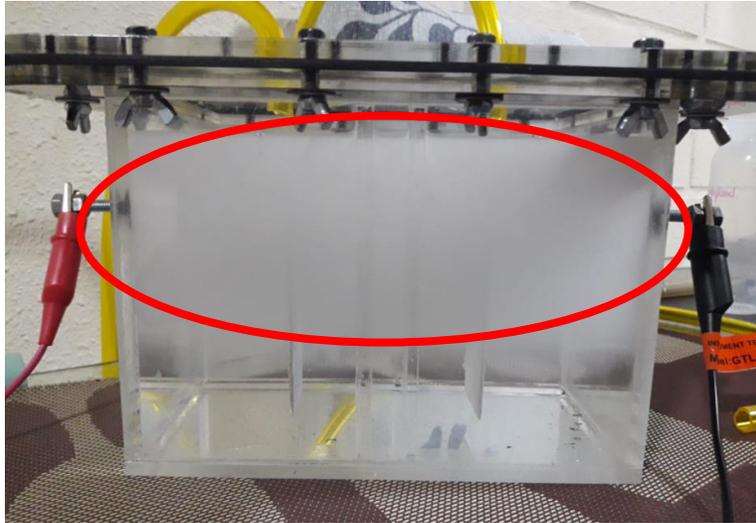


Figura 24: Operación de la celda sin barrera divisora.

En la Figura 24 pueden apreciarse burbujas en casi todo el electrolito; aunque especialmente en la parte superior de la celda, indicado por la elipse de color rojo. Dichas burbujas corresponden tanto al oxígeno como al hidrógeno generado durante la operación. Este fenómeno interfiere con la cantidad de producción que se pretenda de hidrógeno y más aún, con la pureza del hidrogeno [31].

Por otro lado, la Figura 25 muestra la celda en funcionamiento con la barrera divisora de acrílico.



Figura 25: Operación de la celda con barrera divisora de acrílico.

Es notorio apreciar que uno de los compartimientos de la celda electrolítica se concentra gran cantidad de burbujas o gas, indicado por el círculo rojo. Esto se debe a que este compartimiento corresponde al cátodo, que es donde se produce el hidrógeno según las ecuaciones (6) y (7). Esto sumado a que la reacción es de carácter estequiométrica por la composición de la molécula de agua (H_2O), por lo que por cada molécula de agua dividida se generan dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno [6]. Otro punto importante para mencionar sobre esta barrera divisora de acrílico es la apertura en la parte inferior de esta y como proporciona conductividad dentro de la celda.

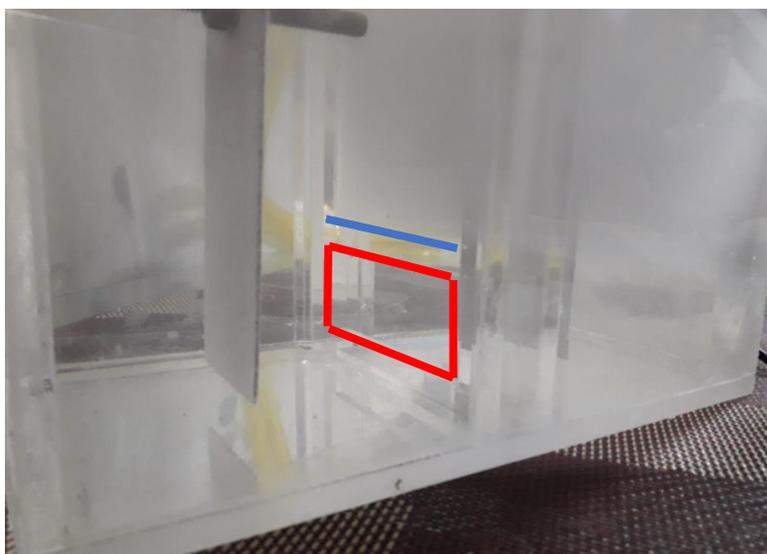


Figura 26: Vista alterna de la operación de la celda con el uso de la división de acrílico.

En la Figura 26 se muestra que la apertura de la celda (rectángulo de color rojo) se dispone de tal modo que de no influir gran manera en la distribución de los gases producidos, esto se debe a que, por un lado, la separación de los electrodos ayuda de manera significativa a que se evite este fenómeno y por otro lado, la mayor concentración de gases en el compartimiento catódico principalmente se comienza a condensar sobre la línea azul presente en la figura en cuestión. Cabe mencionar que mientras más pequeña sea la apertura para el paso de electrolito, mayor es la resistencia que se opone al flujo de este, lo que implica un aumento de los sobrevoltajes [12].

La Figura 27 muestra la operación de la celda utilizando el diafragma experimental.



Figura 27: Operación de la celda con diafragma experimental.

Se pueden apreciar resultados visuales muy similares al caso con la división de acrílico; sin embargo, también puede apreciarse que la dispersión de gas en la parte superior es mayor, indicado por la elipse azul. Esto se debe principalmente a que el diafragma diseñado presentó alteraciones durante su utilización en las pruebas, comenzando por el deterioro del papel filtro utilizado hasta llegar a perder su característica de elemento compacto.

6.3. Producción de hidrógeno

Para disponer de un criterio de producción del electrolizador se estableció la configuración de celda correspondiente a la utilización de electrodos de níquel de 100x100 mm en conjunto con la división de acrílico.

Para medir la cantidad de hidrógeno producido, se utilizará el principio de volumen utilizado por un gas, dado que las moléculas de un gas, bajo el supuesto que es ideal, son capaces de distribuirse por todo el espacio en el cual son contenidos, es decir, un gas ocupa todo el volumen disponible del recipiente en que se encuentra [33].

Para esto se dispondrá de dos recipientes en paralelo, uno para la producción del gas de hidrógeno y otro para el gas de oxígeno. Los recipientes serán botellas plásticas de 510 ml cada una, ambas llenas con líquido (agua) a tope. Cada recipiente contará con un par de mangueras, una para transportar el gas producido (hidrógeno y oxígeno) hacia el recipiente (botella), y otra para transportar el líquido hacia el exterior del recipiente, dejando espacio disponible para el gas (ver Figura 15).

Las condiciones de operación son las mismas que se describen en el inicio del apartado Pruebas experimentales y resultados., con la salvedad de que para este caso se opera el electrolizador a máxima corriente el tiempo que sea necesario para vaciar el líquido del recipiente. Esto implicaría que la cantidad de gas producido de hidrógeno y oxígeno respectivamente sería equivalente volumen de la botella (510 mL). Esto permite conocer la tasa de producción de hidrógeno, es decir, cantidad de hidrógeno producido en un lapso de tiempo determinado.

En base a las condiciones de operación mencionadas anteriormente, se obtuvieron los siguientes datos de producción:

255 mL → 9:14 minutos.

510 mL → 19:41 minutos.

Esto quiere decir que, en producir 255 mL de hidrógeno se tardó 9 minutos con 14 segundos, mientras que para producir 510 mL el sistema se tardó 19 minutos y 41 segundos, manteniendo una relación casi lineal, con datos de temperatura de inicio de 20.6°C y una temperatura final, es decir, luego de los 19:41 minutos de 22.7°C y con una potencia de operación de 11 W aproximadamente.

En base a esta información y recordando que, de acuerdo con la Figura 23, para la celda con división de acrílico y electrodos de 100 x 100 mm la temperatura del electrolito luego de una

hora de funcionamiento es de 24,1°C y casi no hay variación de rendimiento, se puede estimar la producción horaria. Por lo que, mediante una relación de tres simple se tiene que:

$$\begin{aligned} 19:41 \text{ minutos} &\rightarrow 510 \text{ mL} \\ 60 \text{ minutos} &\rightarrow x \text{ mL} \\ \frac{H_2}{\text{hora}} &= \frac{60 \text{ minutos} * 510 \text{ mL}}{19:41 \text{ minutos}} = 1554,61 \text{ mL} \end{aligned} \quad (22)$$

Obteniendo como resultado final que, para la configuración determinada anteriormente de la celda, una temperatura del electrolito entre 20 y 24 °C y una potencia eléctrica nominal de 11 W la razón de producción estimada de la celda durante una hora es de 1554,31 mL de hidrógeno aproximadamente.

7. Caracterización matemática del electrolizador.

Para realizar un modelo matemático del comportamiento eléctrico de la celda electrolítica es necesario evaluar la operación de la celda a diferentes temperaturas de electrolito, para así realizar los ajustes de curvas necesarios mediante la adaptación del paso a paso del método de O. Ullberg al presente trabajo, adaptación que se muestra a continuación.

- (1) Recopilar datos experimentales u operativos para la corriente I , tensión V y temperatura T .
- (2) Organización de los valores medidos para I y V en conjuntos de datos con respecto a valores constantes para T .
- (3) Realizar ajustes de curvas individuales de los tres coeficientes r , s , y t en la ecuación (12).
- (4) Repita el paso (3) para algunas otras temperaturas entre $T = 20^{\circ}\text{C}$ y 60°C .
- (5) Realizar ajustes de curvas intermedias en los coeficientes dependientes de la temperatura r , s y t .
- (6) Realizar un ajuste de curvas general para todo el conjunto de datos, utilizando las expresiones halladas en el paso anterior.

Siguiendo el procedimiento antes mencionado, es necesario obtener curvas de voltaje en función de la corriente a diferentes temperaturas de operación del electrolito. Estas curvas se pueden ver en la Figura 28.

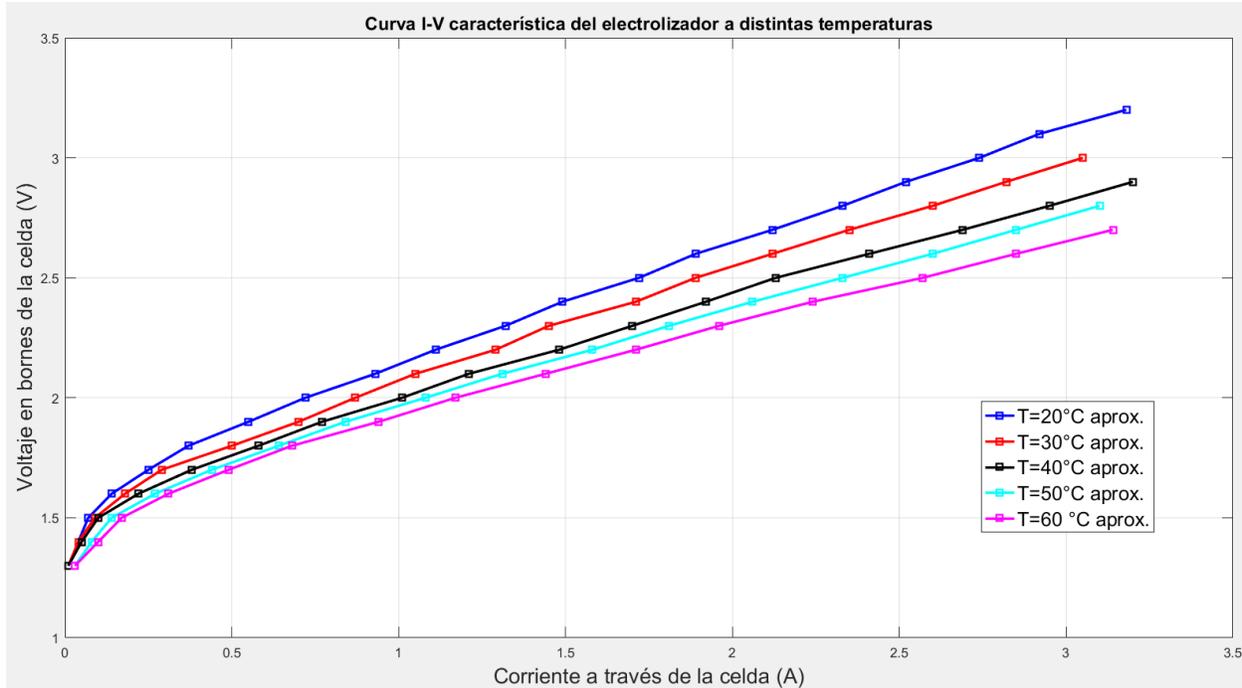


Figura 28: Curvas V-I dependiente de la temperatura del electrolito.

Estas curvas comprenden temperaturas entre 20°C y 60°C en intervalos de 10°C. Es importante mencionar que la temperatura máxima de prueba fue de 60°C ya que, a esta temperatura de electrolito, la fuente contenedora de la celda electrolítica comenzó a sufrir deterioro; en específico, se comenzó a despegar en ciertas partes implicando esto una disminución del electrolito por fugas.

Se puede afirmar en base a lo mostrado en la Figura 28 que a mayor temperatura se optimizan las reacciones de cinética, termodinámica, etc., facilitando la ruptura de las diversas barreras energéticas presentes durante el proceso [12]. Otro aspecto importante de mencionar sobre el comportamiento a distintas temperaturas de este electrolizador es que las mayores diferencias de voltajes se comienzan a visualizar a medida que la corriente toma valores más altos, teniendo todas las curvas un inicio similar que responde a la ruptura del voltaje reversible y termo neutro de la reacción. Para este electrolizador en específico, se tiene que entre la curva V-I asociada a 20°C y la curva V-I asociada a 60°C existe una mejora del rendimiento de 15% aproximadamente, sobre corrientes de 2 A, limitada a la vez esta afirmación a la corriente máxima suministrada por la fuente que es de 3,18 A.

Mediante el análisis y tratamiento de los datos presentes y apoyándose en el paso a paso antes descrito, se tiene que las expresiones halladas para los coeficientes $r(T)$, $s(T)$ y $t(T)$ que responden al comportamiento de la celda a diferentes temperaturas, son las siguientes:

$$r(T) = -2,163 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 + 3,534 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 2,08 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 4,8650 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,76 \cdot 10^{-4} \quad (23)$$

$$s(T) = -4,5 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 + 6,828 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0,003565 \cdot T^2 + 0,0744 \cdot T - 0,2967 \quad (24)$$

$$t(T) = 1,099 \cdot 10^{-5} \cdot T^4 - 0,001678 \cdot T^3 + 0,0897 \cdot T^2 - 1,982 \cdot T + 16,52 \quad (25)$$

Reemplazando estos términos en la ecuación (12) se obtiene el modelo matemático del comportamiento eléctrico de la celda.

Para validación del modelo matemático, se realizaron comparaciones entre el modelo experimental (ver Figura 28) y el modelo matemático antes mencionado. Esta comparación de curvas se puede apreciar en la siguiente figura.

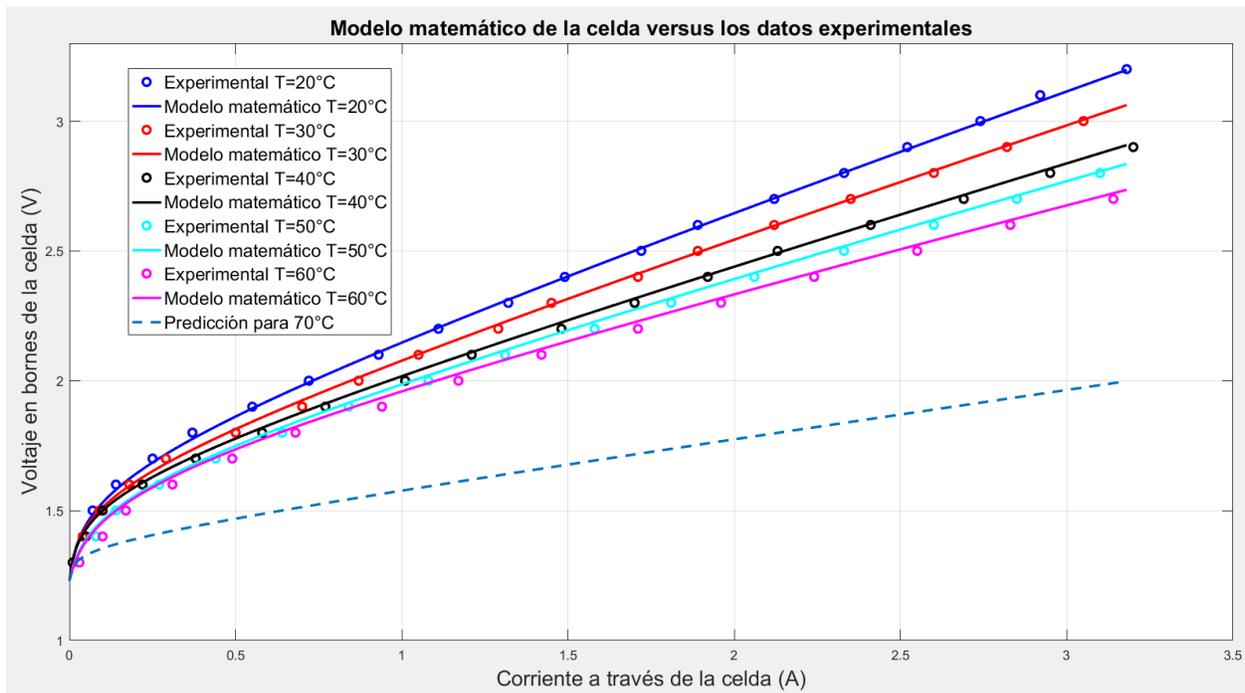


Figura 29: Curvas experimentales versus modelo matemático a diferentes temperaturas.

Se puede observar en la Figura 29 que el modelo matemático se comporta de manera bastante acertada, ya que los datos experimentales para diferentes temperaturas (indicado por los círculos) suelen mantenerse relativamente cerca de la curva o recta que le corresponde según su color y que corresponde al modelo matemático. Sin embargo, se tiene que, para corrientes menores a 0,4 A, el modelo presenta ciertas desigualdades (ver Figura 30). Estas diferencias, que pueden apreciarse especialmente en las curvas de 20 °C y 60 °C, podrían estar vinculadas a la toma de datos de manera manual. De todas formas, no afectan significativamente la precisión del modelo.

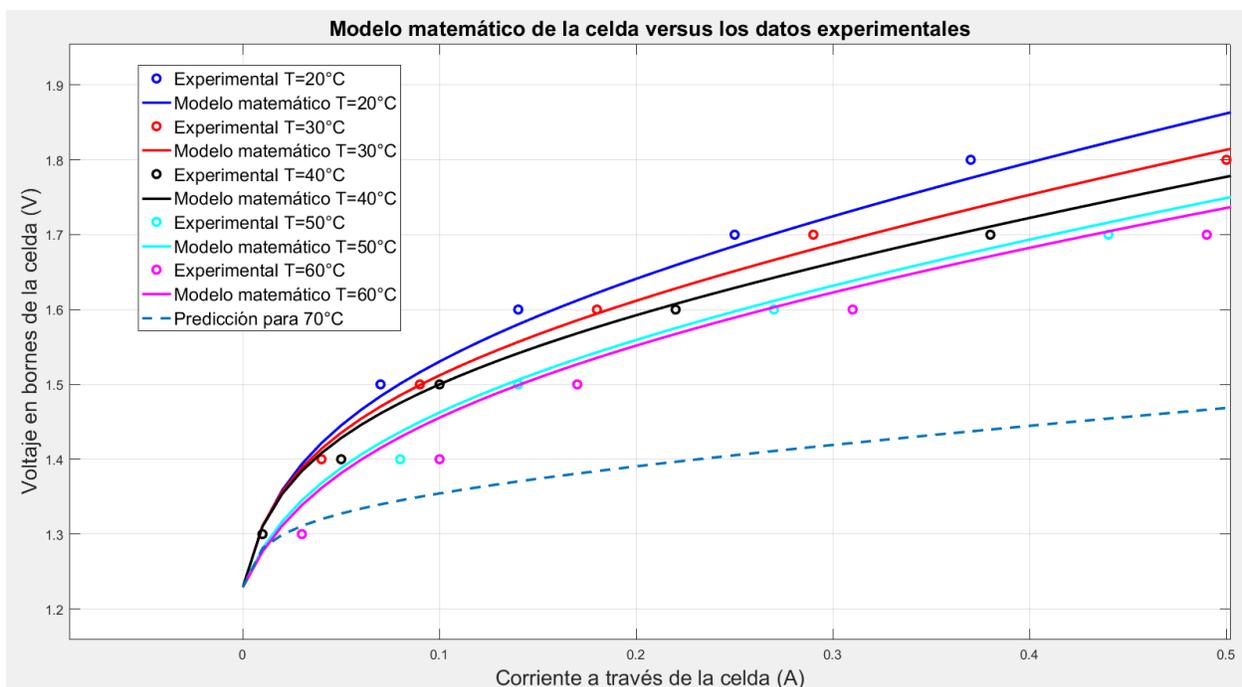


Figura 30: Zoom Figura 29.

Otro aspecto importante de mencionar con relación a la Figura 29, es la predicción de comportamiento para la temperatura del orden de los 70°C, que, si bien no se pudo generar datos asociados a esta temperatura, es una buena aproximación para efectos de estimación de parámetros de requerimiento energético.

8. Análisis teórico para la utilización de la energía solar fotovoltaica.

Para simular el comportamiento eléctrico de la celda de electrolisis en base a la corriente generada por un panel solar se debe proponer modelo matemático para ambos subsistemas. Por un lado, el modelo matemático de la celda electrolítica fue presentado en el apartado anterior, mientras que el modelo matemático del panel solar está determinado por la ecuación (20), donde los parámetros del modelo dependen de la celda o panel a utilizar. En particular, los parámetros utilizados para esta simulación del modelo matemático de la celda se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros de simulación para el panel solar.

Parámetro	Descripción	Valor
$P_{\text{máx}}$	Potencia máxima [W]	280
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto [V]	38,8
I_{sc}	Corriente de cortocircuito [A]	9,37
V_{mp}	Voltaje de máxima potencia [V]	31,6
I_{mp}	Corriente de máxima potencia [A]	8,87
c_{sc}	Coefficiente de temperatura de corriente de corto circuito [%/°C]	0,05
A	Factor de idealidad	1,3
E_{g}	Energía del semiconductor en su banda de gap [eV]	1,1
N_{s}	Numero de celdas en serie	60
N_{p}	Numero de celdas en paralelo	1
R_{s}	Resistencia serie [Ω]	0,221
R_{sh}	Resistencia en paralelo [Ω]	415,405

En Simulink, el bloque que representa el panel fotovoltaico queda manifiesto en la Figura 31, donde se pueden identificar tres entradas al sistemas, las que corresponden a temperatura del panel [°C], la irradiancia incidente en el panel [W/m²] y el voltaje del panel [V], mientras que la salida del sistema corresponde a la corriente generada [A].

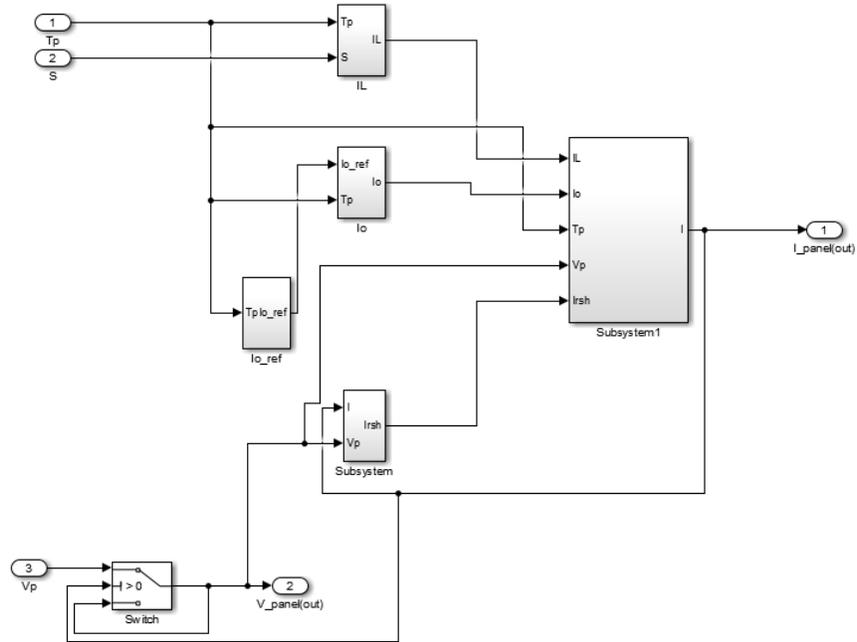


Figura 31: Bloque correspondiente al panel solar en Simulink.

Para visualizar el efecto de la irradiancia en la generacion fotovoltaica se realizan pruebas para una temperatura constante de 25°C y variando el valor de este parámetro, de manera gráfica se muestran los resultados en la Figura 32.

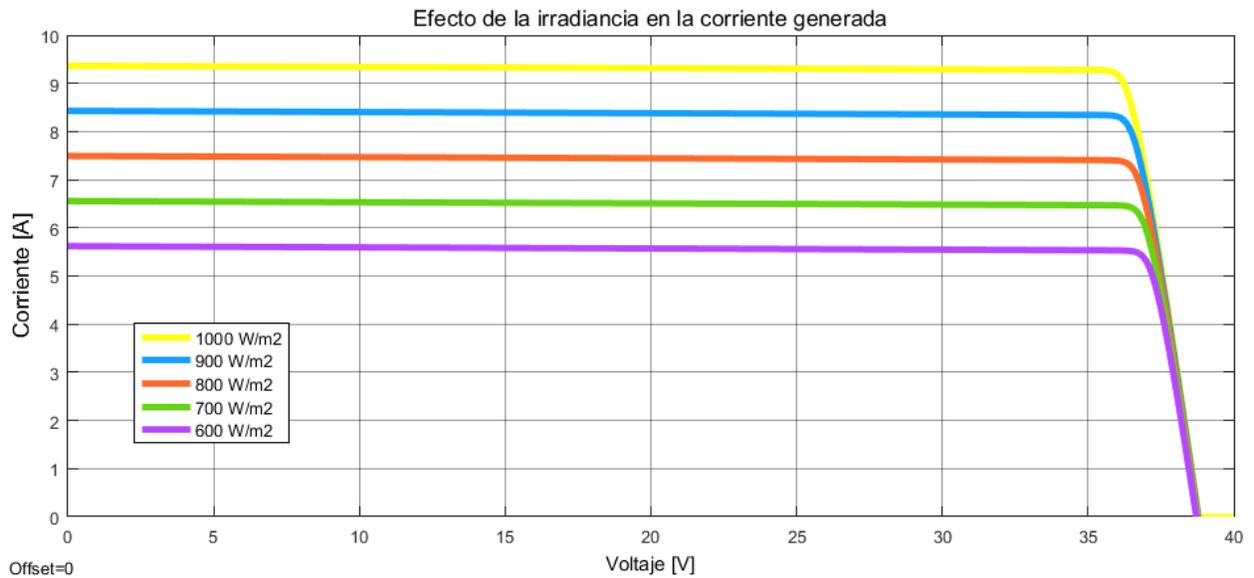


Figura 32: Corriente generada por el panel a diferentes valores de irradiancia.

Sin embargo, el comportamiento de la irradiancia depende del lugar a estudiar. En este caso, el lugar escogido corresponde a las dependencias de la Universidad de O'Higgins. Para definir el parámetro de irradiancia se recurre a la ayuda de la herramienta web denominada Explorador Solar, herramienta que proporciona datos de irradiancia y capacidad de generación para una zona en específico. A continuación, se muestra el perfil de irradiancia diario utilizando los datos geográficos de ubicación de la Universidad de O'Higgins.

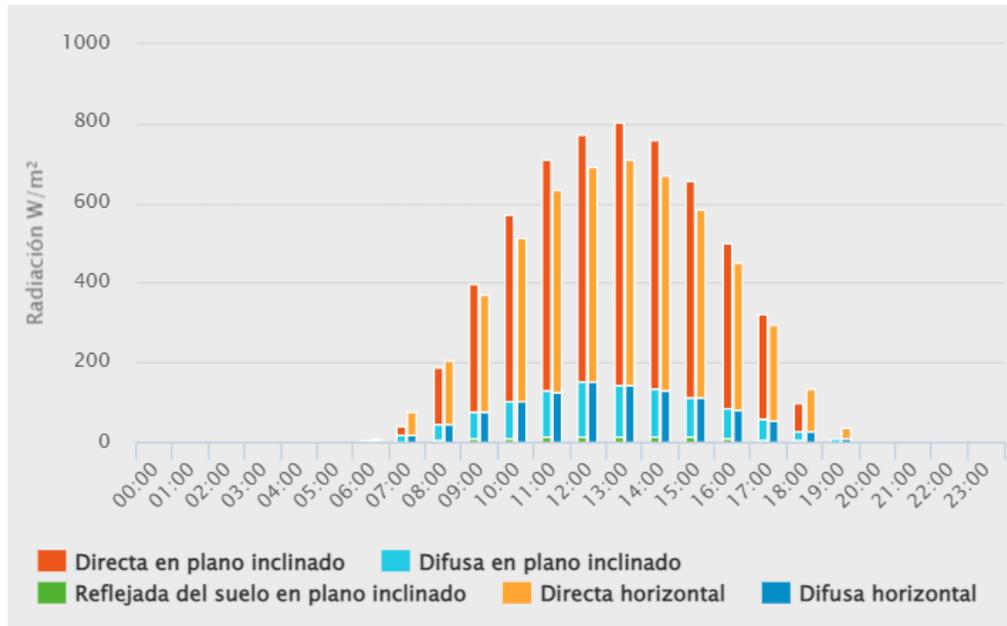


Figura 33: Irradiancia promedio diaria en la UOH [34].

Donde el término plano inclinado se refiere a montar el panel con un grado de inclinación igual a la latitud del sitio, mientras que el término horizontal hace referencia al montaje del panel de manera paralela al suelo [34].

Para utilizar un perfil diario de irradiancia válido, se realizó un ajuste de curvas basado en la suma de expresiones senoidales fundamentado en la información expresada en la Figura 33, utilizando los datos asociados a un plano inclinado. El resultado de este ajuste se muestra en la Figura 34.

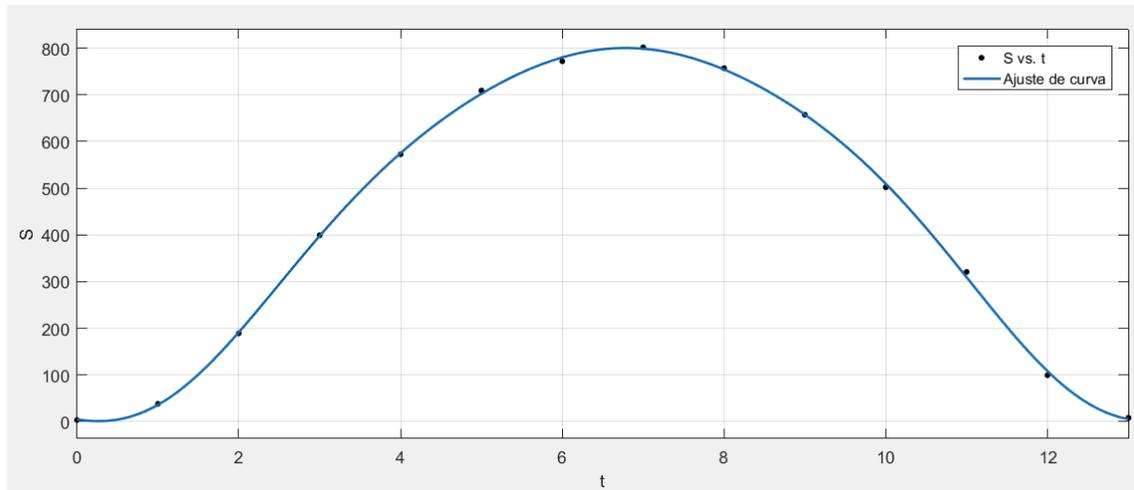


Figura 34: Resultado gráfico del ajuste de curva para la irradiancia del lugar.

En base a la Figura 34 es importante mencionar que el ajuste de ejes es en base a las horas donde se presentan valores de irradiancia, es decir, 14 horas del día, comenzando a las 6 am y terminando a las 7 pm, como se puede observar en la Figura 33. Con respecto al parámetro de la temperatura de operación de la celda, este será un parámetro de valor constante (25°C).

Definidos ambos modelos matemáticos, tanto el del electrolizador como el del panel solar, se realiza una vinculación de ambos subsistemas, con el fin de evaluar el comportamiento de la celda en función de la energía eléctrica generada por el panel solar en un día promedio. En base a esto, queda lo siguiente en Simulink.

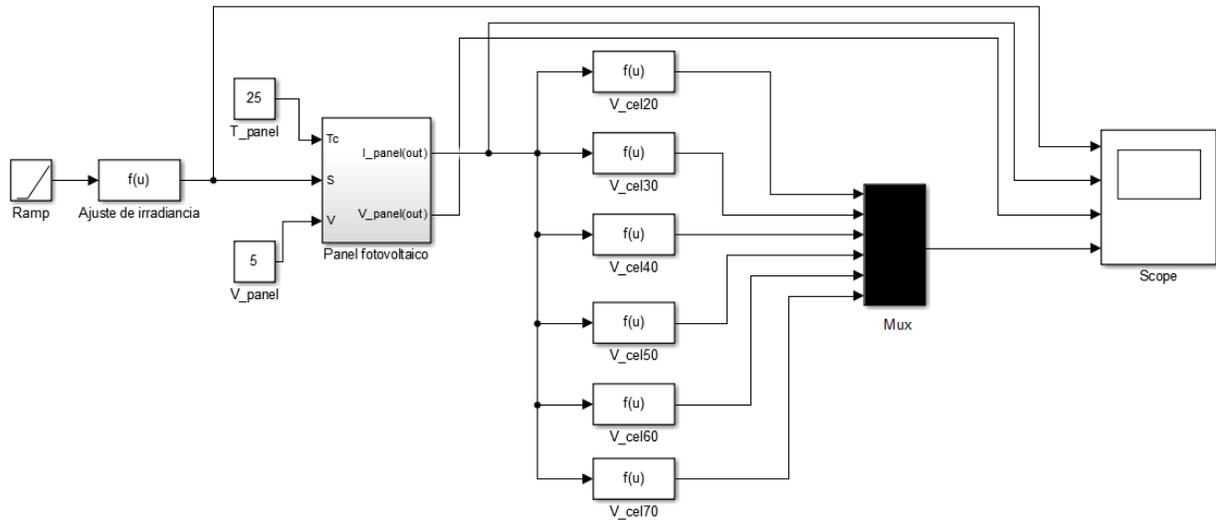


Figura 35: Vinculación de sistema de bloques de los modelos matemáticos de la celda de electrólisis y panel solar.

La Figura 35 representa la configuración en Simulink del sistema de generación de hidrógeno mediante la utilización de la energía solar fotovoltaica. Se pueden observar diferentes bloques, los que se detallan a continuación.

- Ajuste de irradiancia: corresponde al bloque que contiene la función que modela el comportamiento de la irradiancia descrito por la Figura 34.
- Panel fotovoltaico: corresponde al bloque que contiene el modelo matemático del panel solar, en función de la temperatura, la irradiancia y el voltaje de operación del panel.
- $V_{cel}(T)$: corresponde al bloque que modela el comportamiento eléctrico de la celda en función de la corriente que esta recibe. Se puede observar que se analizan temperaturas desde 20°C hasta 70°C con un paso de 10°C entre sí.
- Mux: corresponde a un bloque capaz de recibir múltiples entradas pero que las puede trabajar de manera separada entregando solo una salida.
- Scope: bloque responsable de mostrar los resultados gráficos.

El parámetro de importancia desde el panel solar es la corriente generada, por lo que es importante observar el comportamiento de esta en base a la irradiancia. Para esto y apoyado en la información presente en la Figura 32 se define un voltaje constante de operación de 5 V, ya

que para este valor de voltaje la corriente tiene un comportamiento constante donde solo influye el valor de irradiancia. Además, no es necesario utilizar un voltaje de operación relativamente alto, por el motivo de que el proceso de electrólisis requiere de bajos potenciales eléctrico.

En base a lo que se menciona en el párrafo anterior se presenta la siguiente figura que muestra como varia la corriente en función de la irradiancia.

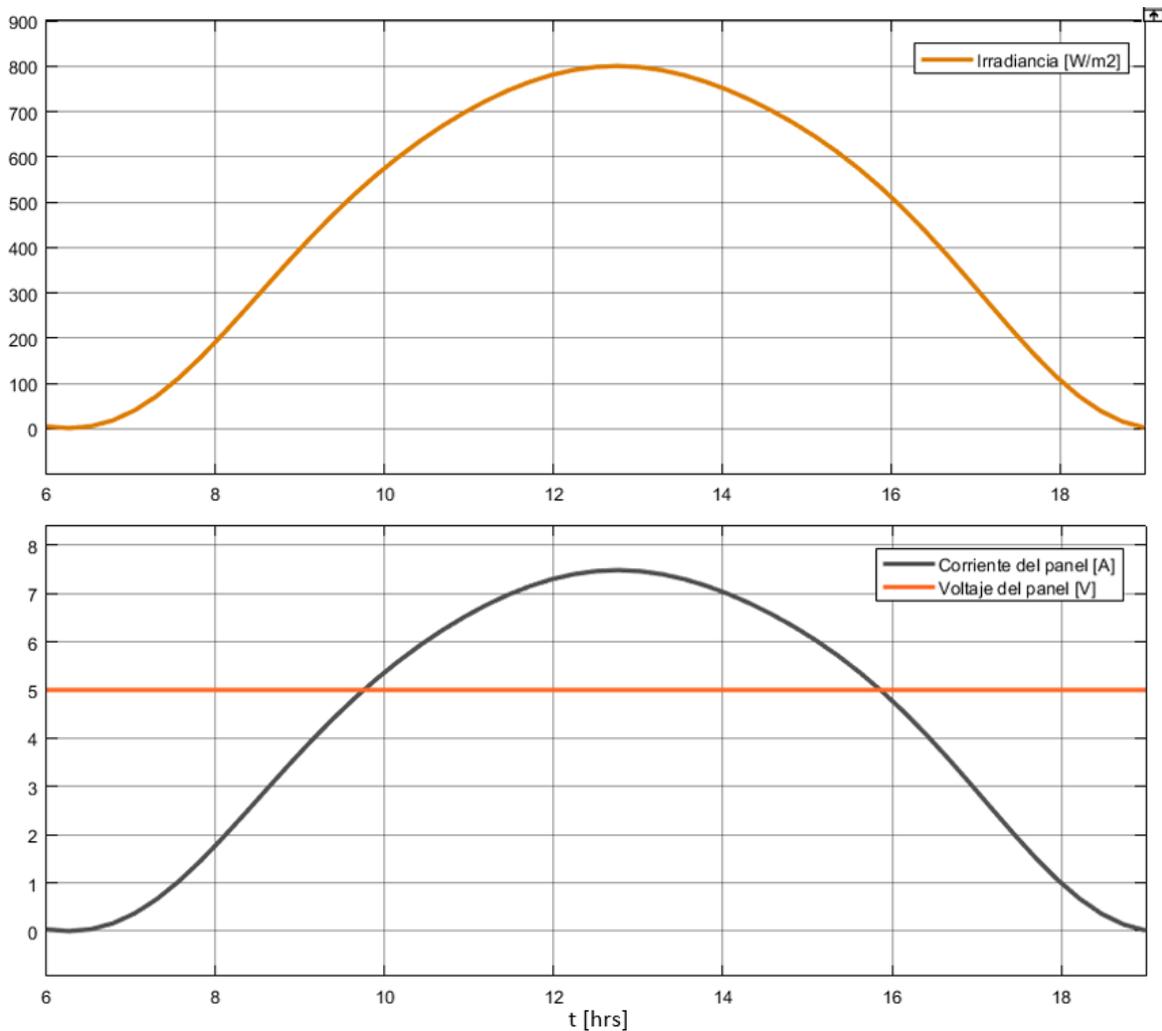


Figura 36: Comportamiento de la corriente del panel en función de la irradiancia para un voltaje constante.

Reanudando la idea principal de este apartado y con la verificación del comportamiento del panel solar como una fuente de corriente en función de la irradiancia se prosigue a vincular ambos modelos para evaluar el proceder del electrolizador durante un día promedio. Para esto se muestra la siguiente figura que relaciona la corriente de salida del panel y el voltaje en bornes de la celda electrolítica.

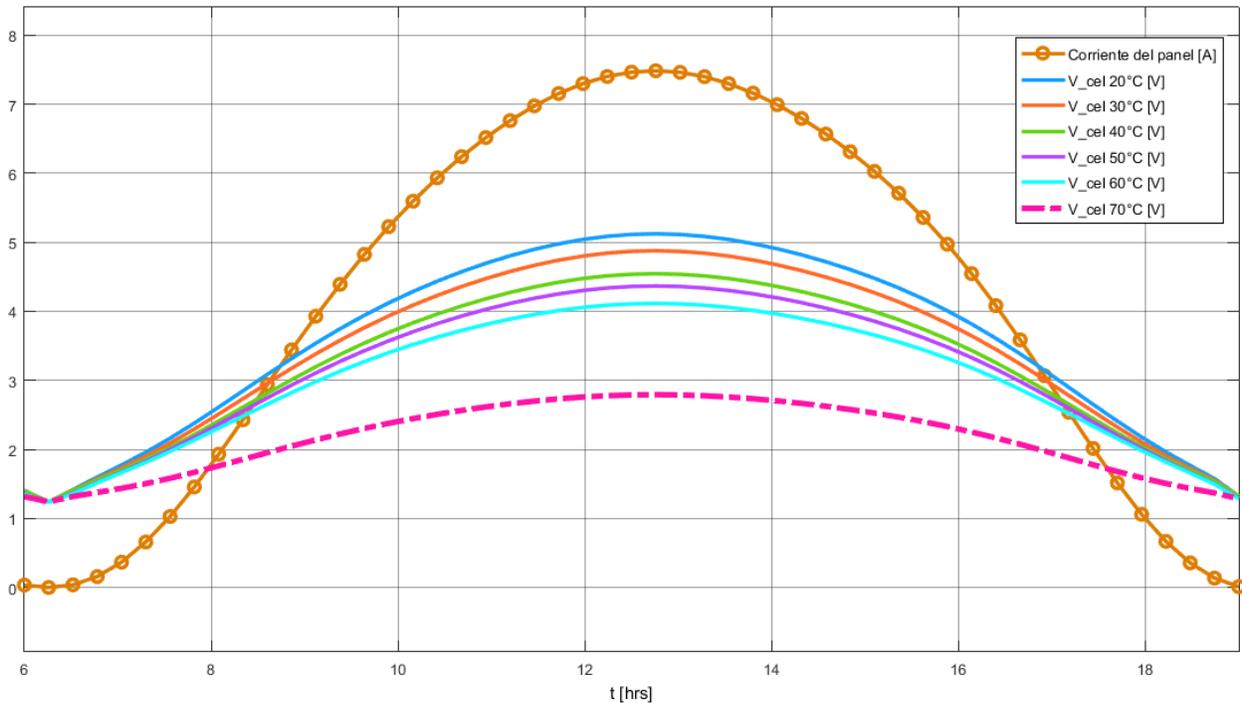


Figura 37: Comportamiento eléctrico del sistema de electrólisis en presencia de energía solar fotovoltaica.

En base a lo que se muestra en la Figura 37 se pueden mencionar ciertos puntos, el primero es notar que las curvas de voltaje para distintas temperaturas del electrolizador tienen una forma muy similar a la curva de corriente del panel solar, a diferencia de la curva asociada a la operación bajo 70°C de la celda, curva que se presenta más alisada. Otro punto destacable es que las curvas mantienen la tendencia observada en las pruebas experimentales, tendencia que apunta a que a mayor temperatura del electrolito se requiere menos energía eléctrica para producir la reacción de electrólisis debido a la disminución de los sobre voltajes, es por esta razón también que la curva asociada a 70°C es más aplanada [30]. Otro punto que mencionar sobre la información presente en la Figura 37, son los distintos puntos de operación de la celda, ya que definiendo un valor constante de corriente se puede evaluar el comportamiento de la celda a distintas temperaturas para establecer un requerimiento energético que cumpla con las condiciones que se deseen imponer. En relación con esto, la Figura 38 presenta la potencia en el electrolizador en función de la corriente que circula a través de este.

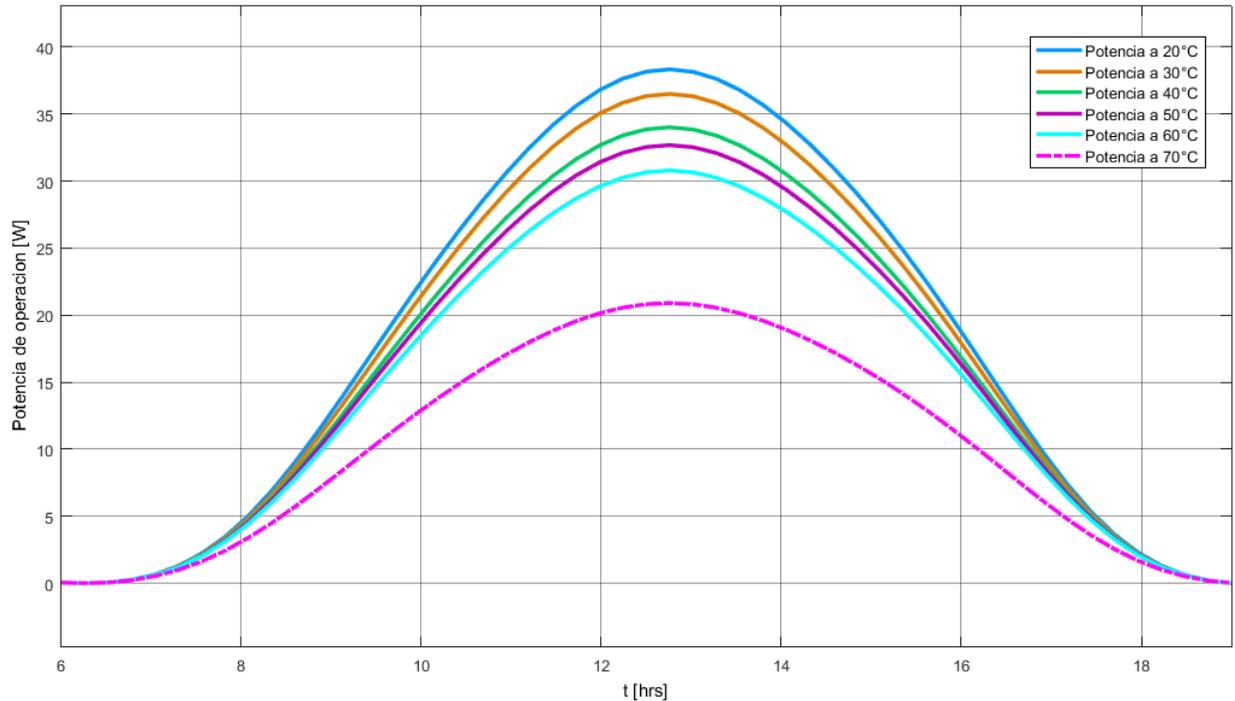


Figura 38: Potencia del sistema de electrólisis en presencia de energía solar fotovoltaica.

Se puede apreciar en la Figura 38 que, si por ejemplo se desea operar a máxima corriente desde el panel solar, hay que ubicarse en el valor máximo de cada curva, observando que para la operación del electrolizador a 20°C se necesitan 37 W de potencia nominal aproximadamente. Un caso intermedio es el de la operación del electrolizador a 60°C donde se requieren 31 W de potencia nominal aproximada y finalmente el caso de operación de una temperatura de 70°C para el electrolito, donde se necesitan 22 W aproximadamente. Visto desde otra arista, se tiene que para una corriente constante la potencia cambia, lo que implica que el voltaje cambia, esto apunta a su vez al comportamiento de los sobrevoltajes de la reacción electroquímica [35].

9. Conclusión

En este trabajo se ha diseñado y construido un electrolizador de tecnología alcalina siendo capaz de contener un par de electrodos de tamaño de 100x100 mm además de poder contener 2,7 litros de electrolito y también ser capaz de soportar temperaturas de operación de alrededor de 60°C para el electrolito.

Se realizaron pruebas de rendimiento para las diferentes configuraciones que se pudieran presentar en la celda. Comenzando con las pruebas para el material y tamaño de los electrodos disponibles bajo ciertas condiciones, resultando ser los electrodos de níquel de tamaño 100x100 mm los de mejor rendimiento.

A continuación, se realizaron pruebas de rendimiento de la utilización de una barrera divisora, donde resultó que la de menor consumo eléctrico correspondía al diafragma experimental pero que sin embargo no entregaba respaldo con respecto a la calidad de producción de hidrógeno, ya que los gases producidos solían mezclarse dentro de la celda por la poca eficacia del material dispuesto, por lo que se determinó utilizar la división de acrílico para la operación del electrolizador.

En base a la capacidad de producción de hidrógeno de la celda se puede mencionar que, bajo la configuración antes mencionada, en presencia de una corriente de valor constante igual a 3 A y manteniendo la temperatura del electrolito entre 20°C y 24°C, la generación de hidrógeno fue de 510 mL en 19:41 minutos. Entonces, se puede estimar una producción de 1500 mL en una hora aproximadamente.

La caracterización matemática utilizada para el electrolizador mediante la ecuación propuesta por el autor Ulleberg, responde de manera satisfactoria con respecto a los datos obtenidos de manera empírica en el electrolizador, por lo que se considera apropiada para predecir puntos de operación a los que no se tiene acceso empíricamente. En base a esto, se estima el comportamiento eléctrico de la celda para diferentes temperaturas con el fin de generalizar y abarcar más información del funcionamiento de la celda.

Por último, mediante la simulación del comportamiento de la celda en función de la corriente generada por un panel solar se puede obtener un perfil de consumo energético para

diferentes temperaturas de electrolito. Donde el mayor requerimiento de energía eléctrica se produce cuando la temperatura del electrolito es menor y, por el contrario, cuando la temperatura del electrolito es mayor, la energía eléctrica requerida es menor. Esto a su vez corrobora lo teórico, donde se menciona que los sobrevoltajes son mayores a una temperatura baja y viceversa.

9.1. Trabajo futuro

A continuación, se presentan una serie de ideas que tienen como objetivo proponer mejoras hacia la celda o el sistema en general, ya sea rendimiento u otro aspecto.

- Proponer un sistema capaz de controlar la temperatura del electrolito, ya que este parámetro es de mucha relevancia en la operación del electrolizador.
- Desarrollar un diafragma experimental de mejor calidad, que sea capaz de operar y no perder sus cualidades para así no afectar el rendimiento de la celda electrolítica.
- Evaluar la influencia de la separación de los electrodos en el rendimiento de la celda electrolítica.
- Realizar pruebas experimentales de la celda electrolítica en función de la corriente generada por un panel solar convencional que cumpla con las condiciones para la operación de la celda.
- Diseño de una nueva celda, que resulte más práctica para el cambio de electrodos, barreras divisoras u otro.
- Estudiar la pureza del hidrógeno producido.

10.Referencias

- [1] D. G. de la Rúa y F. D. Martín, «La domesticación del fuego durante el Pleistoceno inferior y medio: estado de la cuestión», *Veleia: Revista de prehistoria, historia antigua, arqueología y filología clásicas*, n.o 26, pp. 189–216, 2009.
- [2] Bennaceur, K., Clark, B., Orr Jr, F. M., Ramakrishnan, T. S., Roulet, C., & Stout, E., «El hidrógeno: ¿Un futuro portador energético?». Accedido: 10 de febrero de 2022.
- [3] «Informe Balance Nacional de Energía 2019», p. 65.
- [4] J. F. Torres, «Cambio climático y populismos en américa latina: un análisis comparativo de los posicionamientos de argentina, ecuador, chile y brasil en el camino al acuerdo de parís de 2015», *prometeica*, n.o 18, pp. 24–35, ene. 2019, doi: 10.24316/prometeica.v0i18.240.
- [5] Z. Abdin, A. Zafaranloo, A. Rafiee, W. Mérida, W. Lipiński, y K. R. Khalilpour, «Hydrogen as an energy vector», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, p. 109620, mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.
- [6] M. David, C. Ocampo–Martínez, y R. Sánchez–Peña, «Advances in alkaline water electrolyzers: A review», *Journal of Energy Storage*, vol. 23, pp. 392–403, jun. 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.03.001.
- [7] I. Abe, «Physical and Chemical Properties of Hydrogen», p. 3.
- [8] A. Godula–Jopek, *Hydrogen Production: by Electrolysis*. John Wiley & Sons, 2015.
- [9] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, y W. I. F. David, «Hydrogen energy», *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 365, n.o 1853, pp. 1043–1056, abr. 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1965.
- [10] K. Harrison y J. I. Levene, «Electrolysis of Water», en *Solar Hydrogen Generation*, K. Rajeshwar, R. McConnell, y S. Licht, Eds. New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 41–63. doi: 10.1007/978-0-387-72810-0_3.
- [11] O. E. S. Alegre, P. A. M. Araya, J. S. Sanchez, y R. M. Vieyra, «ANÁLISIS CONCEPTUAL, CONSTRUCTIVO Y EXPERIMENTAL DE UN ELECTROLIZADOR CON DIFERENTES ELECTRODOS, PARA LA OBTENCION DE HIDRÓGENO DESDE AGUA PURA Y SALADA», p. 65. 71

- [12] I. Herraiz Cardona, «Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua.», Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2012. doi: 10.4995/Thesis/10251/16804. 71
- [13] Derick Fabricio Zeceña Navas, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN ELECTROLIZADOR PARA SU APLICACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE». Accedido: 30 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/15507/1/Derick%20Fabricio%20Zece%C3%B1a%20Navas.pdf>
- [14] M. M. Rashid, M. K. A. Mesfer, H. Naseem, y M. Danish, «Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis».
- [15] H. A. Khater, A. A. Abdelraouf, y M. H. Beshr, «Optimum Alkaline Electrolyzer–Proton Exchange Membrane Fuel Cell Coupling in a Residential Solar Stand–Alone Power System», *ISRN Renewable Energy*, vol. 2011, pp. 1–13, nov. 2011, doi: 10.5402/2011/953434.
- [16] Ramírez, J. L., «Modelo dinámico de un electrolizador alcalino». Accedido: 8 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4703/fichero/Modelo+dim%C3%A1nico+de+un+electrolizador+alcalino.pdf>
- [17] J. Chi y H. Yu, «Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production», *Chinese Journal of Catalysis*, vol. 39, n.o 3, pp. 390–394, mar. 2018, doi: 10.1016/S1872–2067(17)62949–8.
- [18] E. Zoulias, E. Varkaraki, N. Lymberopoulos, C. N. Christodoulou, y G. N. Karagiorgis, «A REVIEW ON WATER ELECTROLYSIS», p. 19.
- [19] M. Wang, Z. Wang, X. Gong, y Z. Guo, «The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 573–588, ene. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.090.
- [20] Fabrega, E., «Desarrollo de un modelo de funcionamiento de electrolizadores alcalinos autopresurizados, para la optimización de su sistema de control (Master's thesis, Universitat

72 Politècnica de Catalunya).». Accedido: 8 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/332806/memoria-tfmericfabrega.pdf?sequence=1&isAllowed=y> 72

- [21] Ulleberg, Ø., «Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, n.o 1, pp. 21–33, ene. 2003, doi: 10.1016/S0360-3199(02)00033-2.
- [22] E. Granda-Gutiérrez, O. Orta, J. C. Díaz-Guillén, M. Jiménez, M. Osorio, y M. Gonzalez Albarrán, *MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES*. 2013. doi: 10.13140/2.1.4192.8968.
- [23] J. J. Silva et al., «MPC Algorithm With Reduced Computational Burden and Fixed Switching Spectrum for a Multilevel Inverter in a Photovoltaic System», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 77405–77414, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988627.
- [24] S. Miri y M. Nedeljkovi, «THE SOLAR PHOTOVOLTAIC PANEL SIMULATOR», p. 9.
- [25] S. Obukhov, I. Plotnikov, y M. Kryuchkova, «Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 132, p. 012017, jun. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/132/1/012017.
- [26] Ulleberg, Ø., «Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems.». Accedido: 30 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/353163>
- [27] A. A. Quispe, «PROYECTO DE INGENIERÍA: ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO», p. 72, 2016.
- [28] «Laminados en Caliente laminado en frío 304 310 316 Hoja de acero inoxidable Espejo y la placa – GoldAgent». <https://www.gold-agents.com/product.aspx?id=13924048> (accedido 9 de noviembre de 2021).
- [29] H. Suffredini, «Recent developments in electrode materials for water electrolysis», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 25, n.º 5, pp. 415–423, may 2000, doi: 10.1016/S0360-3199(99)00049-X.

- [30] Rodríguez, R. G., «DISEÑO DE ELECTROLIZADOR CON EFICIENCIA ÓPTIMA PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO INDUSTRIAL.». Accedido: 5 de enero de 2022.
- [31] L. E. Martínez Toledo, «Desarrollo de un electrolizador alcalino mono polar con diafragma de materiales alternativos», 2019.
- [32] Y. Sanath, K. De Silva, P. H. Middleton, y M. Kolhe, «Performance Analysis of Single Cell Alkaline Electrolyser Using Mathematical Model», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 605, p. 012002, ago. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/605/1/012002.
- [33] A. G. Picó, *Química básica*. Editorial UNED, 2018.
- [34] «reporteMeteo_DUZ7EA8.pdf». Accedido: 7 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: https://solar.minenergia.cl/temp/reporteMeteo_DUZ7EA8.pdf
- [35] R. Bhattacharyya, A. Misra, y K. C. Sandeep, «Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis», *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 1-13, feb. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.11.057.

11. Anexos

11.1. Anexo 1

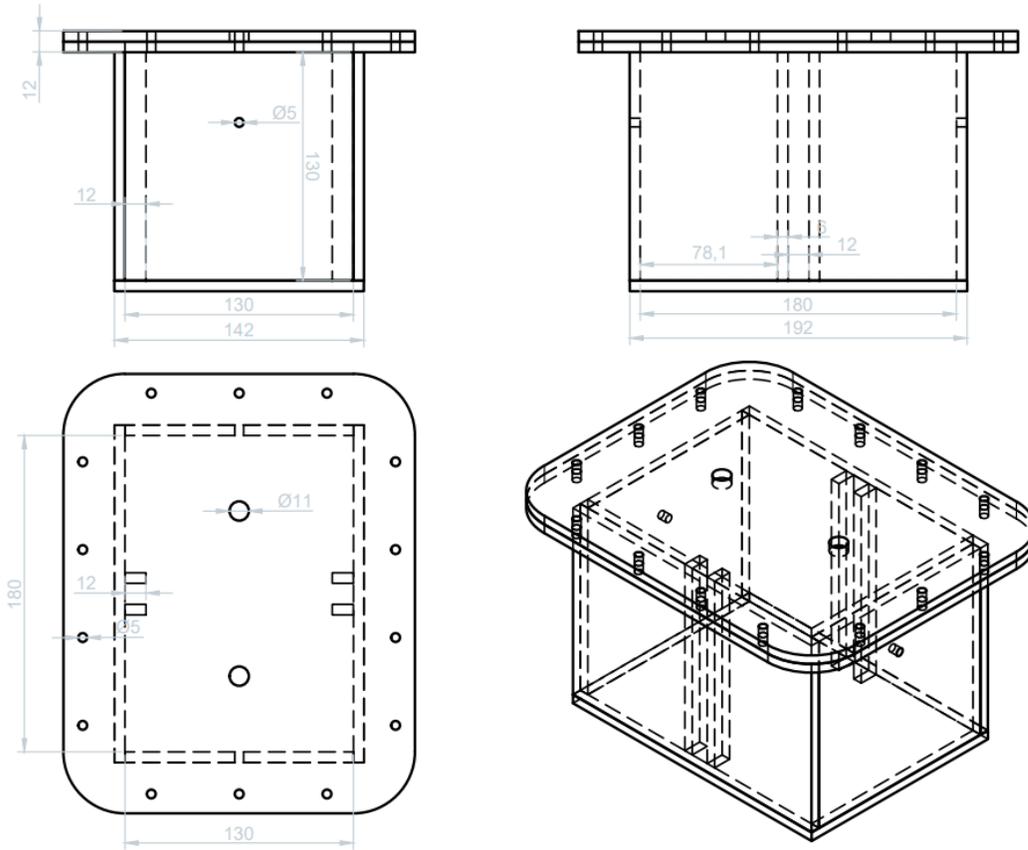


Figura 39: Planos de la celda en AutoCAD.

11.2. Anexo 2

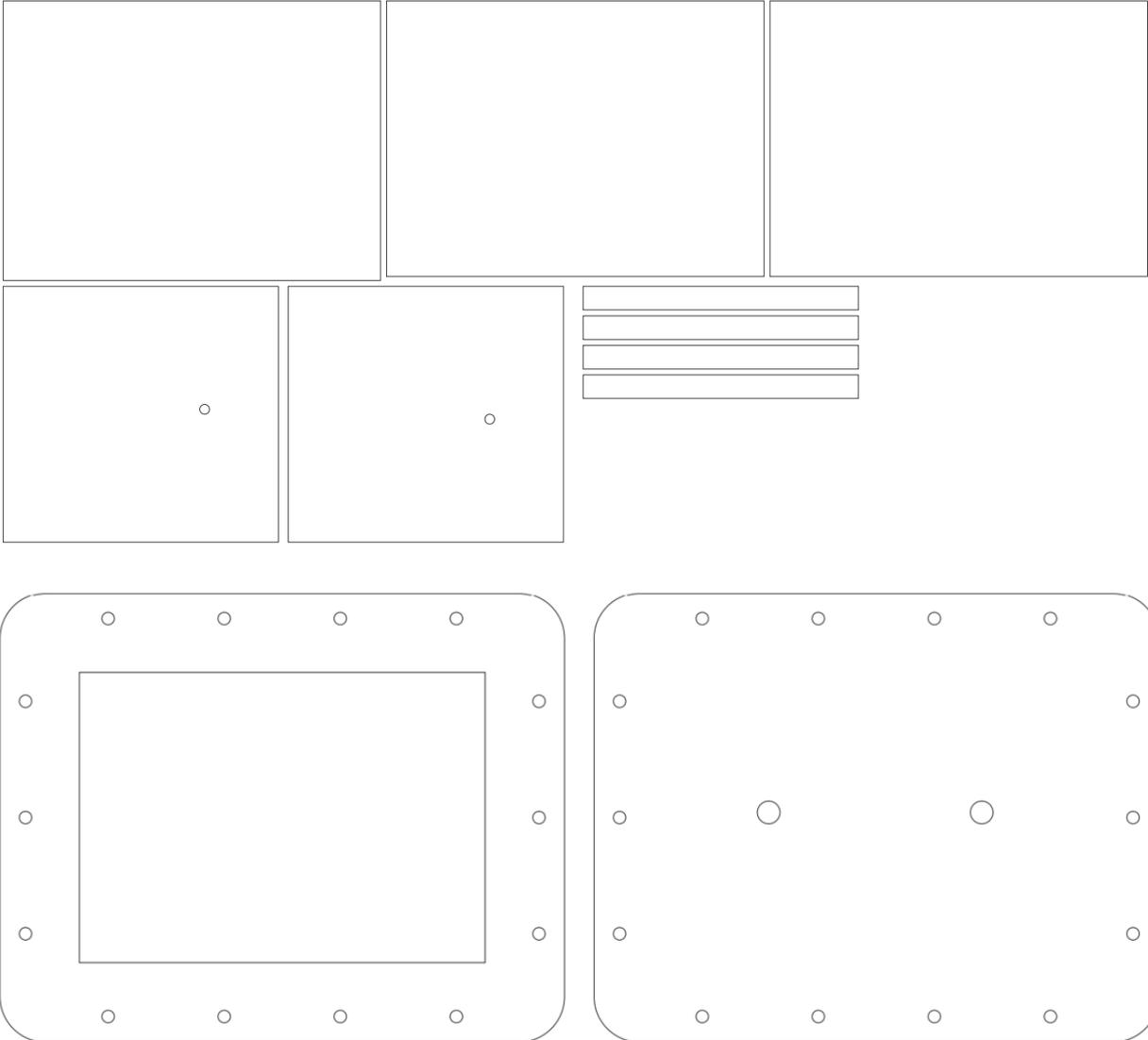


Figura 40: Planos para corte en herramienta EPILOG.

11.3. Anexo 3

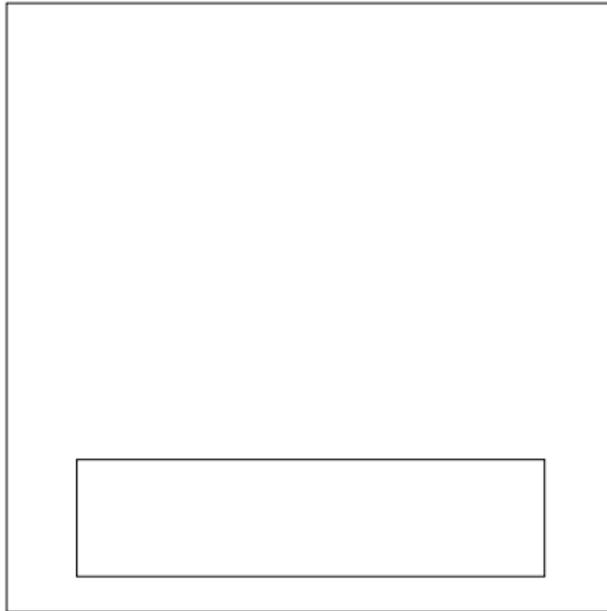


Figura 41: Plano de corte para división de acrílico.

11.4. Anexo 4



Figura 42: Plano de corte para marco de diafragma experimental.