

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E**  
**INDUSTRIAS EXTRACTIVAS**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO**  
**Y LA INFLUENCIA DEL DISEÑO DEL SEPARADOR DE FASES**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO  
INDUSTRIAL

PRESENTA

PABLO YEDRA AVIÑA

ASESOR

Dr. Rosa de Guadalupe González Huerta



CIUDAD DE MÉXICO 2021

**Folio**

T-DEySA-062-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**

Autorización de tema

CDMX, 12 de octubre de 2021

**Pasante**

**Pablo Yedra Aviña**  
**PRESENTE**

**Boleta**  
**2012320938**

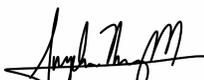
**Programa Académico**  
**I.Q.I.**

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza a la **Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta** sea asesora en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

**"Análisis del desempeño de un electrolizador alcalino y la influencia del diseño del separador de fases"**

- Resumen
- Justificación
- Objetivos
- I. Antecedentes
- II. Metodología Experimental
- III. Análisis de resultados
- Conclusiones
- Referencias Bibliográficas
- Nomenclatura

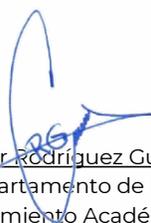
De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.



M. en C. Angelica Núñez Merchán  
Presidenta de la Academia de  
Ingeniería de Procesos



Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta  
Directora



Ing. César Rodríguez Guerrero  
Jefe del Departamento de Evaluación  
y Seguimiento Académico.



M. en C. Isaura García Maldonado  
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp



**Folio**  
T-DEySA-062-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**  
Autorización de Impresión

CDMX, a 18 de noviembre de 2021

**Pasante**  
**Pablo Yedra Aviña**  
**PRESENTE**

**Boleta**  
**2012320938**

**Programa Académico**  
**I.Q.I.**

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

**"Análisis del desempeño de un electrolizador alcalino y la influencia del diseño del separador de fases"**

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente  
**JURADO**

M. en E. Blanca Zamora Celis  
Presidenta

Ing. José María Daniel Estrada Guerrero  
Secretario

Dra. Martha Leticia Hernández Pichardo  
Vocal 1

Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta  
Vocal 2

Dr. Rodolfo Antonio Aguilar Escalante  
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.  
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.  
CRG/mlcp.





**Folio**

T-DEySA-062-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional  
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"  
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas  
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

**Asunto**

Cesión de derechos

CDMX, a 18 de noviembre de 2021

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

El que suscribe: **Pablo Yedra Aviña** estudiante del Programa de: **Ingeniería Química Industrial** con número de Boleta: **2012320938**, manifiestan que es autor intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección de la profesora **Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta**, cede lo derechos del trabajo **"Análisis del desempeño de un electrolizador alcalino y la influencia del diseño del separador de fases"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección de correo electrónico [rgonzalez@ipn.mx](mailto:rgonzalez@ipn.mx) y [yedrapablo@gmail.com](mailto:yedrapablo@gmail.com) el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Atentamente

Pablo Yedra Aviña  
Nombre y Firma  
Del estudiante

Dra. Rosa de Guadalupe González Huerta  
Nombre y Firma  
De la directora



## Agradecimientos

*A Dios, por la vida, porque con sus dones y virtudes fue posible llegar hasta este punto.*

*A mis padres, por darme el apoyo necesario y la educación que se requiere para ser un buen ciudadano, gracias por ese ejemplo de vida.*

*A mi tía Mary, por darme el afecto y el apoyo para no rendirme ante las circunstancias.*

*A mis hermanos, por acompañarme en mi vida y su ayuda incondicional.*

*A mi asesora, la Doctora Rosa de Guadalupe, por su guía y por darme la oportunidad de trabajar en mi institución y en este proyecto.*

*A mi escuela, la ESIQIE del IPN y a sus docentes, por todo el conocimiento, educación y oportunidades que me brindaron a lo largo de mi carrera.*

*Se agradece al IPN por el apoyo financiero otorgado al proyecto Multired 2024 (2019- 2021) denominado “Escalamiento y validación técnico-comercial del desarrollo tecnológico de generadores de hidrógeno utilizados para la combustión dual hidrógeno-hidrocarburos. Y al proyecto de innovación 20212105 2021-2022, Planta piloto de manufactura de electrodos modificados para transferencia tecnológica de electrolizadores alcalinos que generan hidrógeno verde, ESIQIE.*

*Se agradece al CONACYT por el apoyo otorgado a los siguientes proyectos:*

*1) CEMIE-Océano 249795: Línea Transversal I-LT1 Tecnologías y estrategias de interconexión eléctrica de energías del océano para el mar Territorial Mexicano, por el apoyo económico asignado a mi persona gracias al cual pude concluir esta tesis*

*2) Ciencia Básica referencia A1-S-15770 (2019-2022) denominado “Desarrollo de un sistema de gestión de energía renovable solar y del océano, considerando como sistema de regulación el hidrógeno y baterías Ion-Li”.*

## Resumen

El hidrógeno puede contribuir a sustituir parcialmente a los combustibles fósiles para la generación de energía, considerando “verde” cuando se produce por electrólisis del agua integrada a energía renovables, donde al final del proceso no se generan gases de efecto invernadero. Para esto, la electrólisis alcalina del agua es una tecnología madura, pero aún se debe mejorar su costo y eficiencia. El electrolizador contiene un electrolito alcalino y dos electrodos, un cátodo y un ánodo, donde se genera hidrógeno y oxígeno gaseosos respectivamente; cuando no hay una membrana entre los electrodos se genera la mezcla de ambos gases, que se denomina en este trabajo gas oxihidrógeno, lo anterior da simplicidad al diseño y bajo costo del electrolizador, pero tiene limitaciones en su uso en sitio del gas generado. El electrolizador se integra a un depósito recirculador de electrolito, donde se lleva a cabo la separación del electrolito y los gases producidos, este dispositivo regula la temperatura y la pureza de los gases generados, así mismo aumenta la eficiencia del sistema. Si el hidrógeno con trazas de electrolito es alimentado a los sistemas de combustión dual, genera procesos de corrosión y baja eficiencia térmica en los motores de combustión interna y en quemadores atmosféricos. Por otro lado, no se tienen antecedentes para determinar el arrastre de electrolito, por lo que en este trabajo se propuso una forma indirecta midiendo la conductancia del agua del burbujeador ubicado a la salida del separador de fases.

En este proyecto se estableció un protocolo para analizar dos depósitos separadores de fases (SF) con diferentes sistemas de refrigeración, uno con enchaquetado y quita niebla; y otro con serpentín interno y así determinar con cual se obtiene un flujo de gas con menor arrastre de electrolito. Se realizaron experimentos utilizando un electrolizador de prueba de baja potencia, con un electrolito de NaOH al 5 % peso, a temperaturas de 30 y 40 °C. El electrolizador se operó 59 h a 16 A. La curva de desempeño (corriente aplicada vs voltaje demandado) se obtuvo cada 5 h antes y después de la operación continua, aplicando pulsos de corriente entre 4 y 20 A. Para determinar el arrastre de electrolito se generó una gráfica normalizada de concentración contra conductividad de una solución de NaOH (del 0.00001 N a 0.1 N) y se midió la conductividad del agua de burbujeo de gases a la salida del separador de fases. Con ambos separadores se obtuvieron eficiencias de voltaje entre el 20 y 55 % y valores de concentración de electrolito en el agua de burbujeo de los gases menores a 0.1 N (2070  $\mu$ S). El separador con enchaquetado disminuye el arrastre de electrolito en los gases, debido al quita niebla que tiene. Por otro lado, el separador con serpentín no requiere temperaturas mayores a 28 °C en el agua de enfriamiento y favorece la eficiencia global. Se incrementó un 4% la eficiencia del electrolizador respecto a la obtenida con el separador cilíndrico que se tenía como referencia. Este trabajo sirve de base para integrar un sistema de electrólisis que se está desarrollando en colaboración con la empresa EUROWELDING, lo cual ayudará al desarrollo de una industria nacional para comercializar electrolizadores.

## Justificación

La demanda energética de las sociedades actuales depende en gran medida de los combustibles fósiles, los cuales son no renovables y si contaminantes. Para poder cubrir esta demanda global de energía de manera sustentable se necesita el uso de diferentes tipos de combustibles limpios. En México el hidrógeno se considera una energía limpia desde 2014 en la Ley de la industria eléctrica y en el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2020-2034) se incluye el uso del hidrógeno verde en sistemas de ciclos combinados para la generación de electricidad. La generación de hidrógeno verde está comprometida con el proceso de electrólisis de agua interconectado con energías renovables. De las diferentes tecnologías de electrolizadores, los alcalinos ofrecen una alternativa sustentable y económica, ya que no usa metales nobles en sus electrodos, pero se necesita mejorar la pureza del hidrógeno y su consumo energético. Para fomentar la creación de una industria nacional y poder escalar equipos a nivel industrial a costos competitivos, evitando los gastos de importación que llegan a representar hasta el 80% del costo global de los dispositivos, se necesitan establecer protocolos de caracterización.

El proyecto multired en el que se enmarca este trabajo es el SIP-2024 (2019-2021) denominado “Escalamiento y validación técnico-comercial del desarrollo tecnológico de generadores de hidrógeno utilizados para la combustión dual hidrógeno-hidrocarburos”. La pureza del gas oxihidrógeno (mezcla de  $H_2$  y  $O_2$ , 2:1) es de suma importancia, puesto que, al tener trazas de electrolito se pueden dañar los equipos utilizados para la producción de energía como las turbinas de gas y los motores de combustión interna, donde se generan procesos de corrosión y una disminución en la eficiencia energética.

En este trabajo, se propuso una técnica sencilla y barata para determinar el arrastre de electrolito utilizando un método indirecto, midiendo la conductancia del agua de burbujeo de gases colocada después del separador de fases, la cual se monitorea antes y después de cada experimentación. Para determinar esto en el primer capítulo se describe el principio de operación de un sistema de electrólisis alcalina y su curva de desempeño, se dan los antecedentes de estado actual de México en la implementación de las tecnologías del hidrógeno y se describe la importancia de contribuir en el desarrollo de una industria nacional en la manufactura de electrolizadores. En el segundo capítulo se describe la metodología experimental, enfatizando el proceso de caracterización del electrolizador con distintos separadores de fases y la medición del arrastre de electrolito. En el capítulo tres se describen las curvas de desempeño y se determina la concentración del agua de burbujeo utilizando la técnica propuesta en este trabajo midiendo la conductancia. Se dan las conclusiones, determinando que el separador con enchaquetado genera un menor arrastre de electrolito. Finalmente se dan las expectativas y se enumeran las referencias consultadas.

# Objetivos

## Objetivo General

Analizar la influencia del separador de fases en el arrastre de electrolito y en el desempeño del electrolizador alcalino.

## Objetivos Específicos

- Obtener la curva de desempeño de un stack de electrólisis alcalina a diferentes condiciones.
- Determinar la relación de concentración y conductividad en un sistema de burbujeo de gas oxihidrógeno.
- Determinar la eficiencia de voltaje y de corriente en distintos puntos de operación de stack de electrólisis alcalina.
- Analizar el comportamiento de un stack de electrólisis alcalina con diferentes diseños del proceso de refrigeración en el separador de fases.
- Determinar el punto óptimo de operación de un stack de electrólisis alcalina en referencia al arrastre de electrolito generado.
- Desarrollar una metodología para la determinación indirecta de arrastre de electrolito en los gases producidos para un sistema de electrólisis alcalina.
- Generar un protocolo para la caracterización de un sistema de electrólisis alcalina experimental

## Índice

Resumen.....	III
Justificación.....	IV
Objetivos .....	V
Objetivo General .....	V
Objetivos Específicos .....	V
Nomenclatura.....	VIII
CAPÍTULO I “ANTECEDENTES” .....	1
1.1 HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE ALTERNO .....	2
1.1.1 GENERALIDADES.....	2
1.1.2 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO .....	3
1.1.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO .....	5
1.1.4 APLICACIONES .....	6
1.2. ELECTROLIZADOR ALCALINO .....	7
1.2.3 EFICIENCIA.....	11
1.2.4 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS ALCALINA .....	12
1.4 SEPARADOR DE FASES .....	16
1.5 PROBLEMÁTICA EN LOS DISEÑOS ACTUALES DE LOS ELECTROLIZADORES ALCALINOS.....	21
CAPÍTULO II “METODOLOGÍA EXPERIMENTAL” .....	27
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS.....	29
2.2 PLAN DE ENSAYOS.....	31
2.3 METODOLOGÍAS DE EXPERIMENTACIÓN .....	31
2.3.1 GENERACIÓN DE LA CURVA ESTÁNDAR DE CONCENTRACIÓN CONTRA CONDUCTIVIDAD .....	31
2.3.2 VERIFICACIÓN DE AUSENCIA DE FUGAS .....	32
2.3.3 PREPARACIÓN DEL AGUA DEL BURBUJEADOR.....	33
2.3.4 MONTAJE DEL STACK DE ELECTRÓLISIS ALCALINA.....	33
2.3.5 OPERACIÓN DEL STACK DE ELECTRÓLISIS PARA LA EXPERIMENTACIÓN.	34
2.3.6 GENERACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE VOLTAJE CONTRA CORRIENTE.....	36

2.3.7 DETERMINACIÓN DEL ARRASTRE DE ELECTOLITO EN EL AGUA DEL BURBUJEADOR.....	37
2.3.8 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN .....	37
2.4 BALANCE DE PLANTA.....	37
2.4.1 ARREGLO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO .....	40
CAPITULO III “ANÁLISIS DE RESULTADOS” .....	44
3.1 GENERACIÓN DE LA GRÁFICA DE CONDUCTIVIDAD CONTRA CONCENTRACIÓN .....	45
3.2 OBTENCIÓN DEL PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN.....	46
3.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ELECTROLIZADOR ALCALINO.....	48
3.4 OPERACIÓN CONTINUA .....	50
3.5 RELACIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA DEL REACTOR CON EL VOLTAJE REQUERIDO .....	51
3.5.1 PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS .....	51
3.5.2 SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS.....	54
3.5.3 TEMPERATURA EN EL AGUA DE ENFRIAMIENTO .....	56
3.6 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE BURBUJEO .....	58
3.6.1 PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS .....	58
3.6.2 SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS.....	59
3.6 EFICIENCIA DE VOLTAJE .....	61
3.7 CONCLUSIONES .....	63
REFERENCIAS.....	64
Productividad .....	66

## Nomenclatura

### Constantes

F Constante de Faraday  $\approx 96485,3383$   
 $C \cdot mol^{-1}$

g aceleración de la gravedad  $32.16 \text{ ft} \cdot \text{s}^{-2}$

R constante de gases ideales  $8.314$   
 $J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$

### Subíndices y Superíndices

act Activación

conc Concentración

e Global, referido a la eficiencia

F Faraday

I limitaciones del transporte de masa,  
referido al sobrevoltaje de concentración

ohm Óhmico

prod Producido

° Condiciones estándar (298.15 K, 1 atm)

rev Reversible

T Total

teo Teórico

tn Termoneutro

V Voltaje

$V_{act}$  Voltaje de activación

### Letras Griegas

$\alpha$  Coeficiente de transferencia de carga

$\eta$  Eficiencia

### Símbolos

$C_D$  Coeficiente de arrastre

$C_e$  Consumo energético,  $k \cdot \text{Wh} \cdot \text{Nm}^{-3}$

$d_p$  diámetro de una gota de líquido esférica,  
ft

$F_d$  Fuerza de arrastre, lb

$i$  Densidad de Corriente

$i_L$  Densidad de corriente límite

$I$  Corriente aplicada, l

$k$  Conductividad,  $\mu S$

$PM_i$  peso molecular,  $g \cdot \text{mol}^{-1}$

min minutos

$\dot{m}$  flujo de masa,  $g \cdot \text{s}^{-1}$

$N$  Concentración, N

$R_T$  resistencia total zona óhmica

$Q$  Calor, kJ

$T$  Temperatura, °C o K

$V$  Voltaje, V

$v_t$  Velocidad de asentamiento ( $\text{ft} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$z$  Número de electrones transferidos en la  
electrólisis del agua ( $2 e^-$ )

$\rho_c$  Densidad de la fase continua ( $\text{lbm} \cdot \text{ft}^{-3}$ )

$\rho_g$  Densidad del gas a la temperatura y  
presión del separador ( $\text{lbm} \cdot \text{ft}^{-3}$ )

$\rho_p$  Densidad de las gotas de líquido ( $\text{lbm} \cdot \text{ft}^{-3}$ )

$\mu_g$  Viscosidad del gas ( $\text{lbm} \cdot \text{ft}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Delta G$  Energía libre de Gibbs,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

$\Delta H$  Entalpía,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

$\Delta S$  Entropía,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$  o  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

# CAPÍTULO I “ANTECEDENTES”

## 1.1 HIDRÓGENO: COMBUSTIBLE ALTERNO

### 1.1.1 GENERALIDADES

En los últimos años el consumo de energía y la generación de gases de efecto invernadero han estado relacionados con el desarrollo económico global. La mayor parte de la energía es generada a partir de combustibles fósiles, como el petróleo y el gas natural, así como del carbón y de fuentes de energía nuclear. Las energías renovables contribuyen aproximadamente con un 15% global al desarrollo sustentable para el abastecimiento de energía y han ido reemplazando gradualmente las formas convencionales de generación de energía, aunque se necesita una implementación más rápida para el uso generalizado de energías renovables en todos los sectores: móvil, residencial e industrial, para dejar la dependencia hacia los combustibles fósiles y mejorar el ambiente.

La clasificación de las energías renovables según la Agencia Internacional de Energía es: solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica y biomasa, en México la meta que se espera alcanzar para el año 2024 es que el 25% de la energía eléctrica producida en el país provenga de energías limpias, las cuales están definidas en la Ley de la Industria eléctrica [1,2].

En el año 2015 México tenía 16,665 MW de capacidad instalada de generación de energía eléctrica proveniente de energías renovables, como se muestra en la Tabla 1.1 [2].

*Tabla 1.1 Capacidad instalada y generación [2]*

Fuente	MW	GWh/a
Hidráulica	12,474	36,991
Eólica	2,621	7,676
Geotérmica	858	6,027
Biomasa	647	1,414
Solar	65	62
Total general	16,665	52,170

En 2017 las fuentes renovables alcanzaron un 9.5% de la producción de energía primaria en México, abastecimiento en mayor medida al sector transporte del país, y ha ido aumentando gradualmente con el paso de los años. En la Figura 1.1 se muestra el porcentaje de producción de energía en el año 2017 [1].

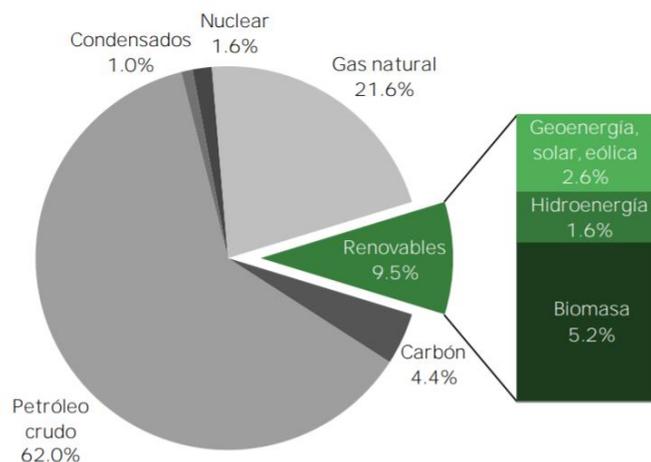


Figura 1.1 Estructura de producción de energía primaria [1]

Un punto para considerar de las energías renovables es que dependen de las características geográficas y climatológicas de la región donde se producen, puesto que son intermitentes y no en todos los lugares son aptos para su aplicación [3]. Esto hace necesario utilizar diferentes medios para almacenar la energía producida por estas tecnologías verdes. La generación de hidrógeno por rompimiento de la molécula de agua es una alternativa sustentable para la producción y almacenamiento de energía [4,5], para luego ser utilizada en transporte, la calefacción o la electrificación en plantas de energía [3]. También se están considerando aplicaciones de enriquecimiento parcial de hidrógeno en líneas de gas natural y para procesos industriales como los fertilizantes.

### 1.1.2 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y el más abundante en el universo y en la tierra, está presente en todos los compuestos orgánicos y en muchas sales y minerales. A condiciones estándar (25 °C y 1 atm) el hidrógeno es un gas inodoro, incoloro, insípido, no tóxico y menos denso que el aire.

El hidrógeno es una energía secundaria, así como la electricidad es un vector energético, es decir, un portador de energía, que puede convertirse de manera directa en energía eléctrica en las llamadas pilas de combustible, convirtiendo por medios electroquímicos la energía química del hidrógeno en energía eléctrica, sin necesidad de un acondicionamiento térmico para su conversión, lo que permite alcanzar elevados rendimientos energéticos; los motores de combustión interna (turbinas de gas o alternativos) convierten la energía química del hidrógeno en energía térmica y luego en energía mecánica. Además, la combustión del hidrógeno únicamente libera vapor de agua libre de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la disminución de emisión de gases a la atmósfera por su combustión, a diferencia de los hidrocarburos. Así, se consideran tres razones para implementar una economía del hidrógeno, que tiene como objetivo el poder sustituir parcialmente con hidrógeno los combustibles fósiles en las aplicaciones de transporte y de almacenamiento de energía [6,7,8]:

- Razones de eficiencia energética
- Razones medioambientales
- Razones de independencia energética

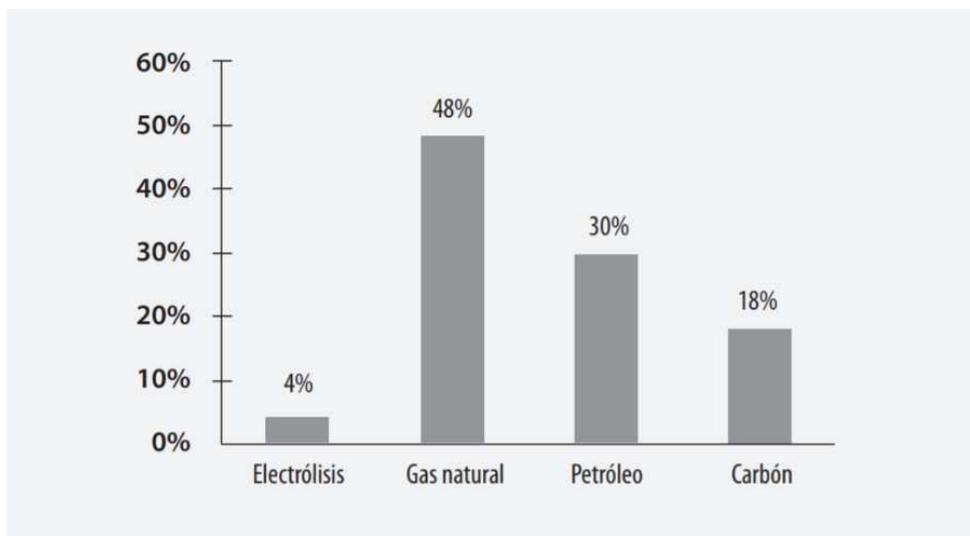
En la Tabla 1.2 se presentan las densidades energéticas del hidrógeno en comparación con diversos combustibles, donde se aprecia que el hidrógeno puede almacenar casi el triple de energía por unidad de masa que los otros combustibles, pero al ser más ligero, es el que menor energía almacena por unidad de volumen [8,9]:

*Tabla 1.2 Densidades energéticas de diversos combustibles [8]*

	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Energía almacenada		
		Volumen [kWh/m <sup>3</sup> ]	Volumen [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	Masa [kWh/kg]
H <sub>2</sub> líquido (1 bar; -252,8°C)	70,71	2.375	3	33,59
H <sub>2</sub> gas (300 bar; 25°C)	20,55	690		
H <sub>2</sub> gas (700 bar; 25°C)	47,96	1.611		
Gas natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	10	13,93
Butano líquido (25°C)	550	7.000	33	12,73
Gasolina	750	9.270	–	12,36

### 1.1.3 PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Al no estar presente de manera aislada en la naturaleza, el hidrógeno se considera un vector energético y es necesario obtenerlo a partir de materias primas llevando a cabo diferentes procesos de transformación [9]. En la Figura 1.2 se ven las diferentes fuentes energéticas de las que se obtiene el hidrógeno actualmente [8,10]:



*Figura 1.2 Origen del hidrógeno producido en la actualidad [8]*

Como se aprecia en la figura anterior, casi la mitad del hidrógeno en el mundo se obtiene a partir del gas natural, requiriendo en un 96% de combustibles fósiles como materia prima [4]. Solo el 4 % se obtiene del proceso de electrólisis y la mayoría de estos sistemas están interconectados a la red, para que sea un proceso sustentable se debe genera hidrógeno verde, donde la energía que se necesita para el funcionamiento del electrolizador debe provenir de fuentes renovables como lo es la solar, la eólica la marina, etc.

### 1.2 PROCESOS DE ELECTRÓLISIS

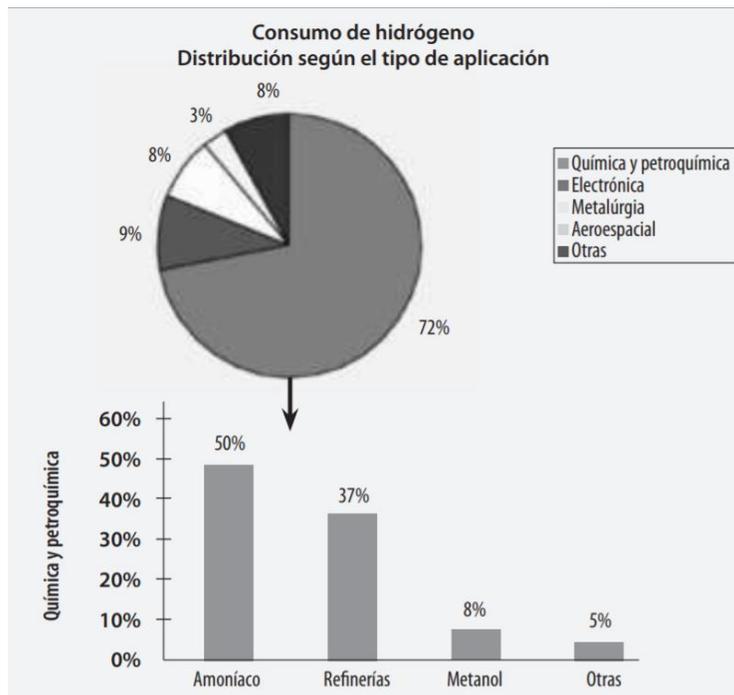
La electrólisis es la ruptura de la molécula del agua en sus dos componentes por la aplicación de una corriente eléctrica continua, teniendo dos formas de llevarse a cabo en función de la temperatura de operación:

- **Electrólisis a baja temperatura:** se integra con fuentes de energías renovables para genera hidrógeno verde. Se lleva a cabo en electrolizadores alcalinos y de membrana de intercambio protónico (PEM).

- **Electrólisis a alta temperatura:** el consumo de electricidad se reduce al aportarse energía térmica al proceso, como energía solar concentrada o energía nuclear. El electrolizador se denomina de óxidos sólidos.

#### 1.1.4 APLICACIONES

El hidrógeno actualmente tiene diferentes aplicaciones en gran medida en la industria química y petroquímica. En la Figura 1.3 se muestra la distribución actual del uso hidrógeno:



*Figura 1.3 Aplicaciones actuales del hidrógeno [8]*

El hidrógeno es principalmente utilizado en la refinación del petróleo, producción de amoníaco y, en menor medida, en el refinado de metales como el níquel, tungsteno, molibdeno, cobre, zinc, uranio y plomo. Una producción a gran escala es aplicada en cohetes, naves espaciales, industria electrónica, alimenticia, así como en aplicaciones médicas [13].

En el caso del hidrógeno producido mediante electrólisis es mayormente utilizado en la industria de fertilizantes y en menor medida en la producción de otros productos químicos, metalurgia, procesado de alimentos, producción de vidrio, fabricación de productos electrónicos y enfriamiento de generadores de plantas de

energía, éste solo representa el 3 % de la producción global de hidrógeno, el 1 % restante se genera como subproducto de la industria cloro-alkali. Aunque el hidrógeno producido por electrólisis no está segmentado específicamente en la industria, depende en gran parte de la rentabilidad de la región donde se use [3,10].

En aplicaciones de generación de energía y almacenamiento, hoy en día solo se utilizan pequeñas cantidades de hidrógeno, como lo son programas de transporte sostenibles y el almacenamiento de energía renovable. Sin embargo, estos usos y más del hidrógeno en la generación de energía para la industria, la movilidad y aplicaciones residenciales crecerán mucho para el año 2050, según se la proyección de la *Hydrogen Council* de EU, Figura 1.4 [3].

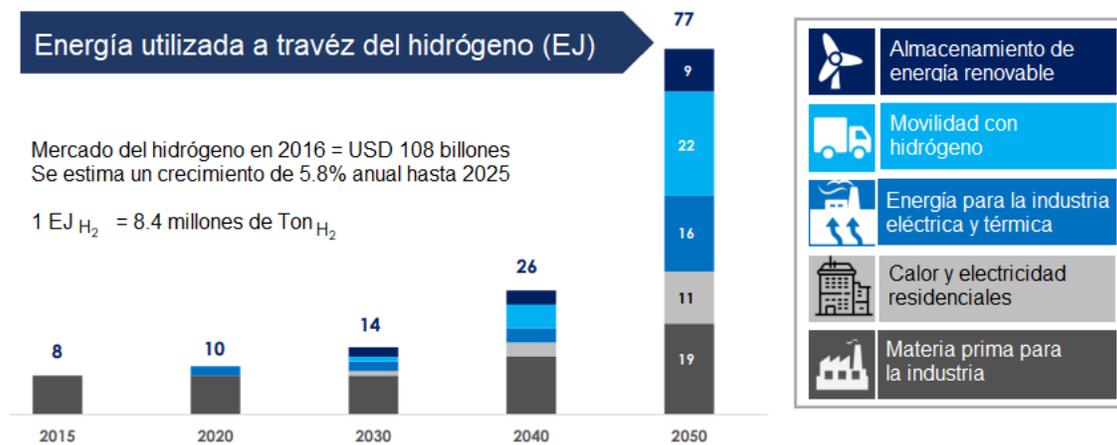


Figura 1.4 Aplicaciones del hidrógeno para 2050 [11]

## 1.2. ELECTROLIZADOR ALCALINO

La electrólisis es un proceso no espontáneo que se genera al aplicar una corriente eléctrica continua, cuya diferencia de potencial debe ser mayor a la necesaria para que la reacción de reducción-oxidación se lleve a cabo [12,13,14].

La electrólisis del agua líquida consiste en la óxido-reducción del agua para obtener hidrógeno y oxígeno gaseosos, a partir de la reacción global (Ecuación 1.1):



Al ser un proceso no espontáneo ( $\Delta G > 0$ ), se requiere aportar energía externa para que se lleve a cabo la electrólisis.

### 1.2.1 VOLTAJE REVERSIBLE

Se le conoce como voltaje reversible a la diferencia de potencial, entre el cátodo y el ánodo, necesaria para que se lleve a cabo la reacción de electrólisis. El trabajo eléctrico necesario para la reacción 1.1 es equivalente al incremento de la energía libre de Gibbs [9],  $\Delta G^{\circ}_R = 236.545 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

La relación entre el trabajo electrónico necesario y la energía libre de Gibbs es descrita por la Ley de Faraday, que como indica la Ecuación 1.6, donde  $F$  es la constante de Faraday ( $96485,3383 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) y  $z$  es el número de electrones transferidos en la electrólisis del agua ( $2 e^-$ ) y a condiciones estándar ( $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $1 \text{ atm}$ ), el voltaje reversible en la electrólisis de agua es  $1.225 \text{ V}$ , como se indica en la Ecuación 1.7 [6].

$$|W_{\text{elec}}| = \Delta G_R \rightarrow \Delta G = V \cdot z \cdot F \rightarrow V_{\text{rev}} = \frac{\Delta G_R}{z F} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

$$\Delta V^{\circ}_{\text{rev}} = \frac{\Delta G^{\circ}_R}{z F} = \frac{236545 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{2e (96485.3383 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1})} = 1.225 \text{ V} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

### 1.2.2 VOLTAJE TERMONEUTRAL

El voltaje termoneutral ( $V_{\text{tn}}$ ) es el voltaje necesario para que se lleve a cabo la electrólisis en condiciones adiabáticas, sin ganancia ni generación de calor. Este voltaje es mayor al  $V_{\text{rev}}$  ya que la cantidad de energía que debe ser suministrada es igual a la  $\Delta H_R$ . Como indica la Ecuación 1.5, el  $V_{\text{tn}}$  en la electrólisis del agua a condiciones estándar es igual a  $1.48 \text{ V}$ .

$$\Delta V_{\text{tn}} = \frac{\Delta H_R}{z F} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

$$\Delta V^{\circ}_{\text{tn}} = \frac{\Delta H^{\circ}_R}{z F} = \frac{285830 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{2e (96485.3383 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1})} = 1.48 \text{ V} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

### 1.2.3 VOLTAJE REAL DE OPERACIÓN

De lo anterior se obtuvo que  $\Delta V^{\circ}_{\text{rev}} = 1.225 \text{ V}$  y  $\Delta V^{\circ}_{\text{tn}} = 1.48 \text{ V}$ , los cuales dependen de la temperatura y la presión, lo que da un rango de temperatura y de voltaje en los que puede llevarse a cabo la reacción de electrólisis. En la Figura 1.5 se observan las zonas en las que puede trabajar una celda de electrólisis alcalina, fijando una presión de celda, para cualquier valor de intensidad que se aplique al sistema [9,6,17].

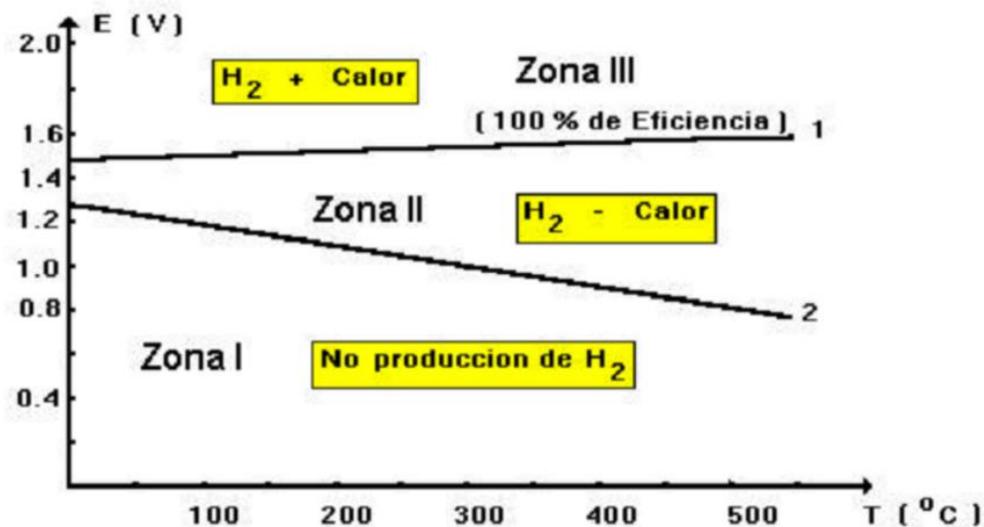


Figura 1.5 Zonas de trabajo para la producción de  $H_2$  por electrólisis en función la temperatura [18]

- Zona I: ( $V < V_{rev}$ ) Es imposible la electrólisis. No existe circulación de intensidad por la celda pues el voltaje de operación no es mayor al  $V_{rev}$ .
- Zona II: ( $V_{rev} < V < V_{tn}$ ) Para que se lleve a cabo la electrólisis es necesario aportar energía en forma de calor, el cual está definido por la Ecuación 1.6.

$$Q_{zona2} = (V_{tn} - V) \cdot I \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

- Zona III: ( $V_{tn} < V$ ) Se lleva a cabo la electrólisis. Cuando se aplica a la celda un voltaje superior al termoneutral, a la temperatura y presión de operación, la energía excedente se degrada en forma de calor (calor generado  $Q_{gen}$ ).

$$Q_{zona3} = Q_{gen} = (V - V_{tn}) \cdot I \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

El voltaje real de operación debe ser superior al voltaje reversible y para efectos prácticos debe ser superior al voltaje termoneutral, debido a las irreversibilidades que existen en el proceso de electrólisis, las cuales generan sobrepotenciales o sobrevoltajes que aumentan la demanda de energía. Para que la electrólisis se lleve a cabo a una corriente aplicada se deben considerar los siguientes sobrevoltajes:

- Sobrevoltaje de activación ( $V_{act}$ ): debido a la energía de activación de las reacciones químicas que se llevan a cabo en los electrodos y está limitada por

la velocidad de transferencia de carga. Está definido por la ecuación de Butler-Volmer [9,17]:

$$i = i_0 \cdot e^{-\alpha \frac{z \cdot F}{R \cdot T} V_{act}} - e^{(1-\alpha) \frac{z \cdot F}{R \cdot T} V_{act}} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

- Sobrevoltaje óhmico ( $V_{ohm}$ ): se debe a las resistencias óhmicas de los electrodos, de las burbujas de gas cercanas los electrodos y en el electrolito, el cual se puede calcular con la Ley de Ohm:

$$V_{ohm} = I \cdot R_T \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

- Sobrevoltaje de concentración ( $V_{conc}$ ): los procesos difusivos presentes generan diferencias de potencial, principalmente por la velocidad de difusión de los gases generados. Un factor es el retraso en alcanzar condiciones estacionarias o de equilibrio, lo que genera diferencias de concentración de electrolito. Se define por la siguiente ecuación:

$$V_{conc} = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left( 1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

El voltaje real de operación estará definido por la suma de voltaje termoneuro y la sumatoria de los sobrevoltajes existentes:

$$V_{cell} = V_{tn} + V_{act} + V_{ohm} + V_{conc} \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

#### 1.2.4 CURVA CARACTERÍSTICA (I vs V) DE UN ELECTROLIZADOR ALCALINO

La curva Densidad de corriente vs Voltaje, Figura 1.6, muestra el voltaje de operación con respecto a la intensidad de corriente aplicada para el funcionamiento de un electrolizador alcalino a la misma presión y diferentes temperaturas.

En la figura 1.6 se observan los efectos de los sobrepotenciales de activación y óhmico, tomando en cuenta que los valores de voltaje de la celda están sobre el  $V_{tn}$ . De igual forma se aprecia el efecto de la temperatura, con un mejor desempeño cuando se incrementa.

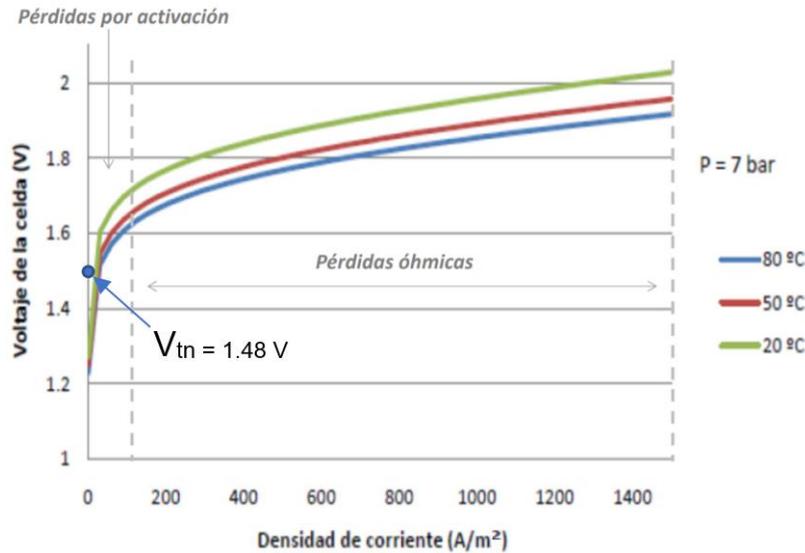


Figura 1.6 Curva característica de un electrolizador alcalino a una presión y diferentes temperaturas de operación [6]

### 1.2.3 EFICIENCIA

#### a) EFICIENCIA DE VOLTAJE

Esta eficiencia se define como la relación entre el voltaje termoneutral y el voltaje de operación aplicado por monocelda de electrólisis [16] y está definido por la siguiente ecuación:

$$\eta_V = \frac{V_{tn}}{V_{cell}} \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

#### b) EFICIENCIA DE FARADAY

La cantidad de hidrógeno producido es proporcional a la intensidad de corriente suministrada (en Amper) y del tiempo (en segundos) para que se lleve a cabo el proceso y se relacionan mediante la Ley de Faraday con la Ecuación 1.13):

$$\dot{m}_{prod} = \left( \frac{PM_i}{z \cdot F} \right) \cdot I \quad (\text{Ecuación 1.13})$$

La eficiencia de Faraday relaciona la intensidad de corriente teórica necesaria y de igual forma la cantidad de hidrógeno producido teórico y real, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_F = \frac{i_{teo}}{i} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{teo}} \quad (\text{Ecuación 1.14})$$

Esta eficiencia proporciona información sobre la cantidad de corriente aplicada en el proceso de electrólisis [6,9,16].

### c) EFICIENCIA GLOBAL

También conocida como rendimiento real de un electrolizador, es la relación entre la energía suministrada al sistema y la variación de entalpía del proceso (energía contenida en el H<sub>2</sub>) [6].

$$\eta_e = \frac{\Delta H}{\text{energía eléctrica} + \text{energía térmica}} \quad (\text{Ecuación 1.15})$$

En caso de que solo se aporte energía eléctrica, la eficiencia global será igual al producto de la eficiencia de voltaje y la eficiencia de Faraday [16].

$$\eta_e = \eta_V \cdot \eta_F \quad (\text{Ecuación 1.16})$$

### d) POTENCIA Y CONSUMO ENERGÉTICO

El consumo energético (Ce) es la potencia (W) que se debe suministrar para producir un metro cubico de hidrógeno en una hora [6,9].

$$Ce = \frac{\text{Potencia total}}{\text{un metro cubico de H}_2 \text{ por hora}} \quad (\text{Ecuación 1.17})$$

## 1.2.4 COMPONENTES DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS ALCALINA

En la Figura 1.7 se muestra un esquema de un electrolizador de agua que genera gas oxihidrógeno ya que no tiene una membrana entre sus electrodos, consta esencialmente de un ánodo, un cátodo, una fuente de poder y un electrolito [17]. Se aplica una corriente directa (DC) para propiciar el flujo de electrones de la terminal negativa de la fuente a DC al cátodo, donde se lleva a cabo un proceso de reducción donde los electrones pasan del electrodo a los átomos de hidrógeno del agua para formar hidrógeno gaseoso y los iones hidróxido (OH<sup>-</sup>), los cuales se integran a la solución alcalina. Los iones hidróxido (aniones) son transportados en el electrolito hacia el ánodo que es la terminal positiva de la fuente, donde se lleva a cabo un

proceso de oxidación donde los electrones son cedidos al ánodo para así mantener la carga eléctrica en el sistema. El electrolito que se usa es una solución acuosa que puede ser de hidróxido de sodio o hidróxido de potasio, de una concentración normalmente al 5–30 % en peso [13,15].

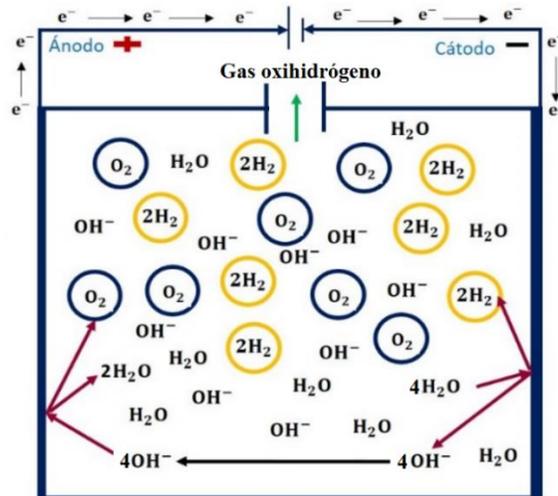


Figura 1.7 Esquema de una celda de electrólisis para generar gas oxihidrógeno [17]

Las semirreacciones que se llevan a cabo en el cátodo y el ánodo son [13]:



- Electrodo: son los encargados de conducir la energía eléctrica por el circuito externo. El electrodo negativo se denomina cátodo y es donde se lleva a cabo la semirreacción de formación de hidrógeno gaseoso; el electrodo positivo se denomina ánodo, donde se lleva a cabo la semirreacción de formación del oxígeno gaseoso. Existen algunos requisitos que deben cumplir los electrodos para operar en una celda de electrólisis: elevada resistencia a la corrosión, buena conductividad, buenas propiedades catalíticas y una buena integridad estructural.
- Electrolito: es el que transporta los iones entre los electrodos. Suele ser una solución acuosa de KOH con una concentración entre el 5–40% en peso, o de NaOH al 5–25% en peso. La conductividad aumenta con la temperatura mejorando la eficiencia del proceso, por lo tanto, un electrólizador alcalino suele operar a 40–90 °C, debajo del punto de ebullición del electrolito.

- Diafragma: cuando se quiere genera hidrógeno y oxígeno de manera independiente se utiliza un diafragma o membrana separadora, este permite el paso de los iones  $\text{OH}^-$  que conducen la carga del cátodo al ánodo, impidiendo el paso de los gases formados, separando el comportamiento anódico del catódico de la celda. Inicialmente era de amianto, reforzadas con redes de Níquel. Actualmente se usan óxidos cerámicos y polisulfonatos [6,9,17].

La electrólisis alcalina actualmente se utiliza como sistema de enriquecimiento de combustibles fósiles, ya sea en sistemas de combustión interna o en sistemas de combustión atmosférica. Dependiendo de su uso se puede generar hidrógeno y oxígeno de manera independiente, sobre todo cuando se necesita almacenar el hidrógeno. Cuando las aplicaciones son en sitio, en una producción generación consumo simultanea la generación de oxihidrógeno es ideal, ya que el diseño y manufactura de los electrolizadores es más sencilla y barata, se evita el uso de sistemas de almacenamiento voluminosos y pesados, así como sistemas de transporte del gas, lo que encarece mucho el costo del hidrógeno, Figura 1.8.

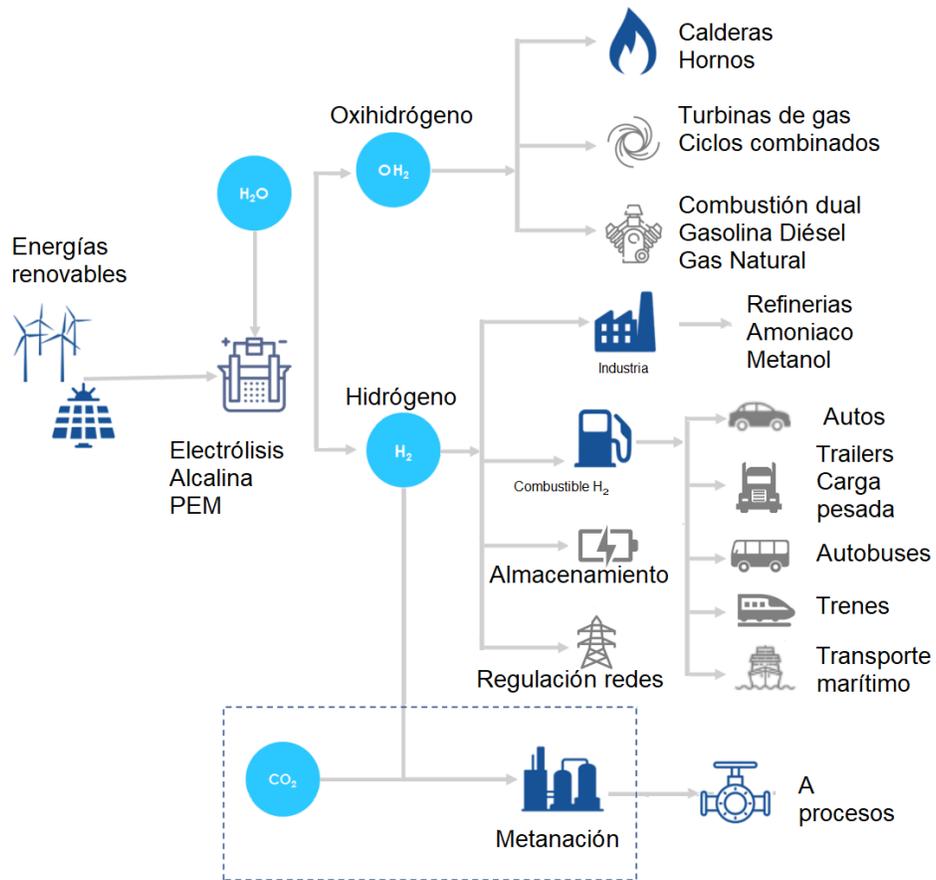


Figura 1.8 Esquema de las aplicaciones del hidrógeno y del oxihidrógeno

La pureza del hidrógeno generado varía dependiendo de la aplicación, si se utiliza el hidrógeno en una celda de combustible se necesita un sistema robusto y caro de purificación con varias etapas y uso de dispositivos específicos como son los filtros coalescentes para obtener purzas de hasta 99.999% o utilizar un electrolizador de membrana polimérica que cuesta 3 veces un electrolizador alcalino. Si se usa el gas producido en la electrólisis en procesos de combustión, la pureza puede ser grado 2, lo que ahorra tiempo y dinero en el proceso de purificación. Por lo anterior es necesario hacer un análisis general del uso que se le dará al hidrógeno generado, analizar la cadena de valor y establecer todo el proceso.

### 1.3 STACK DE ELECTÓLISIS ALCALINA

Cuando se une más de una celda de electrólisis alcalina y se conectan eléctricamente entre sí, se le denomina *stack* o apilamiento. La forma en que se conectan entre celdas da lugar a dos configuraciones de celda posibles.

- Configuración monopolar: las celdas electrolíticas están conectadas en paralelo eléctricamente, conectando todos los cátodos entre sí y, de igual forma, los ánodos, ambos separados físicamente como se muestra en la Figura 1.9.:

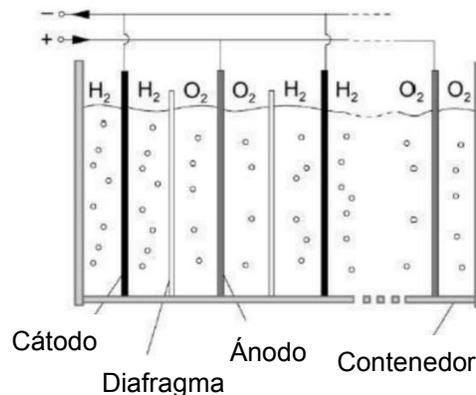


Figura 1.9 Configuración Monopolar de Celda [17]

- Configuración bipolar: en esta los cátodos y los ánodos están conectados en serie, el cátodo es una de las caras del electrodo y el ánodo es la contracara de este, luego sigue una piscina de electrolito y se coloca otro cátodo de frente al ánodo y así continua el arreglo. Esta configuración permite diseños más compactos, Figura 1.10.

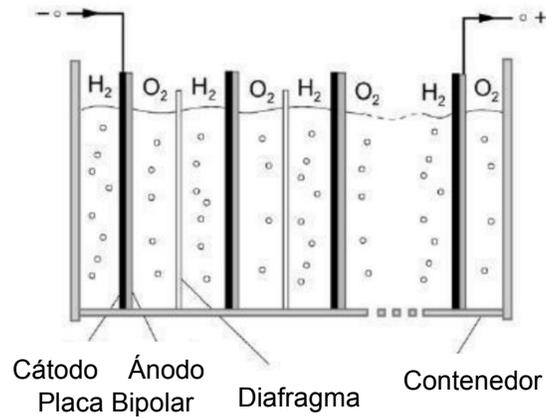


Figura 1.10 Configuración Bipolar de Celda [17].

#### 1.4 SEPARADOR DE FASES

En un stack de electrolisis alcalina los separadores gas–electrolito juegan un papel importante, pues en ellos se lleva a cabo la separación de los gases generados en forma de burbujas del electrolito arrastrado durante el proceso. De igual forma, están relacionados con la recirculación de electrolito hacia el electrolizador alcalino, Figura 1.11 [6].

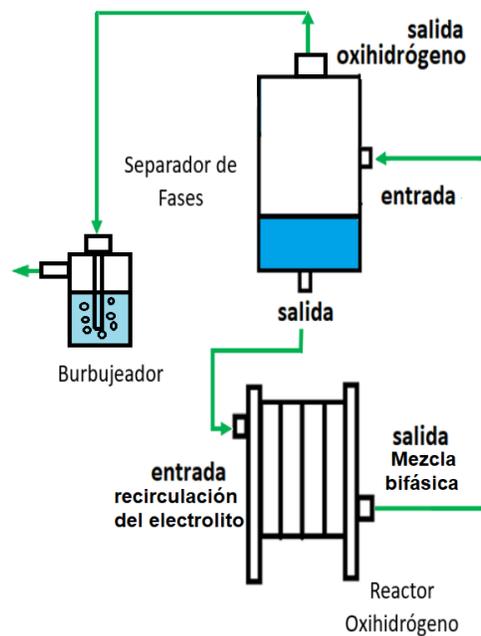


Figura 1.11 Configuración sistema electrolizador – separador de fases [17].

a) MECANISMOS DE SEPARACIÓN

- Separación por gravedad: una vez que la velocidad del flujo disminuye, y así la turbulencia, la gravedad actúa en las partículas de líquido haciendo que estas se desplacen hacia abajo. Las partículas de líquido se aceleran por acción de la gravedad, hasta que la fuerza de arrastre generada por el gas se iguala con la ejercida por la gravedad. En ese momento el líquido desciende a velocidad constante, conocida como velocidad terminal o de asentamiento. Considerando que las partículas de líquido son esféricas y de volumen constante, el diámetro de la partícula se ve reflejada en la Ley de Stokes (Ecuación 1.24).

$$vt = \frac{g \cdot dp^2 \cdot (\rho p - \rho g)}{18 \cdot \mu g} \quad (\text{Ecuación 1.20})$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $32.16 \text{ ft}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $dp$  diámetro de una gota de líquido esférica (ft),  $\rho p$  densidad de las gotas de líquido ( $\text{lbm}\cdot\text{ft}^{-3}$ ),  $\rho g$  densidad del gas a la temperatura y presión del separador ( $\text{lbm}\cdot\text{ft}^{-3}$ ) y  $\mu g$  viscosidad del gas ( $\text{lbm}\cdot\text{ft}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Existe un movimiento relativo entre la partícula de líquido y el gas circulante. La gota de líquido tiende a moverse verticalmente hacia abajo debido a la fuerza de gravedad  $F_g$  y, por otro lado, la corriente de gas generada en la separación ejerce una fuerza de arrastre en sentido contrario, denominada fuerza de arrastre  $F_d$ . Cuando estas dos fuerzas están en equilibrio la partícula de líquido se precipita a velocidad constante, o velocidad de asentamiento. La fuerza de arrastre es proporcional al área superficial de la partícula perpendicular al flujo de gas y a la energía cinética por unidad de volumen. Esto último se expresa en la Ecuación 1.25.

$$F_d = C_D \cdot \frac{\pi}{4} \cdot dp^2 \cdot \left( \frac{\rho_c \cdot vt^2}{2 \cdot g} \right) \quad (\text{Ecuación 1.21):}$$

Donde  $C_D$  es el coeficiente de arrastre,  $dp$  diámetro de una gota de líquido esférica (ft),  $\rho_c$  densidad de la fase continua ( $\text{lbm}\cdot\text{ft}^{-3}$ ),  $vt$  velocidad de asentamiento ( $\text{ft}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $32.16 \text{ ft}\cdot\text{s}^{-2}$ ).

- Separación por fuerza centrífuga: una fuerza centrífuga es inducida a las partículas de líquido suspendidas en un flujo de gas y puede ser cientos de veces mayor a la fuerza ejercida por la gravedad.
- Separación por choque: las partículas de líquido que fluyen en una corriente de gas chocan con obstrucciones donde quedan adheridas. Es principalmente

utilizada en la eliminación de pequeñas partículas de líquido suspendidas en una corriente de gas

#### b) SECCIONES DE UN SEPARADOR

- Sección de separación primaria: la separación se realiza mediante un cambio en la dirección del flujo, que se puede realizar con una entrada tangencial de los fluidos al separador, o bien, con una placa desviadora. En esta sección se separa la mayor cantidad de líquido.
- Sección de separación secundaria: en esta sección se separan las gotas más grandes del líquido del flujo de gas separado en la sección primaria. Aquí se pueden instalar veletas, aspas, mamparas, etc. para reducir la turbulencia y coleccionar gotas de líquido.
- Sección de extracción de niebla: en esta sección se separan las gotas más pequeñas de líquido utilizando un efecto de choque y/o fuerza centrífuga como mecanismos de separación.
- Sección de almacenamiento de líquidos: esta sección almacena y descarga el líquido separado. Debe tener capacidad suficiente para la operación y un control de nivel con su debida instrumentación, que puede ser un controlador, un indicador de nivel, un flotador, válvula de descarga, etc. [19,20].

#### c) FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LA SEPARACIÓN DE GAS Y LÍQUIDO

Algunos factores que influyen en la eficiencia de la separación de gas y líquido son los siguientes:

- 1) Tamaño de partículas del líquido: influye en la velocidad de asentamiento en la separación por gravedad y la separación por fuerza centrífuga. En la sección primaria son removidas partículas con un diámetro mayor a 100 micrones.
- 2) Tiempo de retención: el líquido se mantiene en el separador para que las fases alcancen el equilibrio a la presión de trabajo. En la mayoría de las aplicaciones el tiempo es entre 30 segundos y 3 minutos
- 3) Distribución del tamaño de las partículas y el volumen de líquido que se va a separar: esta distribución debe ser homogénea, de lo contrario la eficiencia del separador será baja.

- 4) Velocidad de separación: al aumentar la velocidad del gas por el separador, las partículas de diámetro mayores de 100 micras en la sección secundaria llegan a separarse, aunque se incremente el volumen de gas manejado.
- 5) Presión de separación: para cada mezcla existe una presión óptima de separación. Al aumentar la presión, aumenta la capacidad de separación de gas y, de modo contrario, la del líquido.
- 6) Temperatura de separación: al disminuir la temperatura del separador aumenta la recuperación de líquidos y un aumento en la temperatura disminuirá la capacidad de recuperación de gas. De igual forma, la temperatura tiene un efecto en el volumen y la densidad de los fluidos.
- 7) Densidades de los fluidos: la diferencia de densidades del líquido y del gas es proporcional a la capacidad de manejo de gas de un separador.

#### 1.4.1 SEPARADORES BIFÁSICOS

Los separadores bifásicos se utilizan para separar mezclas de dos fases y se pueden clasificar por su forma en horizontales, verticales y esféricos. En la Figura 1.12 se observa la orientación de los separadores horizontales (parte superior) u verticales (parte inferior), así como algunas secciones que los conforman. La Figura 1.13 muestra un esquema de un separador esférico.

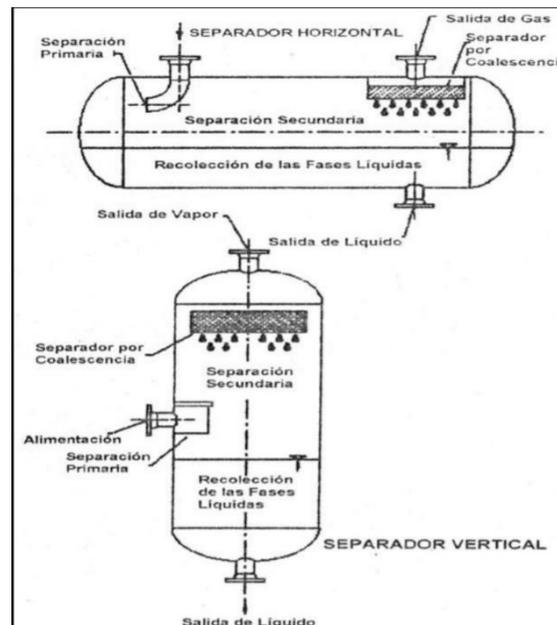


Figura 1.12 Esquema de los separadores horizontal y vertical [20].

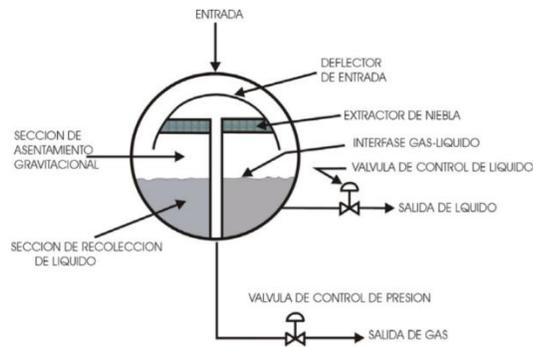


Figura 1.13 Esquema de un separador esférico [19].

#### 1.4.2 SEPARADORES HORIZONTALES

Los separadores horizontales son utilizados cuando el fluido a separar contiene un alto volumen de gases, debido a que la posición horizontal aumenta el área de superficie de líquido. Estos separadores operan normalmente a media capacidad ya que en este punto se encuentra la máxima área superficial de la interfase líquido-gas [19]. Algunas ventajas y desventajas de utilizar un separador horizontal se muestran a continuación [19,21]

Ventajas:

- Mayor capacidad para manejar gas que los verticales.
- Más fáciles de instalar y económicos que los verticales.

Desventajas:

- No son adecuados para manejar fluidos que contengan materiales sólidos.
- Más difíciles de limpiar y controlar el nivel que los verticales.

#### 1.4.3 SEPARADORES VERTICALES

La geometría de los separadores verticales permite un mejor control del nivel de líquido acumulado y permite colocar la salida de éste a una mayor altura.

Ventajas:

- Fácil limpieza, puede usarse para fluidos con materiales sólidos.
- Control de nivel no es crítico, siendo más sensible a los cambios.
- Mayor flexibilidad para la salida del líquido acumulado.
- Menor tendencia a revaporización de líquidos.

Desventajas:

- Más costosos que los horizontales.
- Más difíciles de instalar que los horizontales.
- Necesitan un mayor diámetro para manejar la misma cantidad de gas que los horizontales. [19,21].

#### 1.4.4 SEPARADORES ESFÉRICOS

Estos separadores son eficientes para la separación de gas y manejo de líquidos en un área limitada, así como para manejos de presión [19].

Ventajas:

- Más baratos que los horizontales o verticales.
- Más compactos que los horizontales o verticales.
- Más fáciles de limpiar que los verticales.
- Diferentes tamaños disponibles.

Desventajas:

- Espacio de separación limitado.
- Dificultades en la fabricación.

#### 1.5 PROBLEMÁTICA EN LOS DISEÑOS ACTUALES DE LOS ELECTROLIZADORES ALCALINOS

Es muy importante el desarrollo de tecnología, desafortunadamente México se considera un usuario de tecnología, como los celulares, las pantallas planas, las baterías de litio, etc. El problema es que no se tiene una industria nacional, muchas veces ni de partes de repuesto, lo que hace que este tipo de dispositivos sean caros para los mexicanos, respecto a lo que pagan los usuarios donde se origina la tecnología.

Actualmente las tecnologías del hidrógeno se están desarrollando internacionalmente en conjunto con la descarbonización de distintos sectores, en México se ha tardado la implementación de estas tecnologías, por lo tanto, a nivel global se establece que México no está haciendo actividades relevantes en la temática del hidrógeno, se menciona que hay esfuerzos aislados, con sistemas de baja capacidad desarrollados en la academia, sin transferencia tecnológica ni dispositivos comerciales, Figura 1.14.

Países desarrollando políticas de hidrógeno o proyectos piloto. Adaptado de (WEC, 2020)

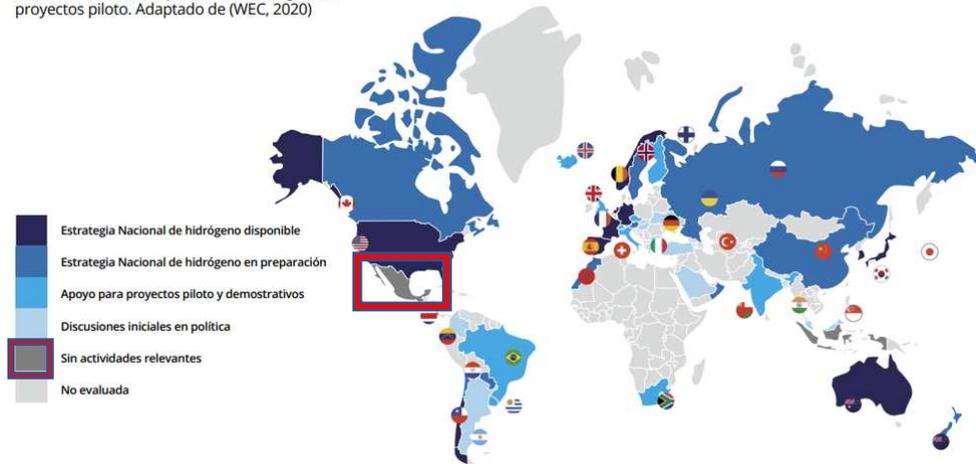


Figura 1.14 Visión global de las actividades de México para la implementación de las tecnologías del hidrógeno [11].

A pesar de la visión internacional, en México se está preparando una iniciativa para crear una Estrategia Nacional para el uso del hidrógeno como combustible, así como una propuesta para el desarrollo de un proyecto prototipo para enriquecer con hidrógeno los ciclos combinados, reduciendo así la dependencia de México del gas natural importado, por lo tanto, se necesita una industria donde se produzcan electrolizadores alcalinos, la cual no existe. En la Ley de la Industria Eléctrica desde el 2014 se reconoce a este gas como una energía limpia, tanto en su combustión como en la generación de electricidad con el uso de celdas de combustible. La desventaja de no tener una industria nacional para el desarrollo de electrolizadores alcalinos es que se deben importar. En el proyecto SIP 2024 del 2020 se intentó la compra de un electrolizador alcalino de 2.5 kW, y en la cotización del equipo ya puesto en México se debe pagar entre un 60% hasta un 120% más del precio de lista del dispositivo en EU, Figura 1.15.



**Producción 8 L/min**  
**2.5 kW**

**\$378,000 pesos precio de lista**

ITEM	CANT.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	1	Alkaline Water Electrolyser, Model: LBEX-2.5kW Size: L520 X W300 X H500 Weight: 80kg	\$504,306.65	\$504,306.65
			SUB TOTAL	\$504,306.65
			16% IVA	\$80,689.06
			<b>TOTAL</b>	<b>\$584,995.72 MN</b>

Figura 1.15 Costos de importación de un electrolizador alcalino

Para comparar cuánto cuesta el hidrógeno por kilogramo generado se utiliza el Costo Nivelado del Hidrógeno (LCOH<sub>2</sub>), que incluye el COPEX y OPEX que consideran el costo de inversión del dispositivo y el costo de la energía utilizada respectivamente. La Figura 1.16 muestra que los costos nivelados (USD/kg<sub>H2</sub>) que se manejan internacionalmente es de 6-10 USD/kg<sub>H2</sub> y en México está entre 23 y 20 USD/kg<sub>H2</sub> por los gastos de importación, IVA y comisión del proveedor.

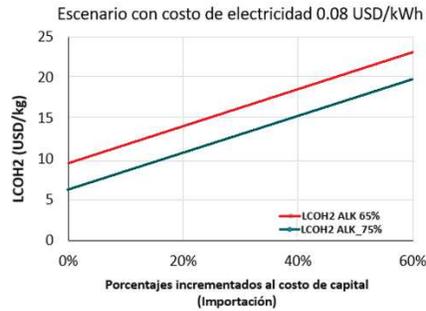


Figura 1.16 Costos Nivelado del Hidrógeno (LCOH<sub>2</sub>), base internacional en el eje de las ordenadas y con distintos costos de importación.

Por lo tanto, se tiene la ventaja de poder desarrollar una industria nacional con el diseño y manufactura de electrolizadores conforme se desarrollen las aplicaciones de las tecnologías del Hidrógeno. Si existe una industria nacional generará fuentes de trabajo y desarrollo económico nacional y local. En el IPN hay un grupo empresarial denominado Sistemas Integrales Híbridos de hidrógeno (SIHH<sub>2</sub>), donde se están desarrollando electrolizadores alcalinos y se esta iniciando la transferencia de tecnología a la empresa EUROWELDING, Figura 1.17.



Figura 1.17 Carta compromiso de colaboración de la empresa EUROWELDING

Aún hay detalles técnicos que se están mejorando. Por ejemplo, en un sistema de pruebas de electrólisis alcalina de corto tiempo ( $\leq$  de 1 hora de operación) y baja corriente aplicada (hasta 10 A en un arreglo en serie) se obtienen eficiencias del electrolizador entre 35 % y 40%, se tenía un control relativo de los parámetros de operación como temperatura y generación de gases, pero el flujo de gas generado es bajo ( $< 0.5 \text{ sL}\cdot\text{min}^{-1}$ ), se usaba un separador de fases cilíndrico, el cual permitía caracterizar los electrolizadores alcalinos de baja potencia, Figura 1.18.

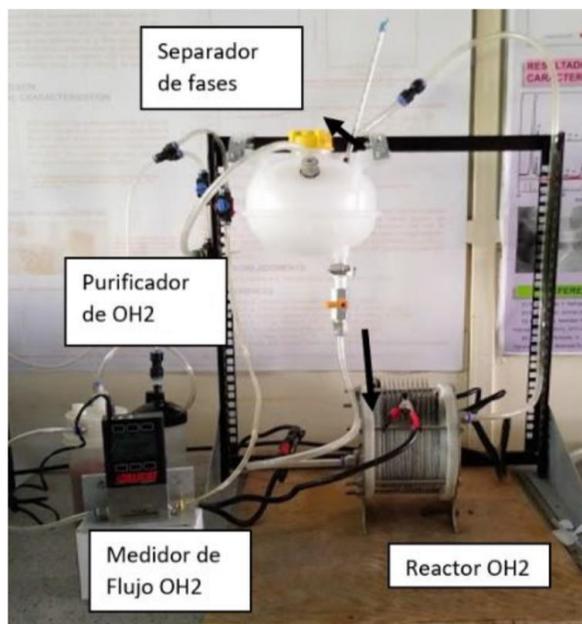


Figura 1.18 Sistema de prueba de baja potencia.

De los diseños actuales para el proyecto, operando a tiempos largos ( $>50 \text{ h}$ ), con altos valores de corriente aplicados ( $>30 \text{ A}$ ) y con eficiencias de operación del electrolizador de  $\sim 50\%$ , Figura 1.19.

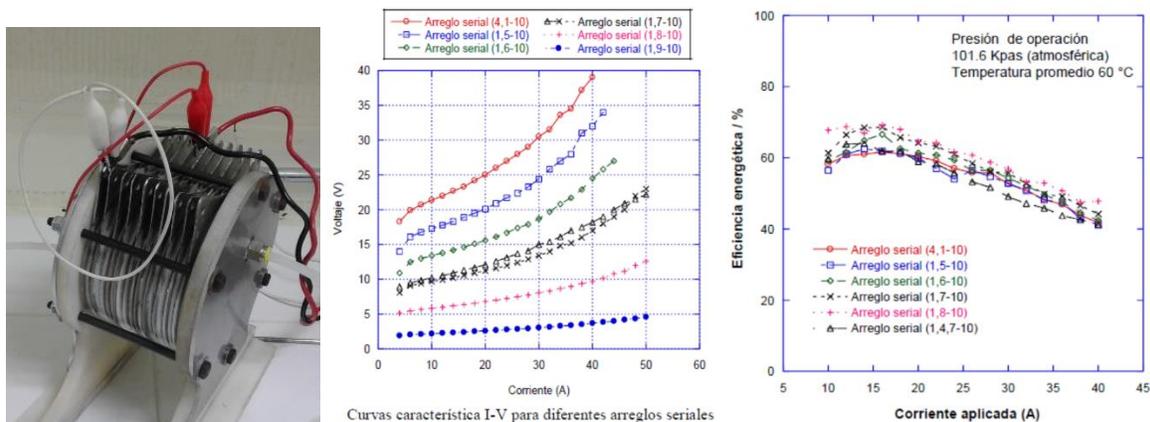
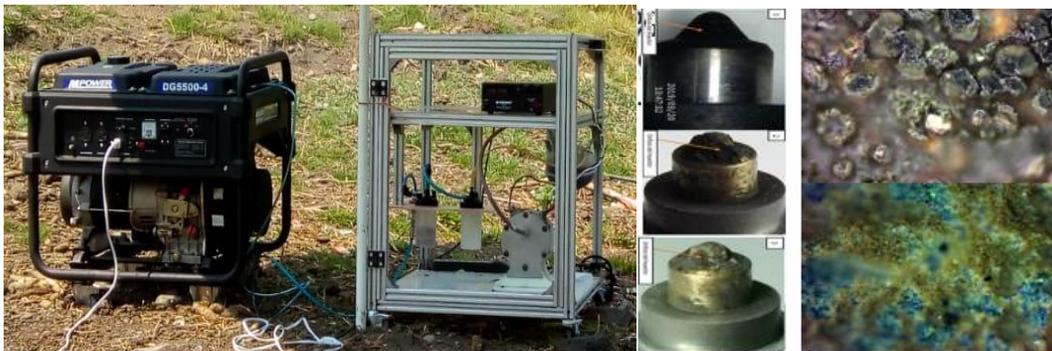


Figura 1.19 Electrolizador alcalino, curvas de desempeño y eficiencias.

Se ha observado un calentamiento excesivo de electrolito ( $\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que genera la ebullición en el sistema de electrólisis, con un excesivo arrastre de electrolito y vapor de agua; este flujo de gas oxihidrógeno es alimentado a sistemas de combustión dual (hidrógeno-hidrocarburos), generando procesos de corrosión y baja eficiencia térmica en los motores de combustión interna Figura 1.20 (procesos corrosivos en las válvulas de admisión y escape) y en la base de quemadores atmosféricos (corrosión en la base de quemador y extinción de la llama por exceso de agua), lo anterior se atribuye al arrastre excesivo de electrolito, el cual es una solución de NaOH concentrada.



*Figura 1.20 Electrolizador alcalino, curvas de desempeño y eficiencias.*

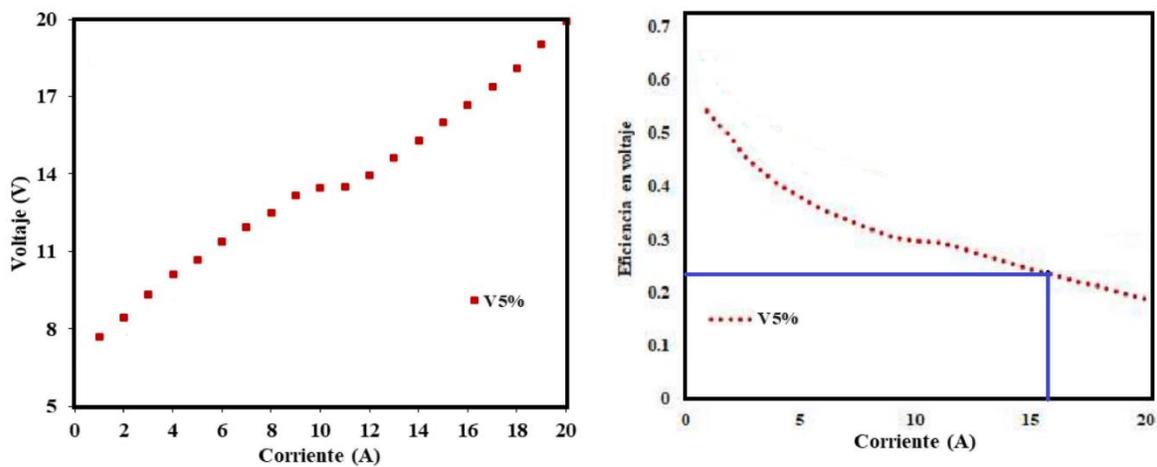
El exceso de electrolito en los gases generados se debe a un deficiente control de la temperatura y proceso de separación de las fases que se generan en el electrolizador alcalino. En el grupo de investigación se han adaptado varios separadores de fases, se tiene un diseño base del recirculador circular, mostrado en la Figura 1.18, de plástico con capacidad de 2 L, se llena hasta la mitad de electrolito con la salida de los gases en la parte superior, la entrada de la mezcla bifásica por la parte frontal superior y el desalojo de gas oxihidrógeno por la parte superior posterior del dispositivo. La Figura 1.21 muestra este separador de gases circular, después de 200 h de operación del electrolizador, donde el gas oxihidrógeno generado se alimentó a un motor diésel, se observan residuos que contaminan el electrolito y generan corrosión en los sistemas.



*Figura 1.21 Motor de prueba y separador de fases después de 200 h de operación.*

De los resultados anteriores se establece que se necesita el diseño de un separador de fases, ya que los que se han adaptado no cumplen la función de manera adecuada, sumado a lo anterior, no se tiene registro en la bibliografía de una manera práctica y barata de determinar el arrastre de electrolito en los gases producidos para los sistemas de electrólisis alcalina experimentales. Se intentó con cromatografía, pero se detecta una única señal para el hidrógeno y el agua, y no se detecta el NaOH.

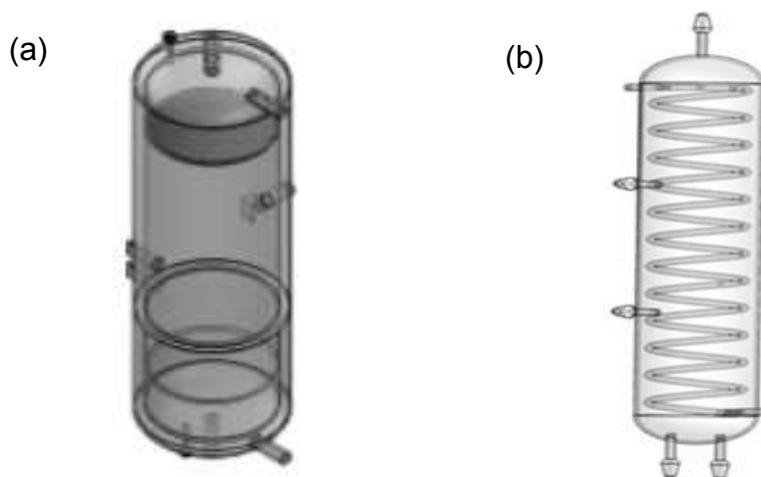
De lo anteriormente analizado, se implementó un proceso indirecto para medir el arrastre de electrolito utilizando una técnica conductimétrica, donde se mide la conductancia del agua de burbujeo a la salida del separador de fases y se relaciona con una concentración de NaOH según una curva de equivalencias. Cabe destacar que esta técnica se implementó en este proyecto de tesis y no hay reportes que se haya utilizado antes, es una técnica fácil y barata para detectar el arrastre del electrolito. El electrolizador de prueba que se utilizó fue de baja potencia con una eficiencia de 24% a 16 A, se obtuvo este desempeño con el separador de fases circular base, Figura 1.22, lo que se pretende es comparar su desempeño con distintos separadores de fases diseñados en el grupo y específicamente determinar el arrastre de electrolito en las mismas condiciones de operación, para después probar los separadores de fase con los electrolizadores mejorados, como el que se está desarrollando con la empresa EUROWELDING.



*Figura 1.22 Desempeño del electrolizador de prueba con el separador de fases circular base con una eficiencia de 24% a 16 A,*

# CAPÍTULO II “METODOLOGÍA EXPERIMENTAL”

Para el desarrollo experimental se utilizó un banco de ensayos de electrólisis alcalina que consta de un electrolizador de 4 electrodos niquelados, los cuales forman tres celdas conectadas en serie, una fuente de energía a DC, un burbujeador y dos desecadores; se analizaron dos formas de refrigeración. El banco de ensayos tiene la capacidad de cambiar y probar diferentes separadores de fases para determinar cómo influyen en el desempeño del electrolizador y en el arrastre de electrolito. Se utilizaron dos separadores de fases diferentes, a) uno de vidrio con chaqueta de enfriamiento y un quita niebla en la parte superior y b) otro de vidrio con serpentín interno como sistema de enfriamiento; Figura 2.1. Se utilizaron dos temperaturas de operación 30 y 40 °C.



*Figura 2.1. Esquemas de los separadores de fases a) vidrio con chaqueta, b) vidrio con serpentín interno.*

La temperatura que se monitoreó fue la del electrolizador, la cual dependía de la refrigeración en el separador de fases. El programa utilizado para la recopilación de datos fue el LabVIEW 2019 para establecer los pasos de corriente y tiempos de estabilización. Se definieron escalones de corriente por un tiempo determinado y se registraron los datos de voltaje, corriente, temperatura del reactor y tiempo de operación. Se utilizó una fuente de corriente directa KEYSIGHT N8920A, fijando un máximo de 30 V y 20 A, pudiéndose operar con el programa LabVIEW o manualmente. Los gases producidos pasan del separador de fases al burbujeador, después a los dos desecadores, a un medidor de flujo y por último se ventean por un sistema de desfogue hacia el exterior para que no se genere una atmósfera explosiva. El electrolito empleado fue una solución de hidróxido de sodio al 5 % en peso.

En primer lugar, se realizó la curva de desempeño del sistema (voltaje contra corriente) a temperatura constante, determinando así el rango de corriente aplicada más eficiente estableciendo un punto para operar por 5 horas continuas.

Para analizar el arrastre de electrolito en los gases producidos, se utilizaron 150 ml de agua desionizada como punto de partida y se midió la conductividad del agua en el burbujeador antes y después de un tiempo de operación de 5 horas. Como punto de referencia se generó una curva estándar de concentración contra conductividad. Se midió la conductividad de una solución de NaOH a diferentes concentraciones, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001 y 0.00001 N. Esta gráfica se usó como referencia para establecer la concentración del agua del burbujeador a las distintas condiciones de operación del *stack* y así analizar en cual flujo de gases se tiene menos arrastre de electrolito.

## 2.1 CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS

- Ordenador con sistema operativo Windows 10 y con el programa LabVIEW
- Separador de fases de vidrio cilíndrico de 30 cm de altura y 7.5 cm de diámetro, con un enchaquetado como medio de refrigeración y un atrapaniebla de vidrio poroso en la parte superior.
- Separador de fases de vidrio cilíndrico de 30 cm de altura y 7.5 cm de diámetro, con un serpentín interno como medio de refrigeración.
- Electrolizador prototipo de baja capacidad de 153 cm<sup>2</sup> y un volumen de 0.45 L, Figura 2.2; con piscinas de acrílico transparente de 10 mm de espesor, como soporte de las celdas electrolíticas se cuenta con tapas cuadradas de Nylamid de 10 mm de espesor y 11 cm de diámetro externo, con cabezal de entrada y/o de salida, Figura 2.3.

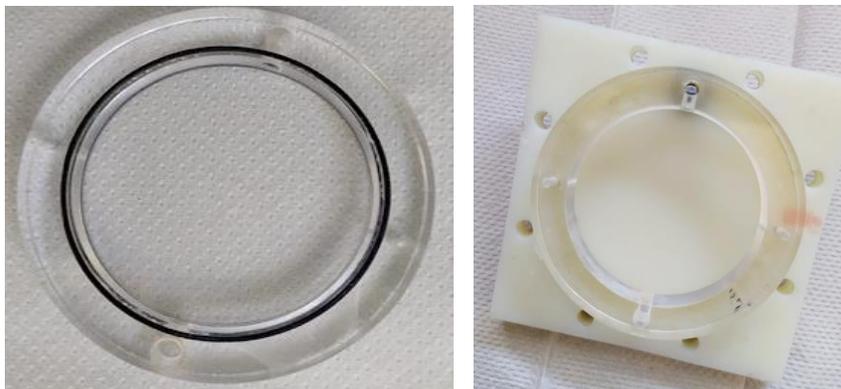


Figura 2.2. Piscinas del electrolizador de prueba

El electrolizador tiene 4 electrodos de acero inoxidable 304 Calibre 22 niquelados con 80 micras de depósito, los cuales tienen 7.5 cm de diámetro en contacto con el electrolito, conectados en arreglo bipolar o serie; los sellos son de silicón y se colocan entre las piscinas, Figura 2.3.



Figura 2.3. Componentes del electrolizador de prueba

- Fuente de energía eléctrica a DC KEYSIGHT N8920A, fijando un límite máximo de 30 V y 20 A, Figura 2.4.



Figura 2.4. Fuente de potencia a DC

- Un burbujeador y dos desecadores de gases experimentales con perlas de gel de sílice en su interior.
- Sistema de adquisición de datos, LabVIEW 2019 con placa ARDUINO.
- Resistores medidores de temperatura.
- Medidor de flujo ALICANT que mide como máximo  $20 \text{ sL} \cdot \text{min}^{-1}$ , Figura 2.5.



Figura 2.5. Medidor de flujo ALICANT

- Baño de circulación de PolyScience con controlador digital estándar de temperatura.
- CONDUCTRONIC Medidor de pH, mV rel., resistividad, conductividad y temperatura, para mesa. Modelo PC45.

## 2.2 PLAN DE ENSAYOS

Se realizaron experimentaciones utilizando el mismo reactor (electrolizador), con dos separadores de fases con entrada de recirculación por el costado, uno enchaquetado y otro con serpentín, como medios de refrigeración y el nivel de electrolito del separador a 1/3 de su capacidad, se reguló la temperatura a 30 °C y 40 °C, como se muestra en la Tabla 2.1.

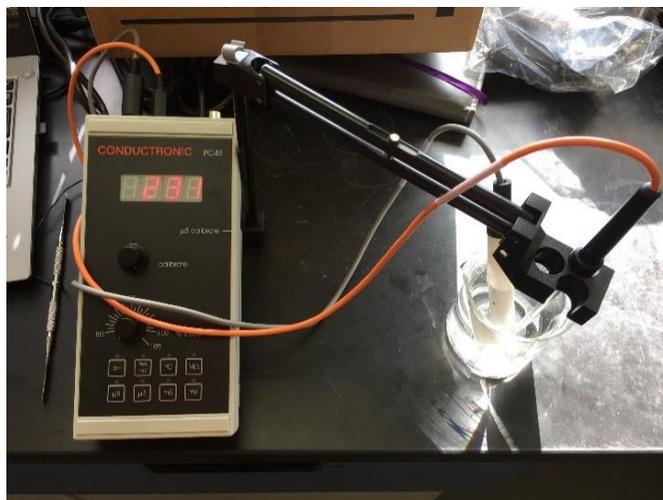
*Tabla 2.1 Metodología experimental*

Enfriamiento	Depósito separador con enchaquetado		Depósito separador con serpentín	
Temperatura	30°C	40°C	30°C	40°C

## 2.3 METODOLOGÍAS DE EXPERIMENTACIÓN

### 2.3.1 GENERACIÓN DE LA CURVA ESTÁNDAR DE CONCENTRACIÓN CONTRA CONDUCTIVIDAD

1. Preparar una solución de KCl a 0.01 N, el electrodo y medidor de temperatura limpios se sumergen y se calibra el conductímetro a una conductividad de 1413  $\mu\text{S}$  a 25 °C, agitando suavemente el electrodo para eliminar el aire acumulado dentro de éste, Figura 2.6.
2. Retirar los electrodos y lavarlos con agua destilada.
3. Preparar una solución de NaOH 0.1 N, introducir los electrodos y tomar la lectura de conductividad. Tomar las lecturas de conductividad para concentraciones de 0.01, 0.001, 0.0001 y 0.00001 N.
4. Repetir la experimentación descrita otra vez para ver la repetibilidad de las mediciones de conductancia y sacar el promedio de conductividad a cada concentración.
5. Generar la curva estándar de concentración contra conductividad en escala logarítmica.

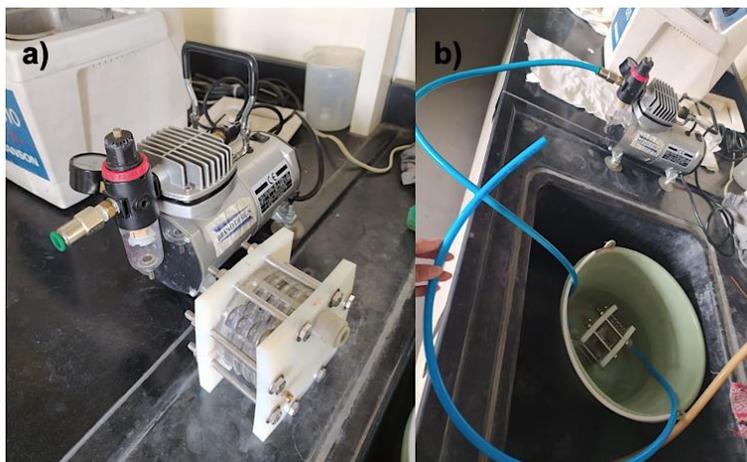


*Figura 2.6 Conductímetro*

### 2.3.2 VERIFICACIÓN DE AUSENCIA DE FUGAS

Se realizaron pruebas hidrostáticas en el electrolizador, el burbujeador y el secador con la finalidad de verificar la presencia o ausencia de fugas.

1. Llenar un recipiente con agua suficiente y sumergir el electrolizador que se someterá a la prueba hidrostática, Figura 2.7.



*Figura 2.7 Prueba hidrostática a) Compresor y b) electrolizador*

2. Conectar al compresor las conexiones de los elementos a analizar verificando que las salidas estén bloqueadas.
3. Encender el compresor y observar si se generan burbujas en la superficie de los elementos. Identificar las fugas en caso de presentarse.
4. Mantener la presión 10 min y apagar el compresor.

### 2.3.3 PREPARACIÓN DEL AGUA DEL BURBUJEADOR

1. Conectar el electrodo y el medidor de temperatura al medidor de conductividad y lavarlos con agua destilada.
2. Medir 150 ml de agua destilada o desionizada y tomar la conductancia.
3. Agregar el agua al burbujeador que se colocara a la salida del separador de fases y sellarlo con teflón para evitar fugas.

### 2.3.4 MONTAJE DEL STACK DE ELECTRÓLISIS ALCALINA

Para determinar el desempeño del electrolizador, se utiliza el banco de ensayos de electrólisis alcalina, Figura 2.8, realizando lo siguiente antes de empezar la experimentación:

1. Verificar las conexiones entre el depósito separador y el electrolizador,
2. Verificar la conectividad entre el burbujeador, los desecadores y el medidor de flujo de gases generados, teniendo especial cuidado en que la salida de gases del medidor de flujo tenga descarga en un ambiente ventilado y fuera del lugar de operación.
3. Llenar con solución de NaOH al 5% w el stack de electrólisis, hasta llenar el depósito separador a 1/3 de su capacidad, teniendo cuidado de evitar derrames de electrolito fuera del stack.
4. Una vez lleno el depósito separador, conectar el electrolizador y el burbujeador.
5. Verificar que las posiciones de los resistores, medidores de temperatura tengan una correcta ubicación en el depósito separador y en el electrolizador.
6. Verificar la conexión entre la fuente de poder y el electrolizador, de manera que la salida de la fuente de polaridad positiva esté conectada al ánodo y la de polaridad negativa esté conectada al cátodo.
7. Verificar las conexiones de la placa de ARDUINO con los termistores y con el ordenador.
8. Encender la fuente de poder y el ordenador, abriendo el programa de LabVIEW con el archivo correspondiente a la experimentación.
9. Verificar la conexión del baño de circulación de control de temperatura al depósito separador y a la corriente, encenderlo y ponerlo en modo *stand by*.

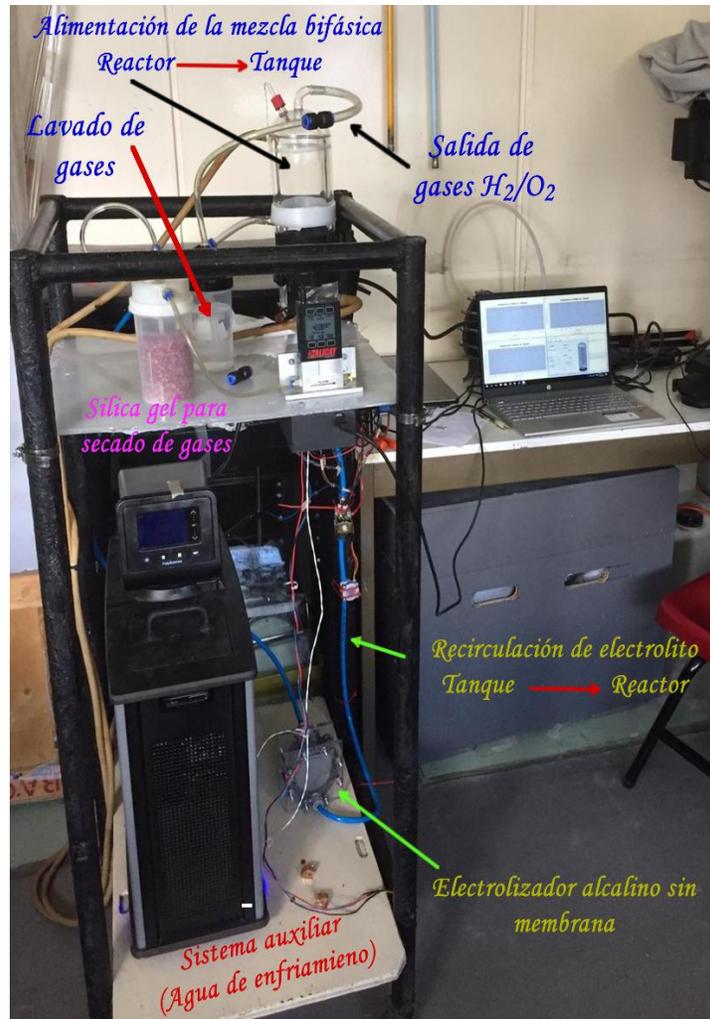


Figura 2.8 Banco de ensayos de electrólisis alcalina.

### 2.3.5 OPERACIÓN DEL STACK DE ELECTRÓLISIS PARA LA EXPERIMENTACIÓN

Para generar condiciones de temperatura constantes en el stack se sigue una metodología establecida en el grupo de trabajo [22], Figura 2.9, primero se calentará el sistema aplicando una corriente de 10 A por 10 minutos. Inmediatamente se aplicará una corriente de 16 A hasta alcanzar las condiciones de temperatura de operación para cada experimentación. Después, seguirá operando a 16 A por 10 minutos para estabilizar la temperatura. A continuación, comenzará la operación a 20 A e irá disminuyendo en pasos de 4 A cada 10 minutos. La temperatura del depósito separador se controlará manualmente con el baño de circulación de agua de enfriamiento, mediante un control ON/OFF. Al terminar el paso de corriente a 4

A daré inicio la operación continua del *stack* por 5 horas continuas a 16 A. Al terminar se volverá a operar de 20 A a 4 A en pasos de corriente de 10 min. y 4 A.

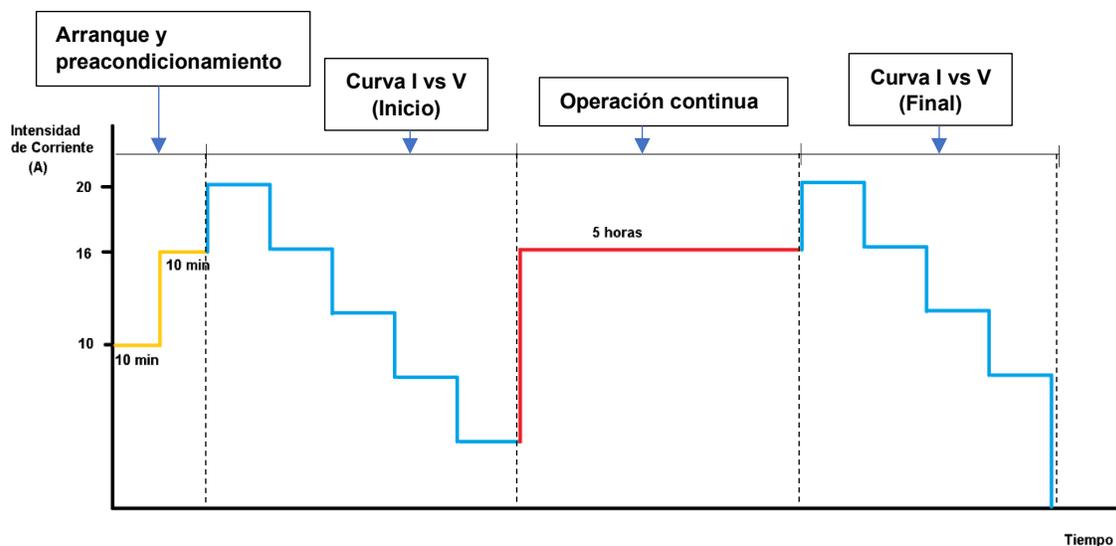


Figura 2.9 Metodología de caracterización para electrolizadores alcalinos

El control del sistema y adquisición de datos se monta según la Figura 2.10 y se opera con el siguiente protocolo:

1. Se ingresan los datos de tiempo y corriente en el programa LabVIEW.
2. La fuente de poder suministrará la corriente y potencial definidos en el sistema para llevar a cabo la electrólisis. Los valores de corriente se podrán modificar ingresándolos en el programa LabVIEW sin detener la operación.
3. Cuando la temperatura del electrolizador sea cercana a la requerida para la operación, activar el baño de circulación de agua de enfriamiento ingresando un punto de ajuste (*set point*) menor a la del agua de recirculación. Cuando la temperatura del electrolizador sea de 1 a 2 °C menor a la requerida para la operación desactivar el baño de circulación de agua de enfriamiento manteniéndolo en modo *Sand by* y activarlo cuando se rebase la temperatura requerida. Esto será el control manual de dos posiciones ON/OFF de la temperatura del electrolizador.
4. Al terminar la operación, extraer los datos de temperatura del reactor, temperatura del electrolito en el separador, temperatura de los gases a la salida del separador, caudal de recirculación, flujo de gases generados, voltaje y corriente; todas estas variables serán con respecto al tiempo de operación.

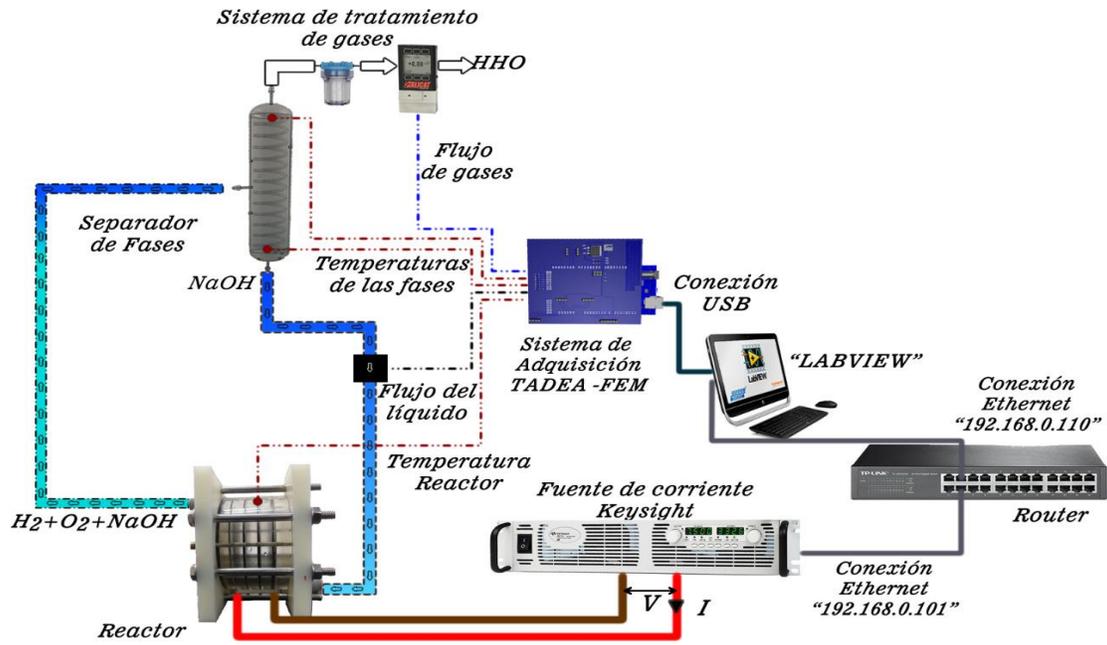


Figura 2.10 Diagrama del sistema de control y adquisición de datos del banco de ensayos de electrólisis alcalina

### 2.3.6 GENERACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE VOLTAJE CONTRA CORRIENTE

1. A partir de los datos obtenidos de la experimentación generar un promedio de voltaje por cada paso de corriente, Figura 2.11.

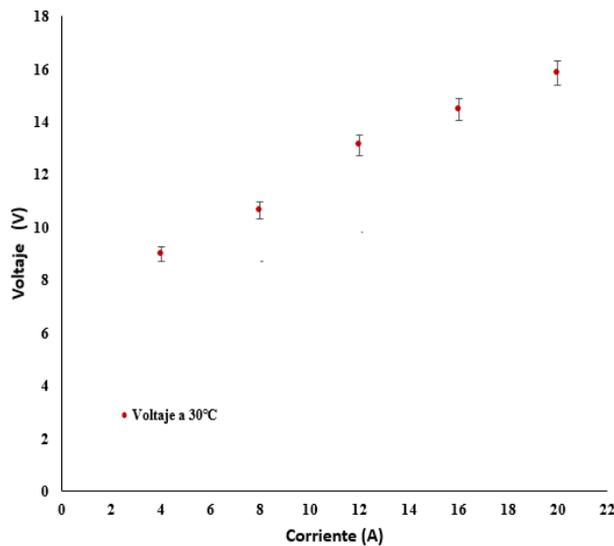


Figura 2.11 Curva característica corriente voltaje de un electrolizador alcalino

### 2.3.7 DETERMINACIÓN DEL ARRASTRE DE ELECTOLITO EN EL AGUA DEL BURBUJEADOR

1. Al final de cada experimentación, medir el volumen del agua del burbujeador con una probeta.
2. Obtener la diferencia de volumen de líquido en el burbujeador al inicio y final de la experimentación.
3. Tomar la medición de conductividad del agua del burbujeador.
4. Con la curva estándar de concentración vs conductividad obtener los valores de concentración de NaOH en el agua del burbujeador.

### 2.3.8 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

1. Comparar las concentraciones de NaOH en el agua del burbujeador al final de cada experimentación.
2. Obtener las eficiencias para cada experimentación con los valores de voltaje promedio para cada experimentación.
3. Comparar los resultados y seleccionar el que tenga una mayor eficiencia y menor arrastre de electrolito.

## 2.4 BALANCE DE PLANTA

El balance de planta comprende todos los elementos necesarios para operar el sistema de electrólisis alcalina, así como la instrumentación requerida para monitorear y caracterizar las variables en cada línea de proceso. Para este trabajo se tendrán cuatro arreglos en el stack que dependerán de la forma de refrigeración del depósito separador y de la recirculación de electrolito, como se muestra en los siguientes diagramas de proceso e instrumentación. En la Figura 2.12 y Figura 2.13 se muestra un diagrama de proceso para cada stack de electrólisis alcalina, ambos con una recirculación por convección natural y en la Tabla 2.2 se encuentra la nomenclatura de sus componentes.

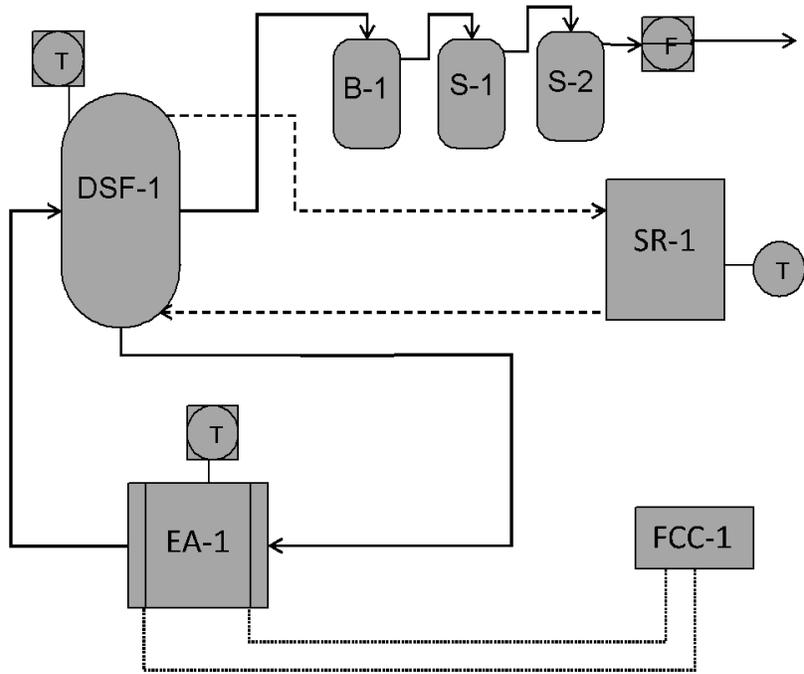


Figura 2.12 Diagrama de proceso con refrigeración por enchaquetado

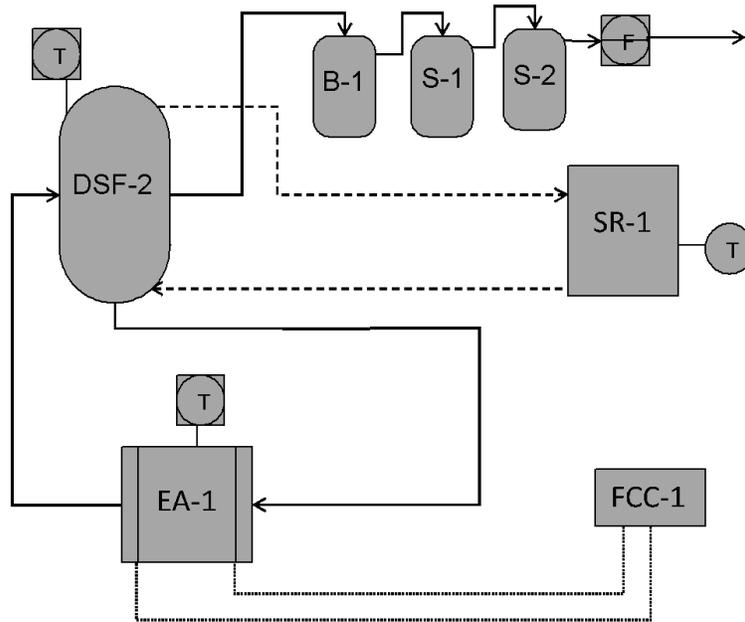


Figura 2.13 Diagrama de proceso con refrigeración por serpentín

Tabla 2.2 nomenclatura del Diagrama de proceso

Tag	Descripción
DSF-1	Depósito separador de fases con enchaquetado
DSF2	Depósito separador de fases con serpentín
EA-1	Electrolizador alcalino (reactor)
FCC-1	Fuente de alimentación de corriente continua
B-1	Burbujeador
S-1	Primer desecador
S-2	Segundo desecador
	Transmisor de temperatura
	Indicador de temperatura
	Indicador y transmisor de flujo

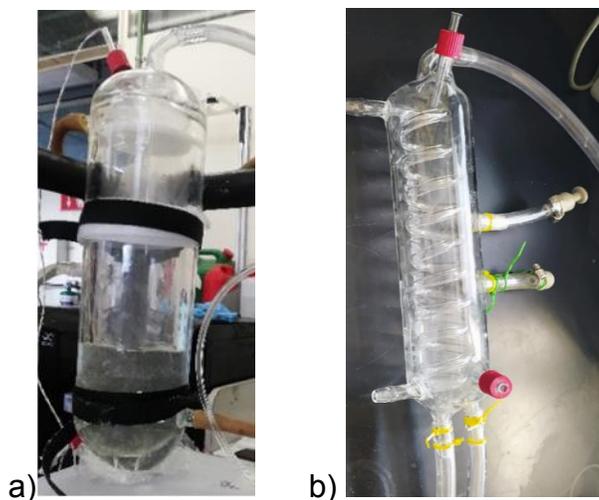
El banco de ensayos para este proyecto está definido por los diagramas de procesos de las 2 figuras anteriores, su funcionamiento se describe a continuación:

- Sistema de generación y separación de gases: el gas oxihidrógeno se genera en el electrolizador alcalino o reactor EA-1 al aplicarse una corriente eléctrica continua mediante la fuente de alimentación de corriente continua FCC-1. Al romperse la molécula del agua en  $H_2$  y  $O_2$  gaseosos, los gases generados fluyen inmediatamente por el cabezal de salida del EA-1 junto con el electrolito (solución de NaOH al 5% en peso), dirigiéndose al depósito separador de fases, DSF-1 con enchaquetado o DSF-2 con serpentín, según sea la forma de refrigeración, en el DSF-1 por gravedad ocurre la separación de la mezcla bifásica y en el DSF-2 la recirculación es por la parte inferior, al gas abandona la fase líquida. El electrolito en fase líquida separado recircula al EA-1 por la parte inferior del DSF. Los gases separados fluyen hacia el sistema de purificación de gases por la parte superior del DSF.

- Sistema de lavado y venteo de la corriente gaseosa: al salir del DSF, los gases generados pasan a través del Burbujeador B-1 y de forma continua por el Desecador S-1 para disminuir las trazas de electrolito arrastrado. Después el gas fluye por el medidor de flujo, que registra los datos, y de ahí se ventea en una ventana hacia el exterior para no generar una atmósfera explosiva y lejos de cualquier posible fuente de ignición.
- Sistema de Refrigeración: la temperatura del sistema se controla manualmente de forma ON/OFF con el baño de circulación de agua SR-1 conectado al DSF-1 o al DSF-2, en el que el agua a menor temperatura proveniente de SR-1 entra al enchaquetado o al serpentín del DSF por la parte inferior y el agua a la que se le ha transferido el calor del sistema fluye por la salida superior del DSF de regreso al SR-1. La temperatura por controlar es la del electrolito en el DSF como se indica en la metodología experimental. El SR-1 trabaja a flujo constante y llevará el agua de enfriamiento a un punto de ajuste establecido en el mismo, el cual es menor a la temperatura del electrolito en el DSF.
- Sistema de control y eléctrico: el control de corriente eléctrica se lleva a cabo con el programa LabVIEW en el ordenador, conectado a la FCC-1 y, de igual forma, el voltaje necesario para llevar a cabo el proceso de electrólisis en el EA-1 a los valores de corriente suministrada.
- Sistema de adquisición de datos: es el encargado de recopilar los valores de las variables involucradas en el balance de planta, enviándolos al programa de LabVIEW 2019 por medio de una placa ARDUINO, recopilando los valores transferidos de los termistores para la temperatura de los gases en el DSF TR1, del electrolito en el DSF TR2 y del reactor TR3, el caudalímetro medidor de flujo de la recirculación de electrolito FR1 y el medidor de flujo de los gases generados FR2. El programa genera las gráficas de cada variable con respecto al tiempo de operación en tiempo real, para que al finalizar se puedan tratar los datos para su análisis. Los valores de corriente y voltaje son recibidos en el programa de LabVIEW directamente de la FCC-1.

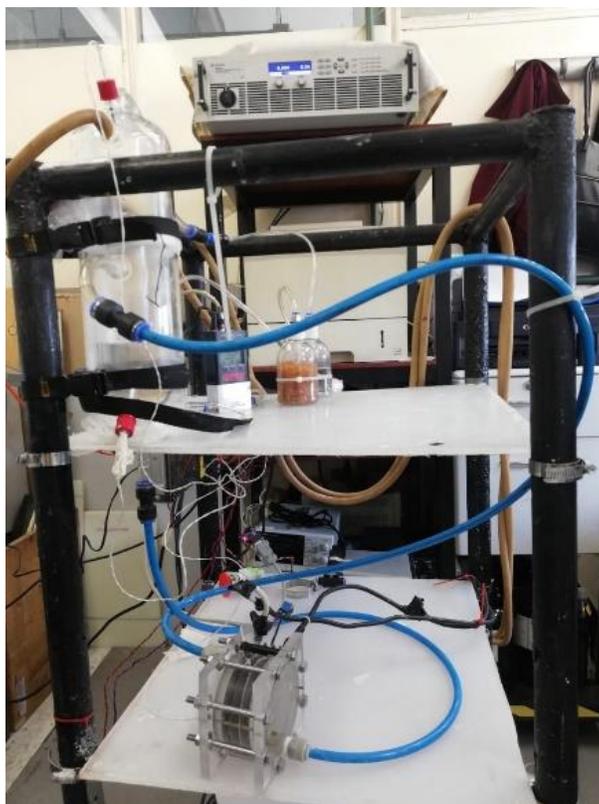
#### 2.4.1 ARREGLO EXPERIMENTAL EN EL LABORATORIO

En la Figura 2.14 se muestran los dos separadores de fases utilizados



*Figura 2.14 Separadores de fases a) vidrio con chaqueta y quita niebla y b) vidrio con serpentín*

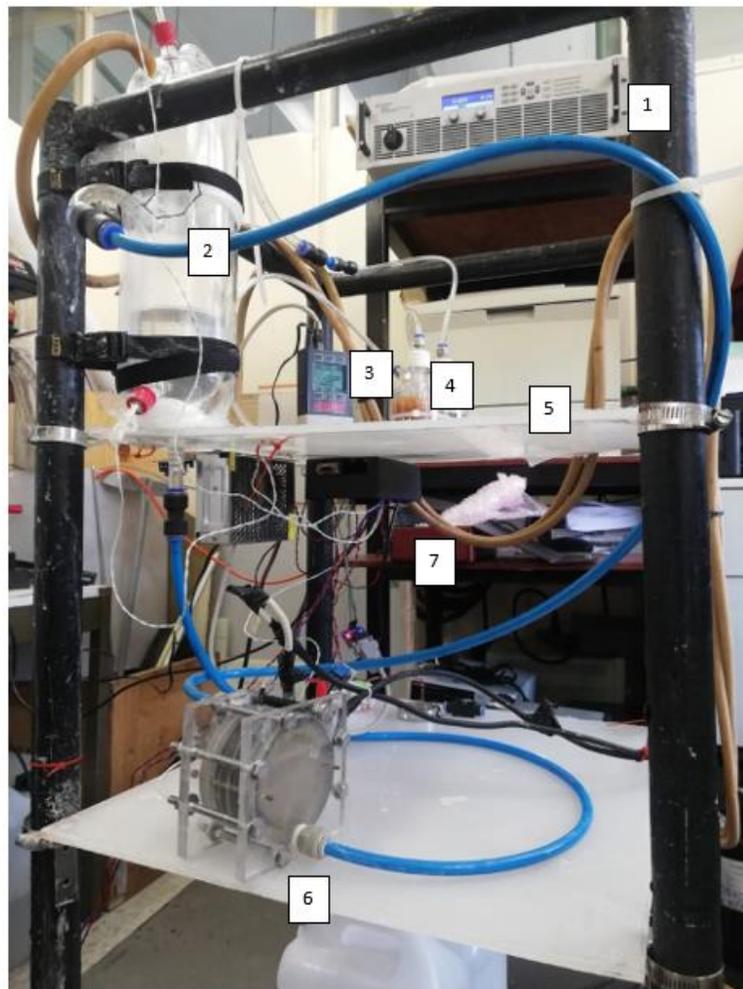
Las conexiones entre el electrolizador y el costado del separador de fases con enchaquetado se muestran en la Figura 2.15, así como la localización de burbujeador, el desecante y los sensores de temperatura en el separador.



*Figura 2.15 Conexiones laterales entre el electrolizador y el separado*

En la Figura 2.16 se enumeran los principales componentes del banco de ensayos experimental de electrólisis alcalina instalado en el laboratorio para la experimentación con el depósito separador de fases con enchaquetado y convección natural:

1. Fuente de alimentación de corriente continua KEYSIGHT.
2. Deposito Separador de fases con enchaquetado.
3. Medidor de flujo de corriente de gases ALICANT.
4. Burbujeador.
5. Desecador.
6. Electrolizador Alcalino experimental.
7. Placa ARDUINO conectada al ordenador.



*Figura 2.16 Arreglo del stack experimental de electrólisis alcalina*

El baño de circulación de agua para la refrigeración se encuentra conectado al depósito separador de fases y los termistores están colocados cada uno en la posición que le corresponde, conectados a la placa ARDUINO.

La Figura 2.17 es un ejemplo del tablero de monitoreo el programa LabVIEW para la operación del sistema de electrólisis alcalina. En éste se encuentran los recuadros para indicar la corriente aplicada, el tiempo de operación, los valores máximos y mínimos de voltaje permitidos y las pestañas donde se seleccionan la fuente de poder y la tarjeta Arduino. La gráfica indica los valores de temperaturas, Corriente y Voltaje, con las opciones de Flujo de hidrógeno producido y caudal para agregarse en futuras experimentaciones.

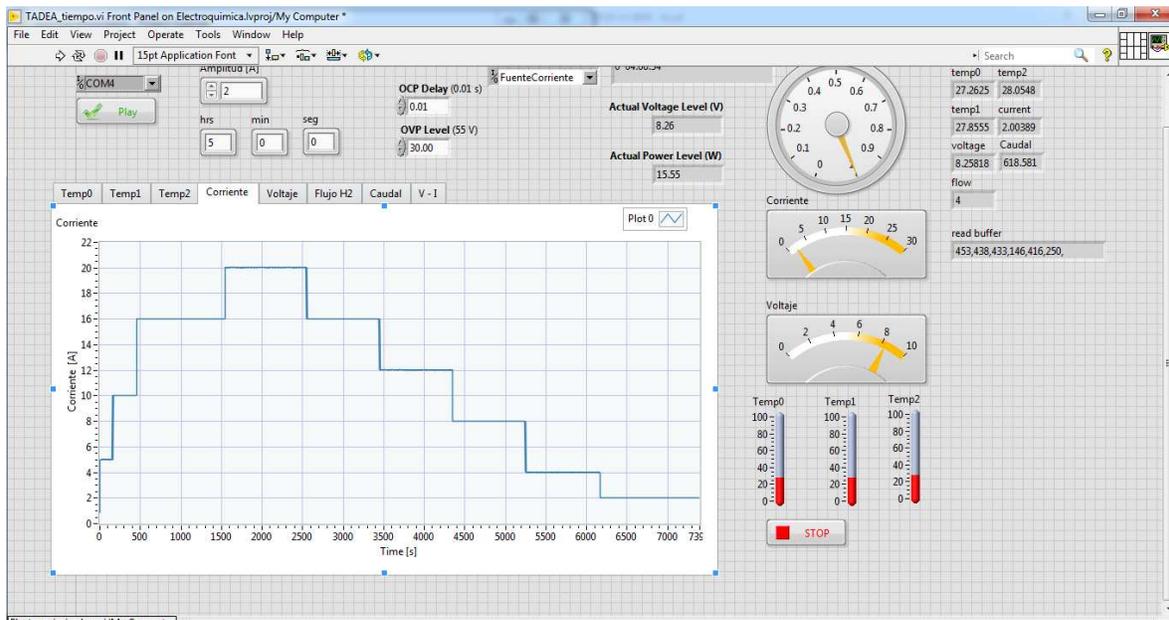


Figura 2.17 Interfase gráfica del sistema de control y captura de datos LabVIEW

# CAPITULO III “ANÁLISIS DE RESULTADOS”

### 3.1 GENERACIÓN DE LA GRÁFICA DE CONDUCTIVIDAD CONTRA CONCENTRACIÓN

La Tabla 3.1 muestra los valores de conductividad para una solución de NaOH a diferentes concentraciones menores a 1 N.

*Tabla 3.1 Conductividad a diferentes concentraciones de NaOH*

M (g·L <sup>-1</sup> )	C1 (μS)	C2 (μS)	Cprom (μS)
	@22.5°C prom	@23°C prom	
0.1	21600	21500	21550
0.01	2070	2070	2070
0.001	95	94.2	94.6
0.0001	10.1	9.5	9.8
0.00001	3.4	2.1	2.75
0	2.4	1.9	2.15

Con los valores obtenidos de la Tabla 3.1 se generó una gráfica de conductividad contra concentración en escala logarítmica a partir de un promedio de conductividad de dos series de mediciones. La gráfica generada se muestra en la Figura 3.1.



*Figura 3.1 Gráfica de Concentración contra Conductividad a diferentes concentraciones*

En la Figura 3.1 se aprecian cuatro segmentos, en escala logarítmica para ambos ejes, los cuales por separado tienen pendientes diferentes, con lo que se pudieron obtener ecuaciones aproximadas por regresión lineal para obtener valores de concentración para cada segmento. Esto es debido a que, al usar escala logarítmica, una extrapolación de todos los datos genera una curva con valores lejanos a los reales. Las ecuaciones son las siguientes:

- En un rango de 0.1 N a 0.01 N y 21550  $\mu$ S a 2070  $\mu$ S:  
$$N = 5 \cdot 10^{-6} \cdot k + 0.0004 \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

- En un rango de 0.01 N a 0.001 N y 2070  $\mu$ S a 94.6  $\mu$ S:  
$$N = 5 \cdot 10^{-6} \cdot k + 0.0006 \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

- En un rango de 0.001 a 0.0001 N y 94.6  $\mu$ S a 9.8  $\mu$ S:  
$$N = 10^{-5} \cdot k - 4 \cdot 10^{-6} \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

- En un rango de 0.0001 N a 0.00001 N y 9.8  $\mu$ S a 2.75  $\mu$ S:  
$$N = 10^{-6} \cdot k - 3 \cdot 10^{-5} \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Estas ecuaciones permiten obtener valores interpolados de concentración en el agua de burbujeo después de la operación del banco de ensayos de electrólisis alcalina por un tiempo determinado y comparándolos se pueden determinar las condiciones de operación que generen menor arrastre de electrolito en los gases.

### 3.2 OBTENCIÓN DEL PUNTO ÓPTIMO DE OPERACIÓN

Se operó el sistema sin refrigeración en el separador con enchaquetado aplicando pasos de corriente de 1 A y 5 min hasta determinar el punto máximo de operación que permite el sistema de electrólisis, fijando así un punto máximo de operación de 20 A y un punto óptimo de operación de 16 A. Esto debido a que operando a puntos de corriente más altos el reactor no lograba desfogar todo el gas producido, lo que generaba que no existiera contacto entre los electrodos y el electrolito y se observaba un incremento en el voltaje demandado por el electrolizador. Esta experimentación se llevó a cabo con una solución de NaOH al 15% en peso, Figura 3.2.

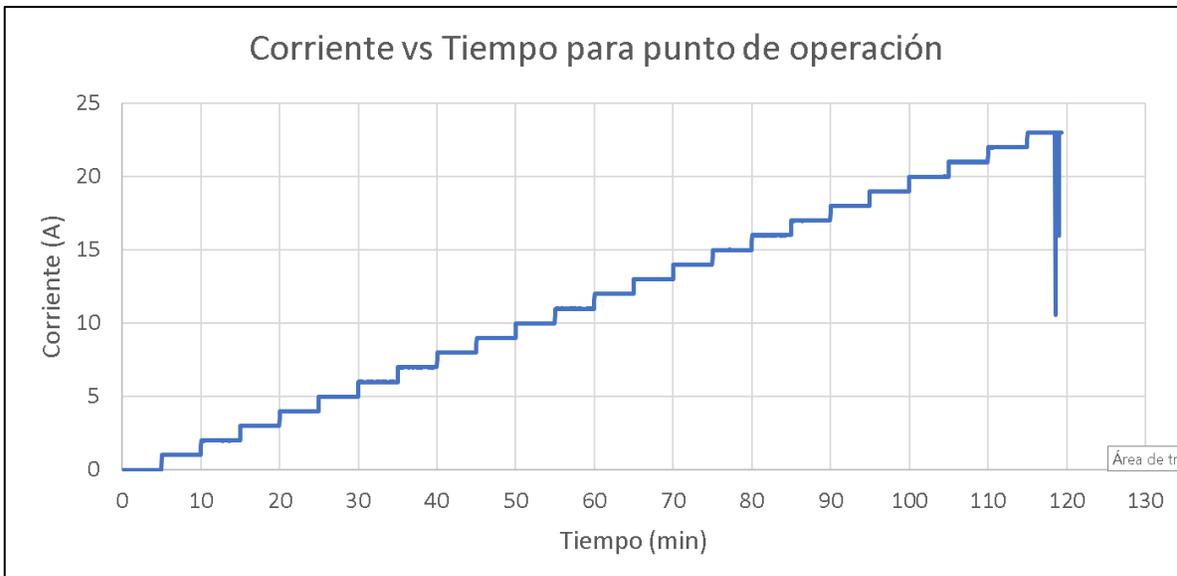


Figura 3.2 Gráfica de Corriente contra Tiempo para fijar punto máximo de operación

En la Figura 3.2 se observan los pasos de corriente y una caída en el suministro de energía al sistema al llegar los 23 A. En la Figura 3.3 se aprecia el mismo fenómeno, con un aumento de voltaje en el último paso de corriente y una caída súbita, debido a la resistencia generada por las burbujas de gas producido.

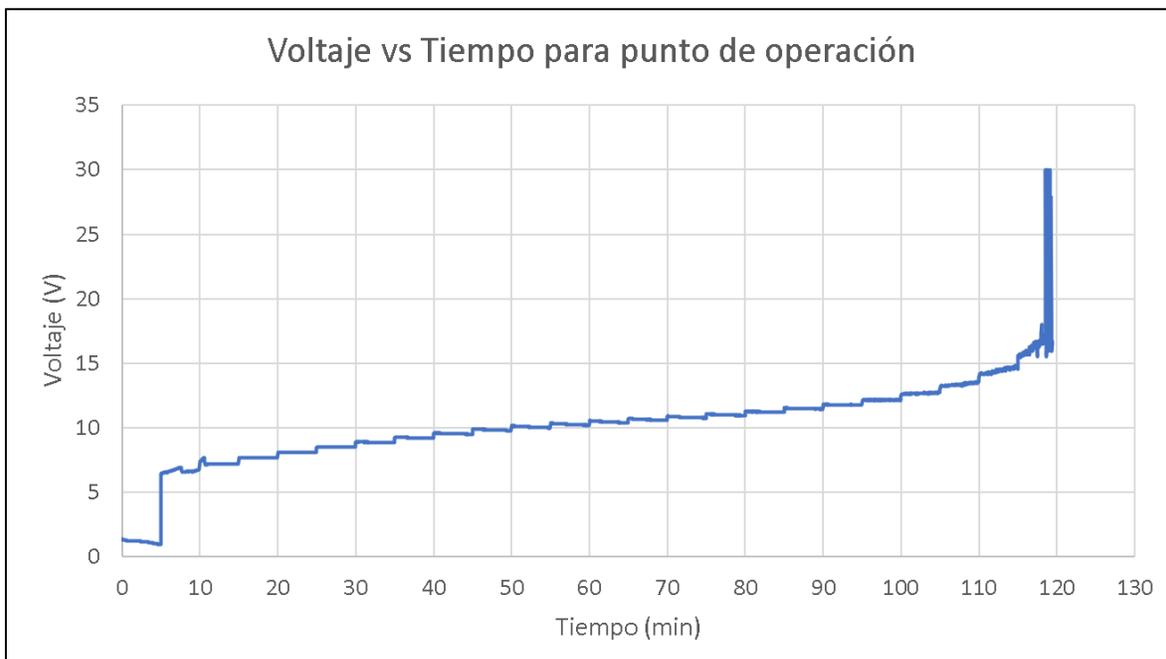


Figura 3.3 Gráfica de Voltaje contra Tiempo para fijar punto máximo de operación

### 3.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL ELECTROLIZADOR ALCALINO

Se realizaron dos series de experimentaciones con cada uno de los separadores y a diferentes temperaturas de operación. En la primera serie los datos obtenidos se vieron afectados por un mal desalajo de los gases. En la segunda serie se cambió el medidor de flujo de gas por uno de la misma marca, pero con mayor rango de medición, dentro de un rango cercano al flujo de gas teórico generado, con un desfogue constante de gases.

Cada experimentación generó dos curvas características del electrolizador alcalino, una al inicio de la operación y la segunda después de operar el sistema por 5 horas continuas a un valor de corriente de 16 A (80% de la corriente máxima). Por cada paso de corriente se obtuvo un promedio de voltaje suministrado al sistema generando así las siguientes curvas características del electrolizador alcalino para la primera serie de experimentos.

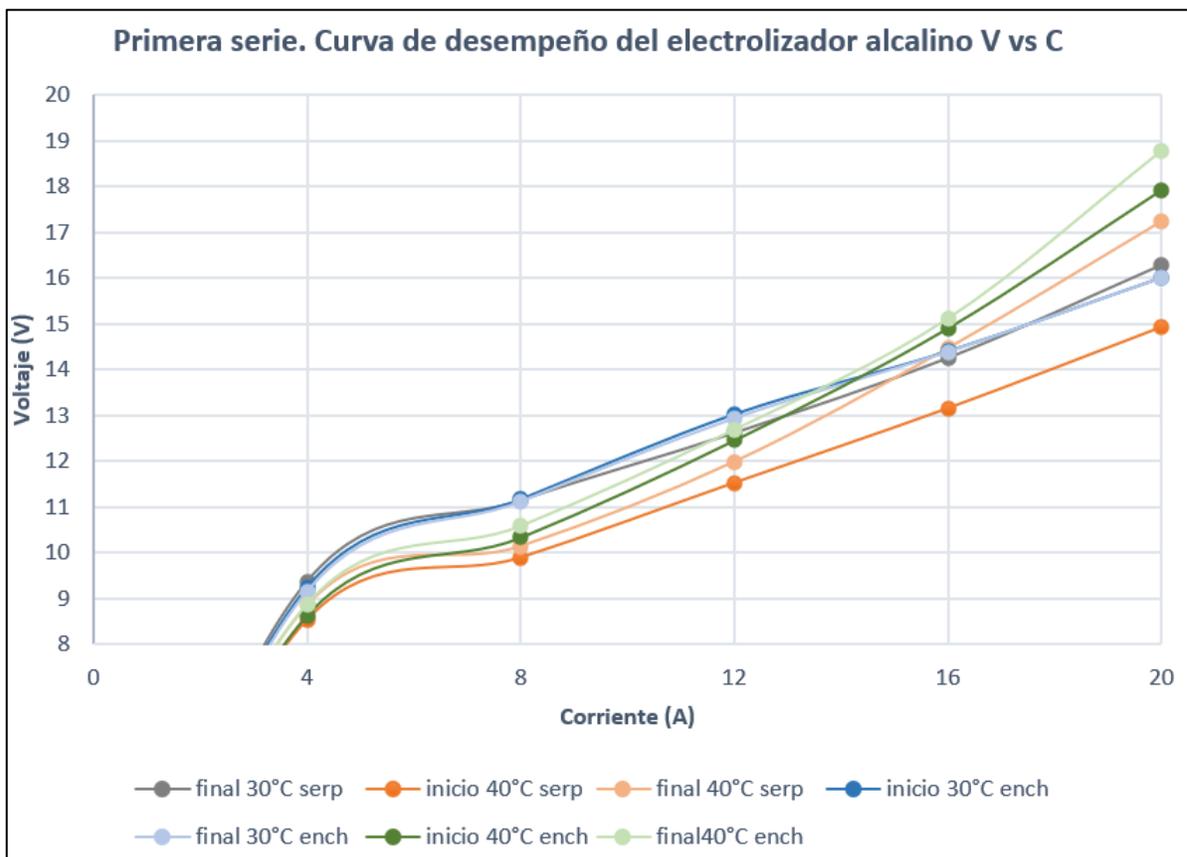


Figura 3.4 Gráfica de las curvas de desempeño del electrolizador alcalino de la primera serie de experimentos

Es necesario indicar que la curva correspondiente al inicio de la experimentación con el separador con enchaquetado a 30 °C no pudo ser obtenida debido a una falla en la programación del programa LabVIEW, pudiéndose obtener solamente los datos correspondientes al final de la operación.

En la Figura 3.4 se observa que el sistema con separador de serpentín a 40 °C requiere suministrar menor voltaje al inicio de la experimentación, pero al final el voltaje aumenta mostrando una pendiente mayor. Este mismo comportamiento se observa para la experimentación con el mismo separador a 30 °C con el mayor voltaje requerido al final de esta serie de experimentaciones.

Por otro lado, la experimentación con el separador con enchaquetado presenta un mayor requerimiento de voltaje, sin embargo, la pendiente es constante a diferencia de las obtenidas con el separador con serpentín y los valores al inicio y final de cada experimento son semejantes.

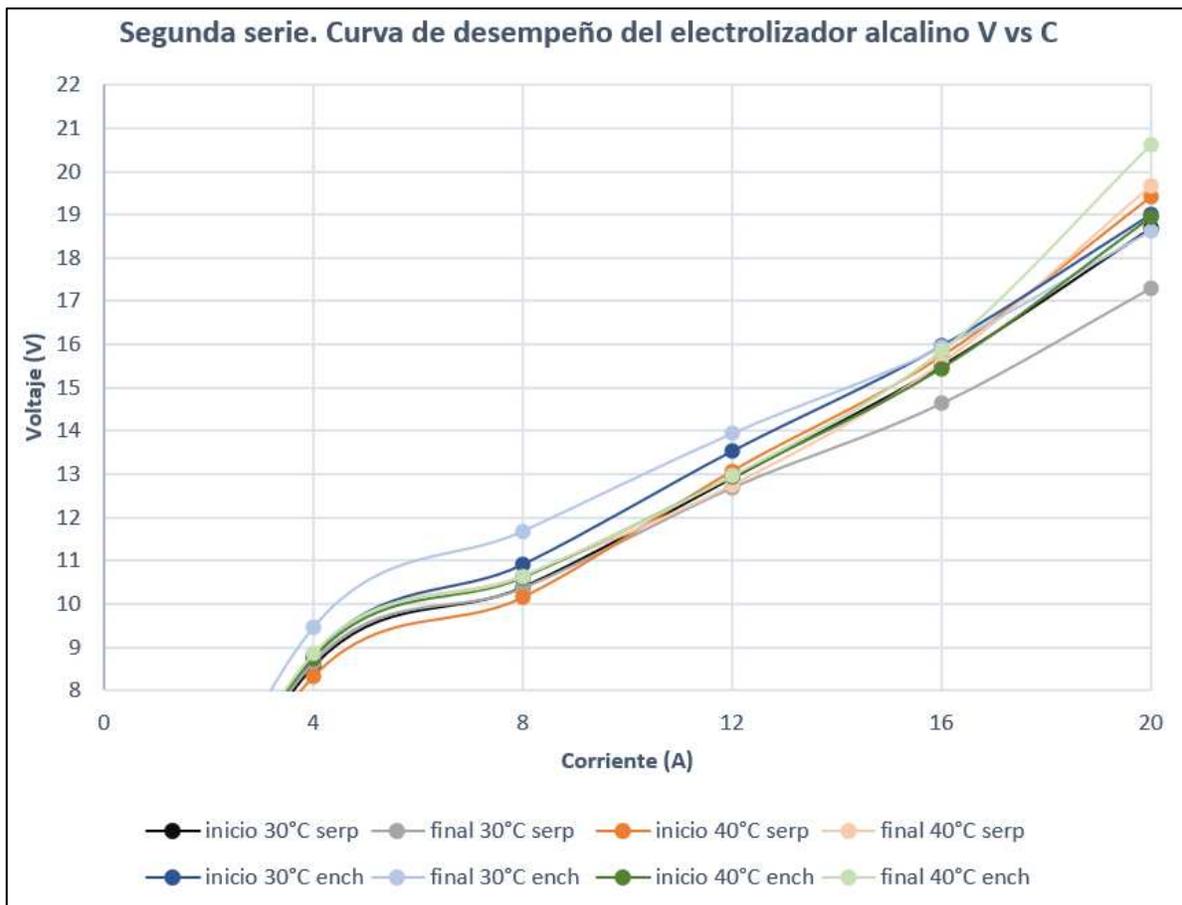


Figura 3.5 Gráfica de las curvas de desempeño del electrolizador alcalino de la segunda serie de experimentos

La segunda serie de experimentos se realizó con el medidor de flujo de mayor capacidad monitoreando los datos de voltaje-corriente. En la Figura 3.5 se puede apreciar que los experimentos a 30 °C en ambos separadores presentan comportamientos poco lineales y diferentes entre el inicio y el final de los experimentos. En cambio, los valores de voltaje en la experimentación con el separador con serpentín a 40 °C fueron similares en el inicio y el final de la operación. Los valores para el experimento con el separador con enchaquetado a 40 °C se mantienen similares hasta los 20 A, cuando se aplica mayor corriente se nota un aumento de voltaje requerido al final de la operación.

Es importante notar que, a diferencia de la primera serie de experimentos, en la segunda serie el voltaje requerido a los 16 A es similar al inicio y final de las cuatro experimentaciones, a excepción de la realizada con el separador con serpentín a 30 °C.

### 3.4 OPERACIÓN CONTINUA

Los resultados expuestos a continuación corresponden a las experimentaciones realizadas por 5 horas continuas a 16 A, sumándole el tiempo requerido para generar las dos curvas de voltaje vs corriente al inicio y final de la operación.

*Tabla 3.2 Voltaje promedio en 5 horas de operación continua a 16 A, primera serie de experimentos*

1ra serie	30°C serp	40°C serp	30°C ench	40°C ench
Voltaje (V)	15.14	13.59	14.83	15.61

*Tabla 3.3 Voltaje promedio en 5 horas de operación continua a 16 A, segunda serie de experimentos*

2da serie	30°C serp	40°C serp	30°C ench	40°C ench
Voltaje (V)	15.63	16.19	16.79	16.93

Como se aprecia en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, el mal desalajo de los gases generó una variabilidad en el voltaje dando resultados diferentes para cada experimento. En la segunda serie se puede observar que los valores de voltaje promedio son similares entre sí, requiriendo menor voltaje usando el separador con serpentín. Además, se puede observar que a una temperatura de 30 °C la demanda de voltaje es menor también cuando se operó a una temperatura de 40 °C. Esto último se aprecia en la segunda serie de experimentos.

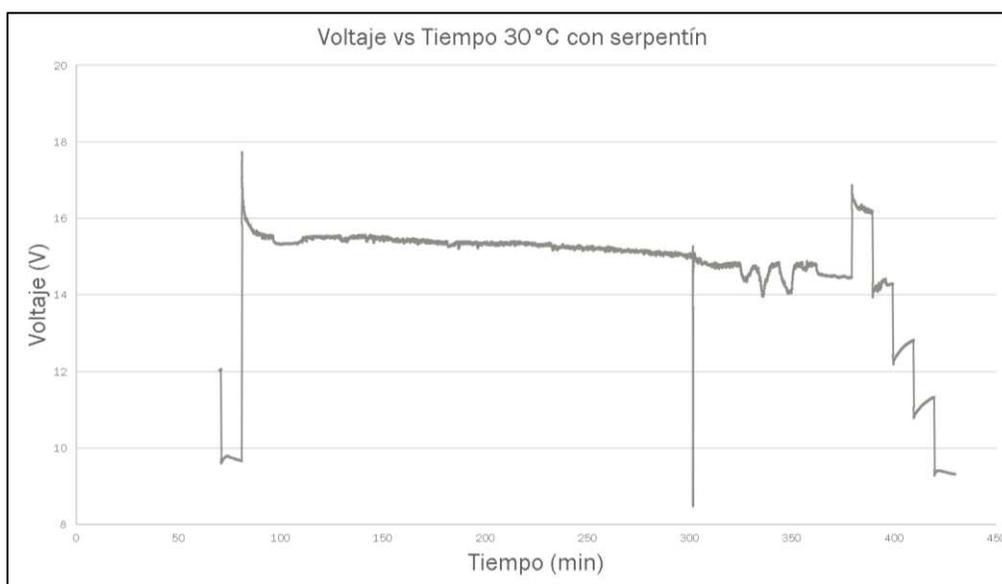
### 3.5 RELACIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA DEL REACTOR CON EL VOLTAJE REQUERIDO

#### 3.5.1 PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS

En la primera serie de experimentos como el desalojo de los gases no fue adecuado existió variabilidad en el voltaje y se detectaron fugas en las conexiones de los separadores de fases y en el burbujeador, las cuales se corrigieron en la segunda ronda de experimentos.

El control de temperatura para los experimentos a 30 °C se realizó sin el sistema ON/OFF indicado en la metodología, puesto que la temperatura se mantenía constante con el baño de enfriamiento en funcionamiento, lo que muestra que, para mantener esta temperatura en los dos tipos de separadores, es necesario una refrigeración continua en el tiempo de operación. Por otra parte, en los experimentos a 40 °C, se puede ver en el voltaje demandado como la temperatura se controla de manera intermitente, lo que permite mantener el baño de enfriamiento apagado por periodos de tiempo semejantes a los de funcionamiento del baño.

La primera experimentación realizada fue a 30 °C utilizando el separador de fases con serpentín, cuyo voltaje de operación de observa en la Figura 3.6.

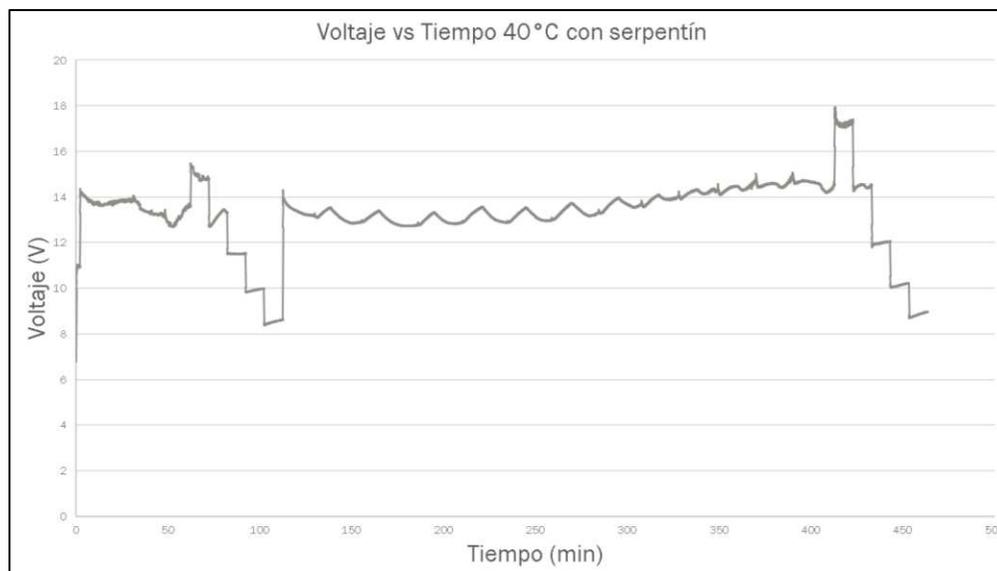


*Figura 3.6 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 30 °C usando el separador de fases con serpentín. Primera serie.*

En la gráfica anterior se observa una caída súbita de voltaje en la última hora de operación continua, debido a un paro del experimento por fugas presentadas en las

conexiones del separador, las cuales se controlaron y se continuó con la operación; y en seguida se observa una variación en el voltaje, la cual se debió a fugas en conectores, las cuales se controlaban y se presentaban nuevamente después de un lapso. Controlándose al final para la creación de la curva característica del electrolizador alcalino.

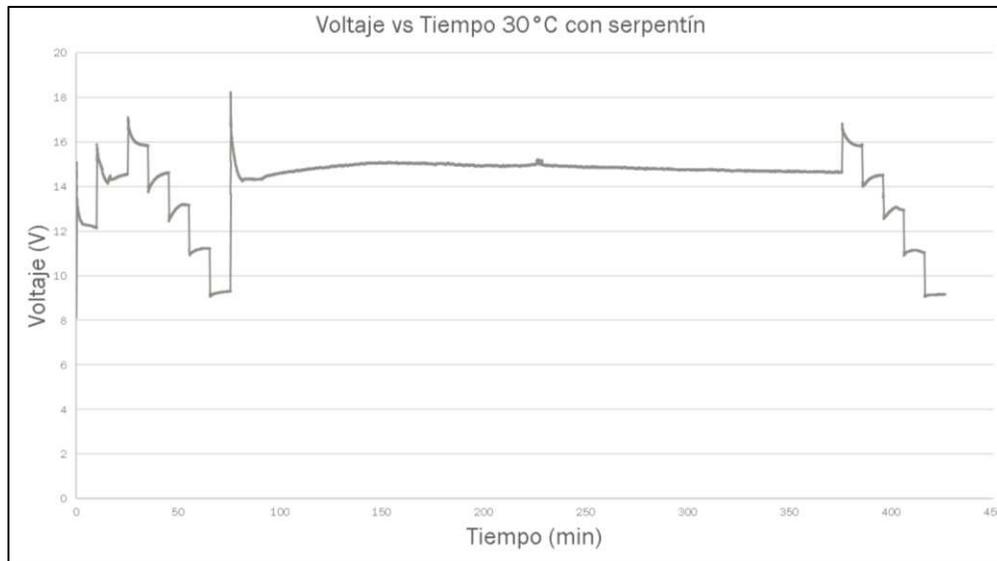
En la experimentación a 40 °C con el separador con serpentín se nota una inconsistencia en el voltaje de operación, esto se debe al problema del desfogue de los gases, como se observa en la Figura 3.7. Las ondas en la respuesta del voltaje que se observan son debido al control de temperatura realizado en la forma de ON/OFF y las inconsistencias de voltaje al final de la operación son reflejo de las fugas presentes al momento de la operación.



*Figura 3.7 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 40 °C usando el separador de fases con serpentín. Primera serie.*

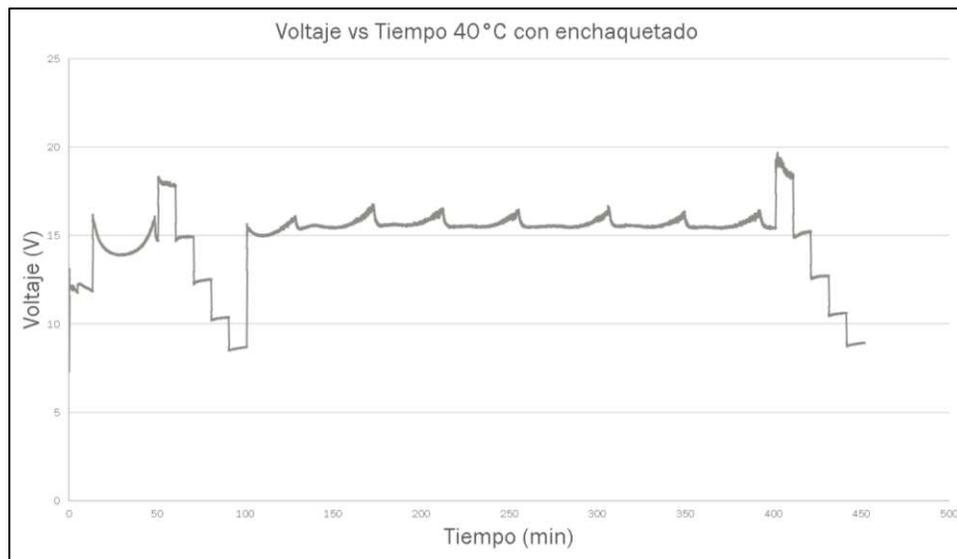
A 30 °C con el separador de fases con enchaquetado no se presentaron fugas en las conexiones del separador, solamente una fuga en el burbujeador que se controló y no generó cambios significativos en los valores de voltaje requerido, como se observa en la Figura 3.8.

La experimentación que requirió menos cambios en el control de temperatura fue la experimentación a 40 °C con el separador con enchaquetado, lo que indica menor requerimiento de energía en el baño de enfriamiento para su operación. Antes de iniciar esta experimentación se corrigió el desfogue de los gases conectándolo directamente a la manguera de venteo.



*Figura 3.8 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 30 °C usando el separador de fases con enchaquetado. Primera serie.*

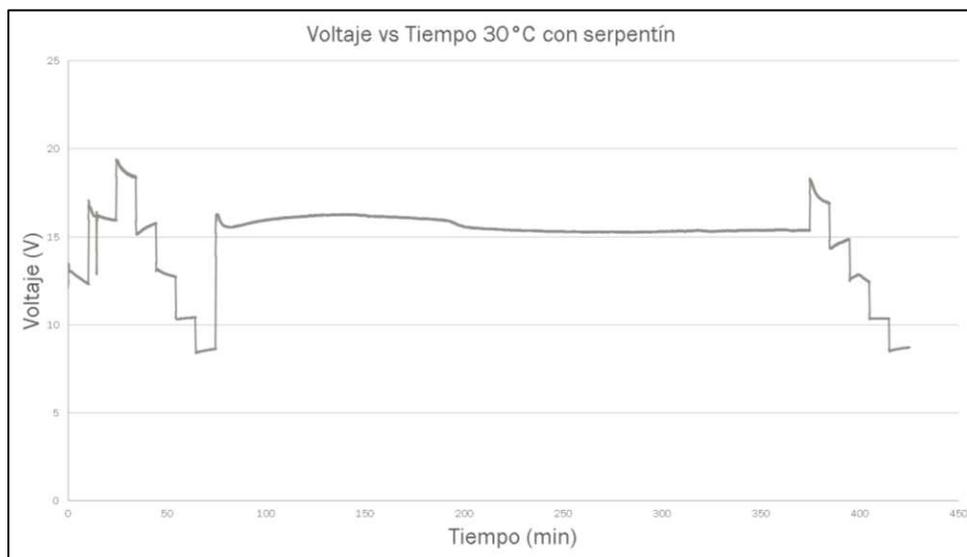
Esto se vio reflejado en una mayor consistencia en los valores de voltaje requerido por el sistema como se aprecia en la Figura 3.9. Las ondas de voltaje que se observan son generadas por el incremento de temperatura en el sistema, volviendo a un comportamiento “plano” al encender el baño de enfriamiento.



*Figura 3.9 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 40 °C usando el separador de fases con enchaquetado. Primera serie.*

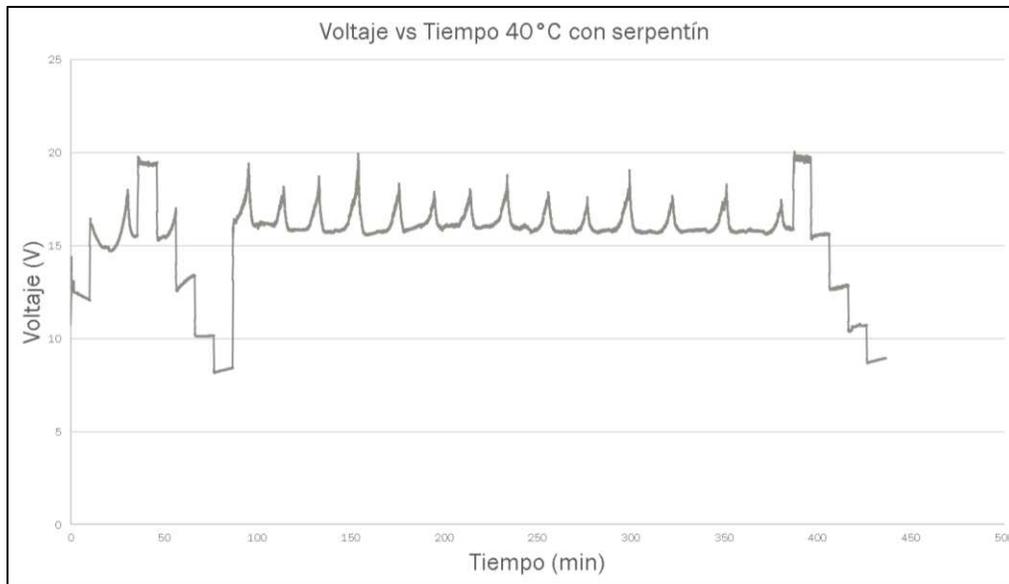
### 3.5.2 SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS

En esta segunda serie de experimentos se controlaron completamente las fugas y se retiraron las obstrucciones en el desfogue de gases. El medidor de flujo fue remplazado por otro con un rango de medición de 0 a 20 l·min<sup>-1</sup>, los valores medidos eran cercanos a los valores teóricos de gas oxihidrógeno producido. En la Figura 3.10 se observa un voltaje de operación constante debido al control de temperatura empleado en la experimentación, ya que el baño de enfriamiento se mantuvo encendido durante las 5 horas de operación constante, lo que representa una mayor demanda de energía para mantener una temperatura de 30 °C en el sistema.



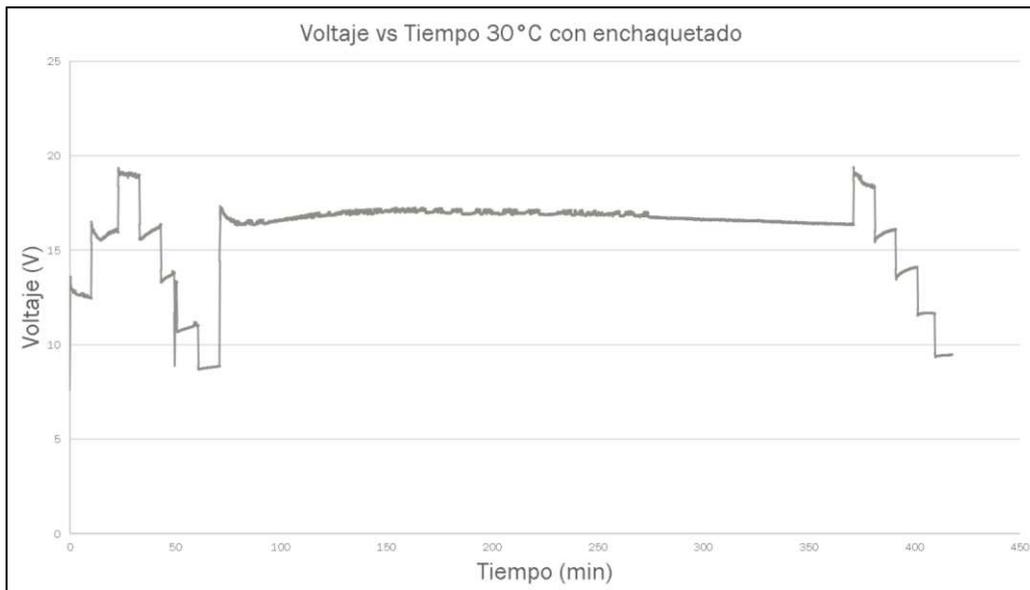
*Figura 3.10 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 40 °C usando el separador de fases con serpentín. Segunda serie.'*

En la Figura 3.11 se observan los picos de voltaje debidos al control de temperatura en el reactor con el agua de enfriamiento. Si se compara la cantidad de picos con los de la Figura 3.9 y la Figura 3.13, correspondientes a las experimentaciones con el depósito separador con enchaquetado a 40 °C, se aprecia una mayor cantidad de intervalos en la experimentación con el depósito separador con enchaquetado a 40 °C, lo que nos indica una mejor transferencia de calor en el separador con serpentín, ya que la temperatura del agua de enfriamiento necesaria fue menor que la requerida en el separador con enchaquetado, como se mostrara más adelante.



*Figura 3.11 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 40 °C usando el separador de fases con serpentín. Segunda serie.*

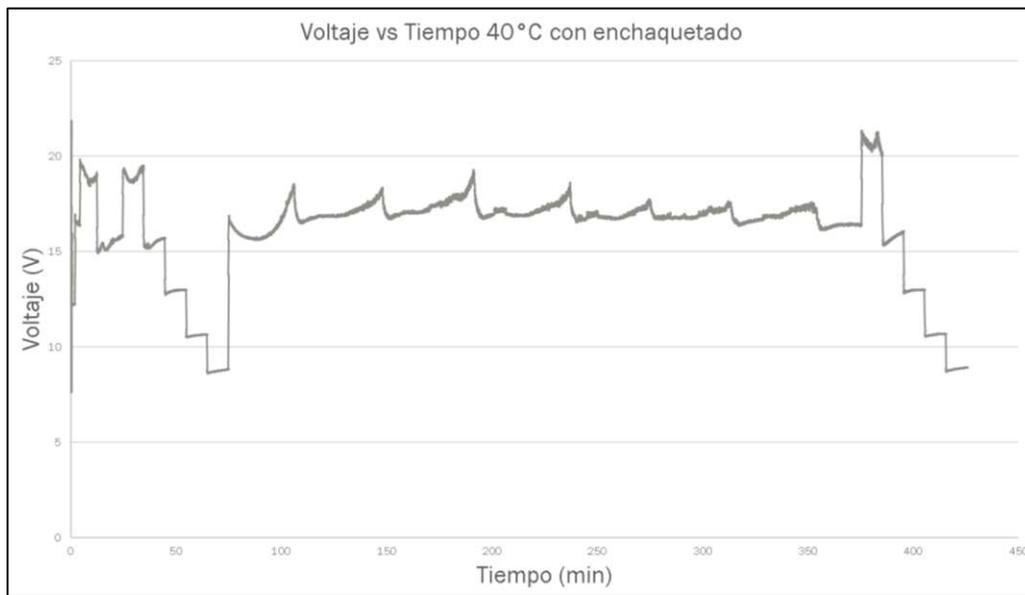
Igual que en la primera serie de experimentaciones, en la segunda experimentación con el depósito separador con enchaquetado a 30 °C se observa un voltaje constante, Figura 3.12, lo que indica una generación de gases igualmente constante.



*Figura 3.12 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 30 °C usando el separador de fases con enchaquetado. Segunda serie.*

No obstante, la energía requerida para el enfriamiento del sistema es mayor a la requerida en las experimentaciones a 40 °C, ya que el baño de agua de enfriamiento estuvo encendido durante la experimentación de 5 horas a corriente constante, además de necesitar temperaturas cercanas a 10 °C en el agua de enfriamiento.

En la última experimentación con el depósito separador con enchaquetado a 30 °C, se observa en la Figura 3.13 que al inicio de la operación hubo un voltaje correspondiente a una corriente de 20 A. Esto debido a que se presentaron fugas en el reactor al inicio de la operación, por lo que se hizo la correspondiente prueba hidrostática y después se operó a la máxima capacidad de corriente para verificar la ausencia de fugas. Después se continuó con el protocolo sin afectar las variables de temperatura y corriente de la experimentación.



*Figura 3.13 Gráfica de Voltaje contra Tiempo de la operación a 40 °C usando el separador de fases con enchaquetado. Segunda serie.*

### 3.5.3 TEMPERATURA EN EL AGUA DE ENFRIAMIENTO

Para realizar las experimentaciones con el separador de enchaquetado, el agua de enfriamiento se mantuvo en un rango de 10 °C a 15 °C, requiriendo así una mayor energía para mantener estas temperaturas. Por otro lado, las experimentaciones realizadas con el separador con serpentín requerían una temperatura del agua de enfriamiento en un rango de 20 °C a 25 °C.

Otro punto para considerar es el tiempo de operación del baño de enfriamiento durante las experimentaciones. Cuando se experimentó a 30 °C en el reactor, el baño de enfriamiento estuvo operando durante las 5 h continuas, caso contrario en las experimentaciones a 40 °C, donde se operaba el baño de enfriamiento por lapsos pequeños.

En la Figura 3.14 se observa la comparación en la temperatura del reactor en las experimentaciones a 40 °C con serpentín y con enchaquetado, donde se aprecia que alrededor del minuto 100 comienzan los picos que indican el sistema de ON/OFF del baño de enfriamiento, siendo el doble para el separador de serpentín, pero en el mismo tiempo de operación que en el separador de enchaquetado.

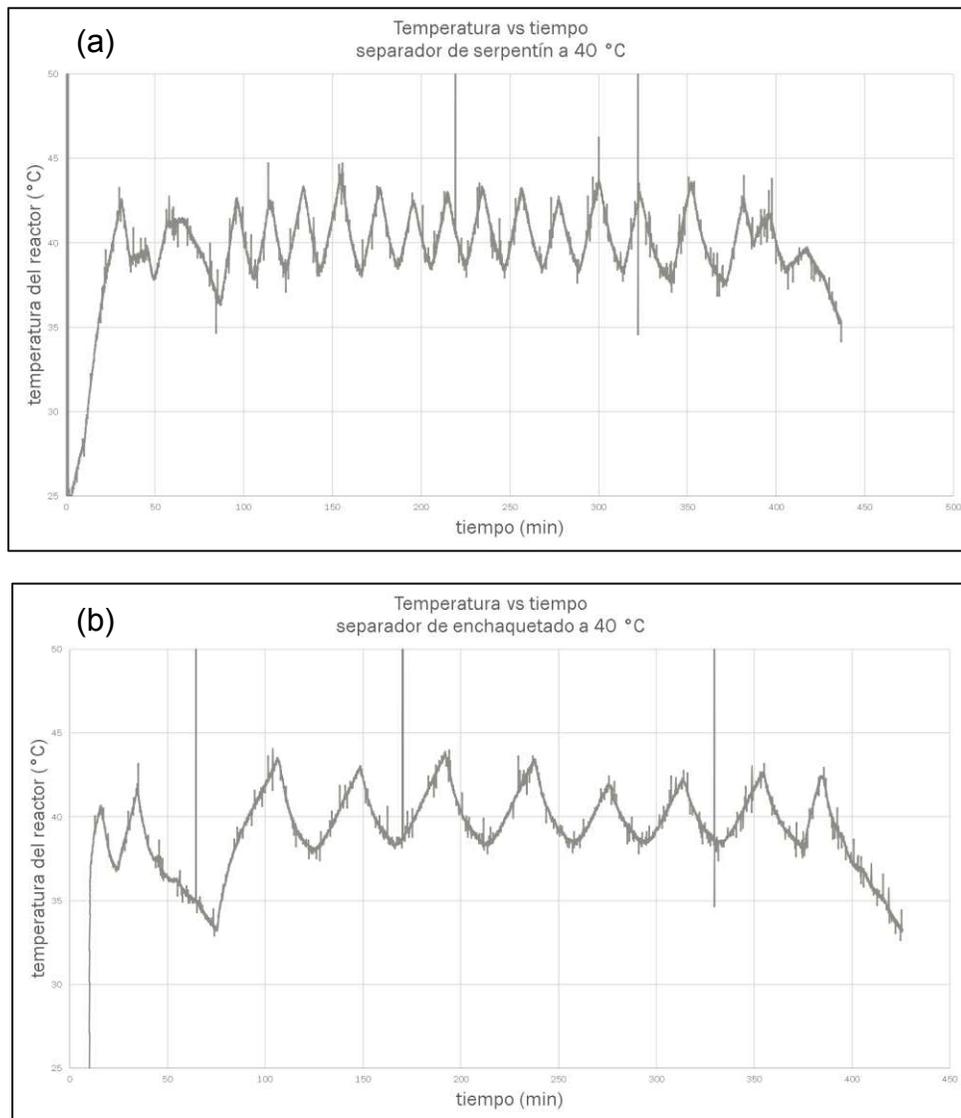


Figura 3.14 Gráficas de temperatura del reactor contra tiempo de operación para las experimentaciones a 40 °C con separador de a) serpentín y b) enchaquetado.

### 3.6 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE BURBUJEO

#### 3.6.1 PRIMERA SERIE DE EXPERIMENTOS

Los valores de conductividad en el agua de burbujeo al final de cada experimentación en la primera serie de experimentos se vieron afectados por el mal desalojo de los gases, ya que no se tenía un flujo de gas constante en el burbujeador. No obstante, representan los valores que se tendrían en una operación real del equipo en caso de no tener un mantenimiento adecuado en la instrumentación. Además, se puede analizar, bajo estas condiciones, cuales características de operación muestran una menor cantidad de arrastre de electrolito, como se observa en la Tabla 3.4. el tiempo de operación del reactor fue 5 h.

*Tabla 3.4 Tabla de conductividad del agua de burbujeo al inicio y final de la operación continua del sistema de electrólisis. Primera serie de experimentos.*

<b>Agua de burbujeo</b>	<b>Conductividad al inicio de la operación (<math>\mu\text{S}</math>)</b>	<b>Conductividad al final de la operación (<math>\mu\text{S}</math>) (Tiempo 5 h)</b>	<b>Concentración (N)</b>
30°C serpentín	1.4	335	0.0023
40°C serpentín	1.5	1815	0.0097
30°C enchaquetado	1.5	118.4	0.0012
40°C enchaquetado	1.3	180.5	0.0015

En la gráfica de conductividad vs concentración mostrada en la Figura 3.15 se observa una comparación de la concentración en el agua de burbujeo. El valor más alto de arrastre de electrolito se obtuvo en la experimentación con el depósito separador con serpentín a 40 °C con un valor de 0.01 N. Los experimentos con menor arrastre de electrolito fueron con el depósito con enchaquetado, con valores de 0.002 N y 0.001 N. Esto se le atribuye a la presencia de un quita niebla en el depósito separador con enchaquetado, ya que si se compara con los resultados de las experimentaciones con el separador con serpentín, la diferencia de arrastre

obtenido a diferentes temperaturas de operación es mayor, con una diferencia de 0.009 N aproximadamente.

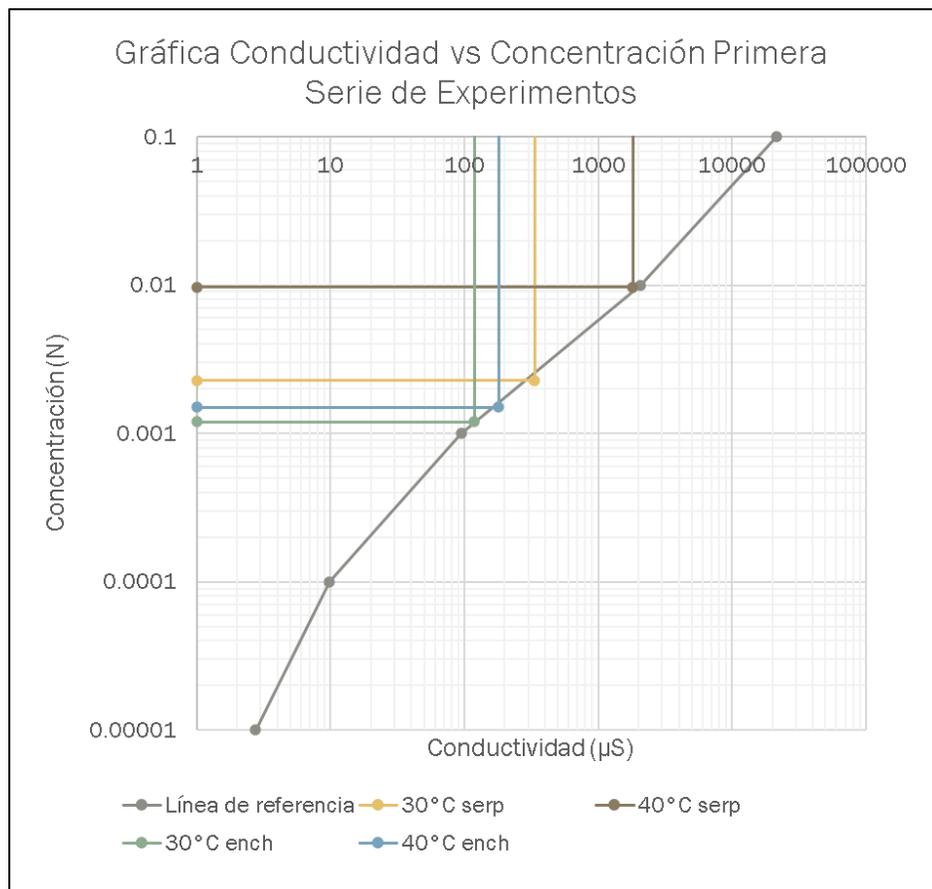


Figura 3.15 Gráfica de conductividad contra concentración de arrastre de electrolito en el agua de burbujeo al inicio y final de la operación continua del sistema de electrólisis. Primera serie de experimentos.

### 3.5.2 SEGUNDA SERIE DE EXPERIMENTOS

El efecto de la presión se observa si se comparan los valores de conductividad obtenidos en la primera y la segunda serie de experimentaciones, siendo menores en la segunda serie de experimentos. Se repiten los resultados en cuanto a que el mayor arrastre de electrolito se presentó en la experimentación con el depósito separador con serpentín a 40 °C y el menor arrastre en la experimentación con el depósito separador con enchaquetado a 30 °C. Los valores de conductividad obtenidos en la segunda serie de experimentos se presentan en la Tabla 3.5. y Figura 3.16

Tabla 3.5 Tabla de conductividad del agua de burbujeo al inicio y final de la operación continua del sistema de electrólisis. Segunda serie de experimentos.

Agua de burbujeo	Conductividad al inicio de la operación ( $\mu\text{S}$ )	Conductividad al final de la operación ( $\mu\text{S}$ ) (Tiempo 5 H)	Concentración (N)
30°C serpentín	1.4	227	0.0017
40°C serpentín	1.3	462	0.0029
30°C enchaquetado	1.4	7.1	0.00004
40°C enchaquetado	1.6	58.5	0.00058

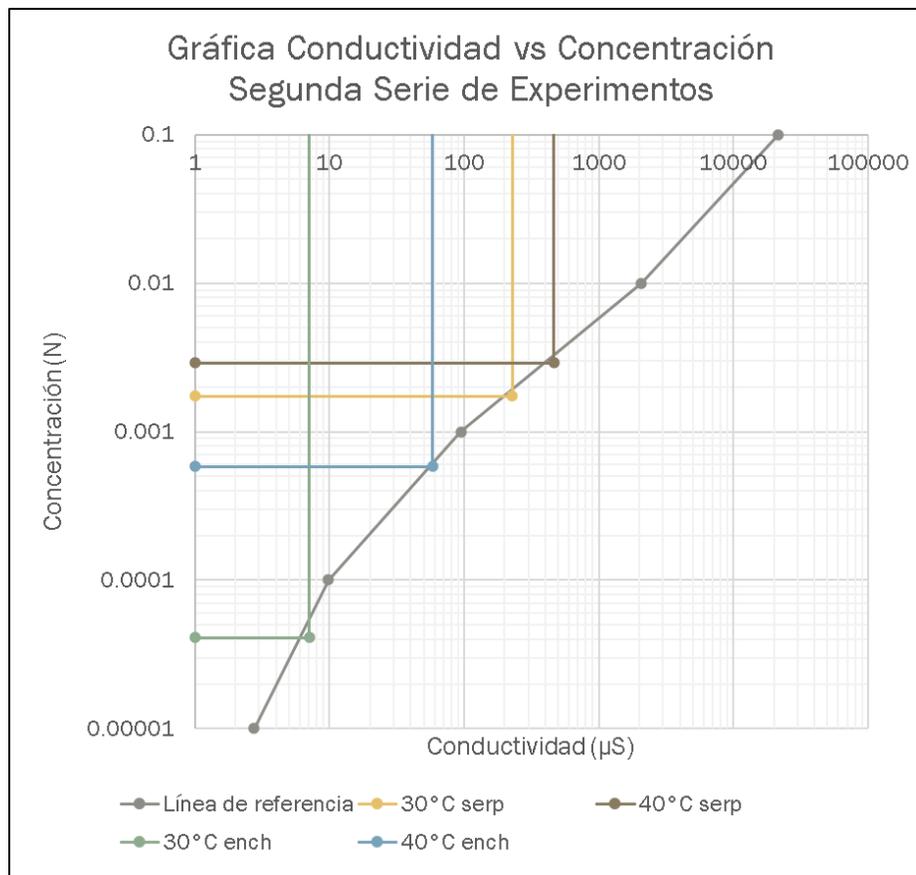


Figura 3.16 Gráfica de conductividad contra concentración de arrastre de electrolito en el agua de burbujeo al inicio y final de la operación continua del sistema de electrólisis. Segunda serie de experimentos.

Sin embargo, se mantuvo el orden en cuanto a que el sistema con mayor arrastre de electrolito fue el del separador con serpentín a 40 °C y el menor el del separador con enchaquetado a 30 °C. Se puede observar esto en la gráfica de la Figura 3.16, donde los valores de concentración no superaron los 0.003 N. Además, se aprecian valores cercanos en concentración obtenidos con el separador con serpentín

### 3.6 EFICIENCIA DE VOLTAJE

Para el cálculo de la eficiencia de voltaje se utilizó la Ecuación 1.16 aplicada a tres celdas de electrólisis, ya que son el número de celdas presentes en electrolizador debido al arreglo en serie de los electrodos, obteniéndose así la gráfica de eficiencia de voltaje contra corriente en la Figura 3.17 y Figura 3.18:

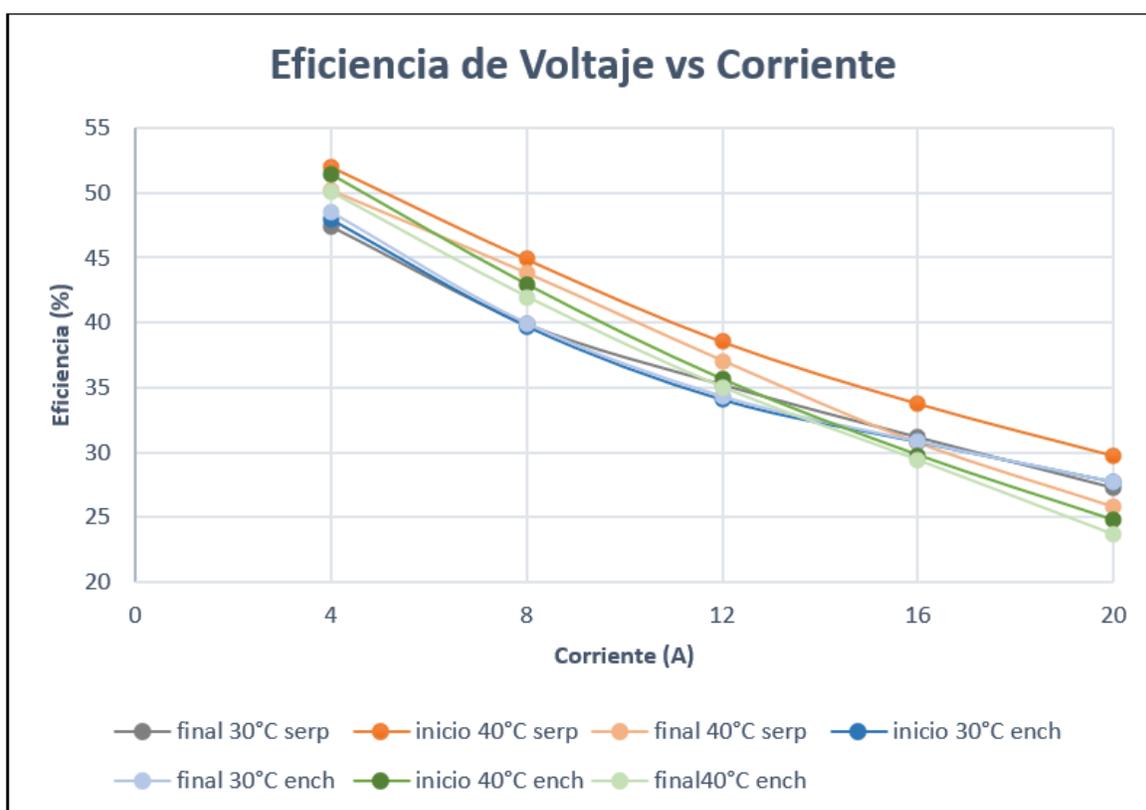


Figura 3.17 Gráfica de Eficiencia de voltaje contra corriente. Primera serie de experimentos

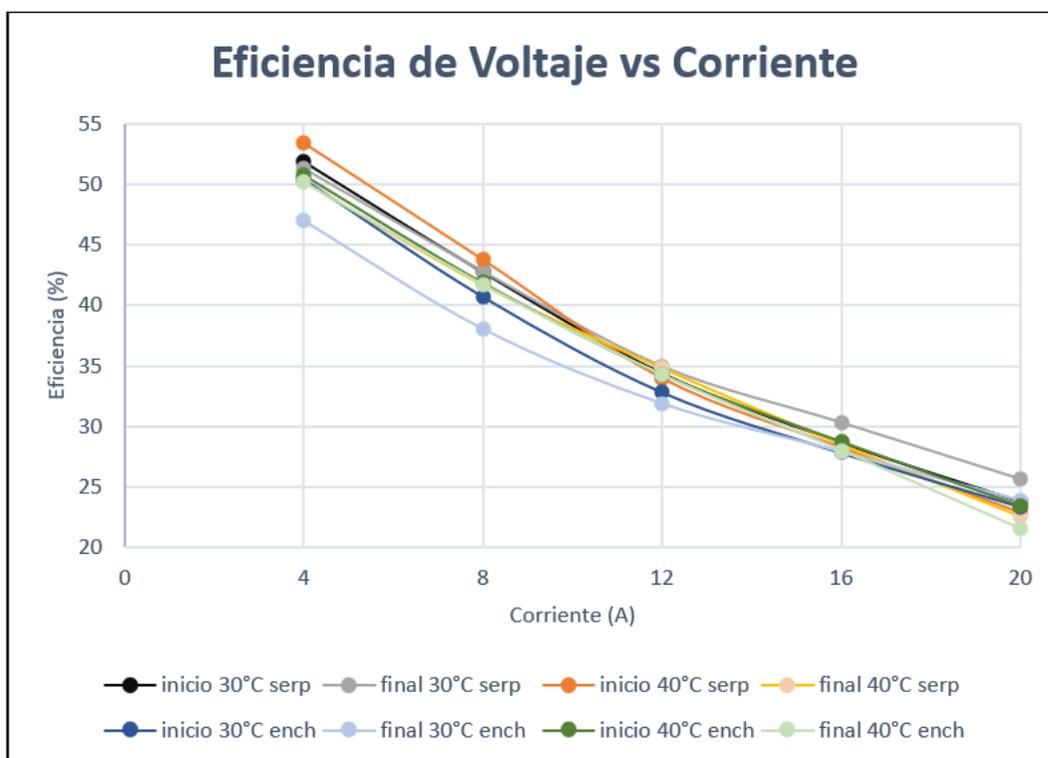


Figura 3.18 Gráfica de Eficiencia de voltaje contra corriente. Segunda serie de experimentos

Las gráficas anteriores se obtuvieron utilizando los valores promedio de voltaje de las curvas características del electrolizador alcalino (Figura 3.4 y Figura 3.5).

En la Figura 3.17 se observa que con el separador con serpentín se obtiene una mayor eficiencia en cada paso de corriente al inicio de la operación del equipo, acercándose a los valores del separador con encaquetado al final de la operación. Aquí se aprecia que la eficiencia es superior a la obtenida en la segunda experimentación en un 2% en el punto de operación (16 A), pero esto no representa lo esperado en una operación sin obstrucciones en la salida de los gases

En la Figura 3.18 se observa que, a 16 A, corriente que se aplicó durante la operación continua, la eficiencia para todas las experimentaciones tiene a un 28 %.

### 3.7 CONCLUSIONES

Se estableció una metodología para determinar de manera indirecta el arrastre de electrolito en un sistema de electrólisis alcalina, utilizando una técnica conductimétrica sencilla y barata lo cual no se había reportado en trabajos anteriores.

Con los resultados obtenidos se determinó que el separador con enchaquetado genera un menor arrastre de electrolito en los gases producidos (0.0015 N y 0.00058 N en el agua de burbujeo a 40 °C), esto atribuido al quita niebla de vidrio poroso que tiene antes de la salida de los gases. Se necesita tener mayor tiempo el agua de enfriamiento para regular la temperatura. Por otro lado, el separador con serpentín no requiere que el recirculador de agua de enfriamiento este prendido todo el tiempo, lo que indica una mejor transferencia de calor y menor demanda de energía para mantener regulada la temperatura del electrolito.

Con la primera serie de experimentos se hace notar la importancia de un correcto desalojo de los gases producidos, ya que esto influye en el voltaje requerido por el sistema y funciona como un diagnóstico para operar adecuadamente el sistema.

La eficiencia obtenida de 28 % en el punto al que se operó el electrolizador (16 A) mejoró respecto a las experimentaciones anteriores, donde se había obtenido 24%.

### PERSPECTIVAS

En el diseño de un sistema de manejo de gases es utilizar un depósito separador de fases con serpentín y quita niebla, utilizando una solución de electrolito al 15 % y 30 % en peso; como un indicador de nivel al separador para poder mantenerlo en 1/3 se su capacidad máxima. El burbujeador de gases a la salida del separador debe tener un sensor de conductividad para medir la concentración del agua de burbujeo y cuando marque 500  $\mu$ S se cambie el agua.

Siempre debe existir un buen desalojo de gases y evitar fugas en el sistema.

## REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2017. (2018) Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Dirección General de Planeación e Información Energéticas, México.
- [2] Zuñiga I., Lona L. R., Flores M. (2018). “Tecnologías verdes: energías renovables como una alternativa sustentable para México”. Memoria del XI Congreso de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad; noviembre 2017, 11, 1557-1575.
- [3] Bertuccioli L., Chan A., Hart D., Lehner F., Madden B., Standen, E. (2014). Study on development of water electrolysis in the EU. Fuel cells and hydrogen joint undertaking.
- [4] Botas J. A., Calles J. A., Dufour J., San Miguel G. (2005). La economía del hidrógeno—Una visión global sobre la revolución energética del siglo XXI. Revista de la Asociación Española de Científicos, 9, 1-12. España.
- [5] Crabtree G. W., Dresselhaus M. S., Buchanan M. V. (2004). “The hydrogen economy”. Physics today,57(12), 39-44. American Institute of Physics. Maryland, United States of America.
- [6] Oraá B. (2015) Tesis de Maestría “Estudio de la influencia del balance de planta en el comportamiento de un electrolizador alcalino” Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
- [7] Godula-Jopek A. (2015). “Hydrogen production: by electrolysis”. John Wiley & Sons. Weinheim, Germany.
- [8] Hurtado J., Soria B.. (2007). “El hidrógeno y la energía”. Reporte Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI. Madrid, España.
- [9] Oviedo Lama J. (2015). Tesis de maestría “Optimización fluidodinámica de una celda de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno” Universidad de Castilla la Mancha, Ciudad Real.
- [10] Cardona I., Herranz D. (2012). Tesis Doctoral “Desarrollo de nuevos materiales de electrodo para la obtención de Hidrógeno a partir de la electrólisis alcalina del agua”. Valencia, España.
- [11] Maio P., Houck S. (2021) Virtual Workshop, Why invest in hydrogen in Latin America and Globally in 2021, Reporte HINICIO.

- [12] Barrientos Castillo K. Y., Bernabé Meza S. J. (2013). Tesis de Licenciatura "Producción de hidrógeno por electrólisis alcalina utilizando electrocatalizadores de aleaciones ternarias" Universidad Continental. Huancayo, Perú.
- [13] Zeng K., Zhang D. (2010). "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications". Progress in Energy and Combustion Science, 36 (3) 307-326. Crawley, Australia.
- [14] Hine F. (2012). "Electrode processes and electrochemical engineering". Springer Science & Business Media. Nagoya, Japan.
- [15] Bessarabov D., Wang H., Li H., Zhao N. (2016). "PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications". CRC press. United States of America.
- [16] Rosa Iglesias M. F. (2003). Tesis Doctoral "Estudio teórico y experimental sobre la producción de hidrógeno electrolítico a partir de energía solar fotovoltaica diseño, operación y evaluación de una planta piloto de producción de hidrógeno electrolítico de 1 y 2 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>", Universidad de Sevilla, España.
- [17] Ramírez J. L. (2010). Modelo dinámico de un electrolizador alcalino. Reporte Universidad de Sevilla, España.
- [18] García J. C. (2021) Ingeniería Química.net el portal de los ingenieros químicos en español. [En línea] <http://www.ingenieriaquimica.net/>. Última consulta Octubre 2021.
- [19] Gamboa Gomez D. F. (2007). Tesis de Doctorado "Determinacion De Estandares Operativos Para Separadores", Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ing. de Petróleos. Bucaramanga, Colombia.
- [20] Díaz A., Paguay, Á., Tomalá H. (2011). Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas-líquido, Reporte Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [21] Granja B. H. 1987). Tesis de Maestría "Estudio y diseño de separadores horizontales y verticales de dos y tres fases". Guayaquil, Ecuador.
- [22] Juárez-Casildo V. (2020). Tesis de Maestría "Estudio del proceso de electrólisis alcalina para la producción de gas oxi-hidrógeno mediante modelado multifísico", ESQIE-IPN. Ciudad de México.

## Productividad

Video ganador del primer lugar en la categoría de desarrollo experimental, Prototipo de un electrolizador alcalino para la producción de hidrógeno verde por electrólisis alcalina, XXI Congreso Internacional de la Sociedad Mexicana del hidrógeno 2021.

