

**MODELACIÓN MATEMÁTICA, CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE CELDAS
DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PRESIÓN
ATMOSFÉRICA**

**JOSE MIGUEL SOTELO ACOSTA
ANDRES DAVID ESPINEL BALLESTEROS**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ-COLOMBIA**

Septiembre De 2018

**MODELACIÓN MATEMÁTICA, CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE CELDAS
DE COMBUSTIBLE PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PRESIÓN
ATMOSFÉRICA**

**JOSE MIGUEL SOTELO ACOSTA
ANDRES DAVID ESPINEL BALLESTEROS**

**DIRECTOR
Msc. -Ing. JIMMY BARCO BURGOS**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ-COLOMBIA**

Septiembre De 2018

DEDICATORIA

Primero quiero agradecer a Dios por guiarme y hacerme tomar las mejores decisiones en este proyecto y darme la sabiduría y fortaleza para seguir avanzando hasta el final y poder cumplir los objetivos que se plantearon.

A mi padre Miguel Ángel Sotelo que siempre ha sido mi inspiración y un ejemplo a seguir como persona y como profesional , a mi madre Blanca Idaly Acosta que siempre ha estado para mí , desde el inicio de mi carrera y han sido mi motivación para llegar a ser un gran profesional y cumplir todos mis sueños, empezando por culminar mi carrera en Ingeniería mecánica.

Agradecer a mi familia por el apoyo constante en momentos decisivos de mi carrera y poder llegar a ser un profesional y ser un orgullo para ellos, a mis amigos que siempre fueron una fortaleza en momentos difíciles y a Silvana Pareja Vargas que fue mi apoyo incondicional desde el principio de mi carrera y me ayudó de manera incondicional en los momentos de adversidad.

JOSE MIGUEL SOTELO ACOSTA

Por sus palabras de aliento, el apoyo incondicional, el sacrificio diario de mantener los sueños y las esperanzas sin importar las adversidades, el simple hecho de creer en mi hoy y siempre; mis triunfos y logros siempre serán de ustedes padres queridos, porque el tiempo y el esfuerzo en lo largo de mi existencia no tendrían valor alguno sin mi familia. Hoy me siento orgulloso de ser parte de ustedes porque este logro es de los tres, sin importar la distancia y los problemas que se puedan presentar siempre los voy a querer con todo mi corazón.

En sus buenos pensamientos y deseos fervientes de apoyarme; toda mi familia tiene su grano de arena en este proyecto, queriendo resaltar el soporte que representa mi “tío Lalo” y mi “tío Jaime”, los cuales considero como el sinónimo de unión, cariño y apoyo familiar.

Siempre estuviste apoyándome en todo lo que me propuse ser, siempre encontré en ti una voz de aliento en los momentos más difíciles, siendo tú la fuente de inspiración de que mañana será mejor; aunque siempre habrá dificultades, reconozco que a tu lado no hay nada imposible. Andrea López muchos logros de mi vida son gracias a ti, por el cual estaré infinitamente agradecido y espero poder ser en ti una gran ayuda en tus sueños y proyectos, te amo

ANDRES DAVID ESPINEL BALLESTEROS

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a Dios por permitirnos desarrollar este trabajo de grado sin ningún tropiezo. Seguidamente agradecer a la UNIVERSIDAD ECCI por abrirnos las puertas de la institución para formarnos como ingenieros mecánicos. Así como también agradecer a los ingenieros, docentes e instructores que nos guiaron y motivaron a seguir por el camino de la ciencia e ingeniería.

Agradecemos también a nuestro director y asesor de trabajo Msc. Ing. JIMMY BARCO BURGOS por habernos orientado, escuchado y corregido durante este largo camino de desarrollo del proyecto de investigación.

Al Ing. EDISON BARBOSA, Técnico de motores en el taller de Inyección, queremos agradecerle por darnos la oportunidad de desarrollar este proyecto dentro de las instalaciones, por su gestión y colaboración durante todo el desarrollo de este proyecto de grado.

Agradecemos a todos los colaboradores y participantes que aportaron su conocimiento, sabiduría y tiempo en cooperación en elaborar este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN.....	12
3. OBJETIVOS.....	14
4. MARCO TEÓRICO	15
5. DISEÑO METODOLÓGICO	20
5.1. Elementos utilizados para la caracterización de las celdas	21
5.1.1 Paneles Solares	22
5.1.2 Regulador de Carga	22
5.1.3 Batería.....	23
5.1.4 PWM.....	23
5.1.5 Celda Electrolizadora Alcalina	24
5.1.5.1. Electroodos	25
5.1.5.2. Empaquetaduras.....	25
5.1.5.3. Mallas de Poliéster.....	26
5.1.5.4. Mordazas	26
5.1.5.5. Racores y acoples	26
5.1.6 Burbujeador	26
5.1.7 Mechero	27
5.1.8 Cámara termográfica.....	28
5.1.9 Caudalímetro.....	28
5.1.9.1 Estructura de caudalímetro	31
5.2. Fase de recolección de datos	34
6. RESULTADOS	37
6.1. Análisis de Datos Experimentales	37
6.1.1 Datos obtenidos por perfil de llama	37
6.1.2 Datos obtenidos por caudal.....	41
6.2. Modelación matemática para electrolizadores alcalinos.....	54
6.2.1. Nomenclatura	54
6.2.2. Modelación	54
6.2.3. Modelo Electroquímico	55

6.2.4. Modelo termodinámico	56
6.2.5. Modelo electroquímico.....	57
6.3. Verificación del Modelo.....	58
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
8. BIBLIOGRAFÍA.....	63

TABLAS

Tabla 1 Elementos del sistema generador de hidrógeno [Autores].....	21
Tabla 2. Parámetros de diseño Caudalímetro [Autores]	33
Tabla 3 Datos obtenidos perfil de llama utilizando NaOH 35%.....	37
Tabla 4 Datos obtenidos perfil de llama utilizando NaOH 40%.....	38
Tabla 5 Datos obtenidos perfil de llama utilizando KOH 35%.....	39
Tabla 6 Datos obtenidos perfil de llama utilizando KOH 40%.....	40
Tabla 7 Datos obtenidos de celda A prueba 1 [Autores].....	41
Tabla 8 Datos obtenidos de celda A prueba 2 [Autores].....	43
Tabla 9 . Datos obtenidos de celda A prueba 3 [Autores].....	45
Tabla 10 . Datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores].....	46
Tabla 11 Datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores].....	48
Tabla 12 Datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores].....	49
Tabla 13 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores].....	51
Tabla 14 Datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores].....	52
Tabla 15 Parámetros de pruebas experimentales [Autores]	58
Tabla 16 Variables del modelo [Autores]	59
Tabla 17 Valores de modelo matemático [Autores]	60
Tabla 18 Caudal teórico vs Caudal Experimental [Autores].....	60

FIGURAS

Figura 1 Celda de electrólisis alcalina [29].....	15
Figura 2 Voltaje para producción electrolítica de hidrógeno ideal en función de la temperatura [27].....	17
Figura 3 Eficiencia de celda y producción de hidrógeno en función del voltaje aplicado.	18
Figura 4 A) Celda Monopolar B) Celda Bipolar [38]	19
Figura 5 Diagrama de pruebas [Autores]	21
Figura 6 Paneles Solares.....	22
Figura 7 Regulador de carga solar.....	22
Figura 8 Batería 12v	23
Figura 9 PWM	23
Figura 10 Celda Electrolizadora Alcalina [Autores]	24
Figura 11 Tanque Burbujeador [Autores]	27
Figura 12 Mechero de laboratorio [Autores].....	27
Figura 13 Caudalímetro [Autores]	29
Figura 14 Esquema Caudalímetro	31
Figura 15 Componentes Caudalímetro	32
Figura 16 Flujo de Trabajo [Autores].....	34
Figura 17 Datos obtenidos de celda A [Autores].....	42
Figura 18 Datos obtenidos de celda A [Autores].....	42
Figura 19 datos obtenidos de la celda A prueba 2 [Autores]	43
Figura 20 Datos obtenidos de la celda A prueba 2 [Autores]	44
Figura 21 Datos obtenidos celda A prueba 3 [Autores].....	45
Figura 22 Datos obtenidos celda A prueba 3 [Autores].....	46
Figura 23 datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores]	47
Figura 24 datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores]	47
Figura 25 datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores]	48
Figura 26 datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores]	49
Figura 27 datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores]	50
Figura 28 Datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores]	50
Figura 29 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores]	51
Figura 30 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores]	52
Figura 31 datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores]	53
Figura 32 datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores].....	53
Figura 33 Nomenclatura para ecuaciones en el modelo matematico	54
Figura 34 Parámetro Eficiencia de Faraday [46].....	59
Figura 35 Caudal teórico vs caudal Experimental [Autores]	61

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es considerado como uno de los mayores problemas que debe enfrentar la comunidad científica. Muchos estudios y teorías demuestran que el incremento en la concentración de gases contaminantes en la atmósfera es una de las razones del calentamiento global [1]. Plantas industriales y los automóviles son la mayor fuente de gases contaminantes emitidos a la atmósfera, debido a que usan la energía disponible en los combustibles fósiles como fuente para su funcionamiento [2] [3].

El actual suministro energético primario en el mundo, conformado por el 31 % en petróleo, 29 % en carbón, 21 % en gas natural y 5 % en energía nuclear, evidencia la actual dependencia en fuentes no renovables limitadas por las reservas disponibles. De igual modo la limitada disponibilidad en combustibles renovables ha resultado en un aumento en uso y precio de las fuentes no renovables las cuales son mayoritariamente usadas para el funcionamiento del sector transporte e industrial [4]. El transporte es una de las problemáticas más importantes en las zonas urbanas alrededor del mundo [5]. El aumento del costo de combustible, la contaminación ambiental y la congestión en carreteras son algunas de las preocupaciones que han llevado a la necesidad de considerar formas alternativas de transporte y la búsqueda de tecnologías alternas que permitan disminuir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de los motores de combustión interna. Esta problemática ha motivado a investigadores a buscar soluciones que no requieran drásticas modificaciones en el diseño de los motores y que no generen impacto negativo en el rendimiento y los costos de manufactura [6].

Entre las diferentes soluciones, está el uso de combustibles alternativos como el hidrógeno (H_2) que garantiza un aumento en la eficiencia en el motor y la generación de vapor de agua como único subproducto de la combustión [5][7][8]. Aunque este tipo de tecnologías es madura, desde el punto de vista comercial no es posible implementar, ya que la construcción de un sistema generador de hidrógeno, integrado al sistema del motor y los elevados costos de manufactura genera un impacto desfavorable en el precio final del vehículo [3]. A pesar de esto, Para evitar los problemas de almacenamiento, recarga y elevados costos de generación de combustible de hidrógeno, una de las tecnologías más económicas es la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno como único combustible o como combustible complementario para su uso en motores de combustión interna [1].

Por lo tanto, el presente proyecto tiene como objetivo modelar matemáticamente, caracterizar y diseñar celda de combustible para la producción de hidrógeno a presión atmosférica con el fin de generar parámetros de optimización sobre la producción de hidrógeno frente a cambios en variable de operación (voltaje, corriente, temperatura, electrólito y diseño de celda) con miras a implementar la tecnología en motores de combustión interna.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En vista de que el consumo de energía es cada día más alto y teniendo en cuenta que las fuentes de energía convencionales se obtienen de recursos naturales no renovables, los cuales son los principales causantes de la contaminación ambiental, surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía que además de abastecer la demanda no contaminen el medio ambiente [12,46]

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, en la Tierra es igual de abundante pero no se encuentra en su forma gaseosa (aprovechable energéticamente), se encuentra principalmente combinado con el oxígeno formando agua. Por lo tanto, no hay que observar como una fuente de energía primaria sino como un vector energético. Su producción tiene la ventaja de desacoplar la generación de energía con el consumo, cosa que viene a mitigar el problema de aleatoriedad en la disponibilidad de las energías renovables y su uso no produce emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente y su producción se realizó mediante materias primas libres de carbón. [36]

Los electrolizadores alcalinos, combinados con formas limpias de energía primaria (eólica, solar), son una alternativa prometedora para la producción de hidrógeno. Son muchos los sistemas aerogeneradores-electrolizador y paneles fotovoltaico-electrolizadores que se han probado pero la ventaja adicional que presentan los paneles solares es que suministran energía eléctrica directamente sin la necesidad de utilizar un conversor. Aunque la tecnología de electrolizadores es bien conocida, todavía deben superarse obstáculos: reducción de consumo energético, costo, mantenimiento, e incremento de eficiencia. [38]

Los motores de combustión interna empleados en el sector transporte son máquinas térmicas que se caracterizan por tener una eficiencia muy baja, inferior al 25%, lo que significa que desperdicia más del 75% de la energía suministrada. Un vehículo tradicional está sujeto a las siguientes pérdidas: 6% en la transmisión, 11% por ociosidad, 65% en el motor, y 2% en accesorios, y queda solo un 16% de energía útil. [47]

En la Figura 1 se presenta un diagrama de la canasta energética del mundo, para el año 2016 de acuerdo con las fuentes y con los sectores de consumo. Se observa la participación del sector transporte con un 28% y cómo este sector depende en un 95% de los derivados del petróleo, y en un 3% del gas natural. [47,5].

Energía primaria en el mundo por fuente y consumo por sector 2006 (cuadrillones de BTU)									%
Consumo	Carbón	Petróleo	Gas	Geotérmica	Renovables	Electricidad	Calor	Total	
Total	27.7	138.2	48.9	0.4	41.3	53.4	10.8	320.8	100%
	9%	43%	15%	0%	13%	17%	3%		
Industria	21.8	13.1	17.2	0.0	7.5	22.2	4.7	86.5	27%
	25%	15%	20%	0%	9%	26%	5%		
Transporte	0.1	83.5	2.8	0.0	0.9	0.9	0.0	88.4	28%
	0%	95%	3%	0%	1%	1%	0%		
Otros sectores	4.5	18.7	23.5	0.4	32.9	30.3	6.2	116.6	36%
Uso no energía	1.2	22.8	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	9%

Figura 1 . Matriz de la energía primaria en el mundo 2006 [47]

2. JUSTIFICACIÓN

El incremento en la concentración de gases contaminantes emitidos por los automóviles, la limitada disponibilidad de fuentes no renovables y el uso masivo de motores de combustión interna como fuente de potencia mecánica para la generación de electricidad y movilidad ha motivado a la comunidad científica a trabajar en alternativas que permitan mejorar la eficiencia de los motores de combustión interna [9].

Aumentar la eficacia de los motores de combustión interna es uno de los enfoques a corto plazo más prometedores y rentables para aumentar la economía en combustibles de los vehículos de carreteras. Las actividades de investigación y desarrollo se han centrado en la fabricación de motores de combustión interna de muy alta eficiencia con el fin de reducir el consumo de combustible lo que permite una mayor seguridad económica, ambiental y energética. Las estrategias avanzadas de combustión, recuperación de la energía calorífica residual del motor y el desarrollo de tecnologías híbridas que reduzcan el consumo de combustible y las emisiones de gases sin la necesidad de realizar cambios drásticos en el diseño del vehículo han sido los focos de trabajo [10].

Los combustibles alternativos usados en motores de combustión interna incluyen alcoholes como etanol, gas natural, gas licuado de petróleo, biodiesel, gas de síntesis e hidrógeno. La importancia de usar combustibles alternativos se atribuye a la necesidad de garantizar sostenibilidad energética a través del uso de combustibles alternativos derivados de fuentes de energía renovable, mejorar la eficiencia y emisiones del motor y aliviar el uso desequilibrado de combustibles fósiles convencionales basados en petróleo [9].

El hidrógeno puede ser generado a partir de recursos fósiles, como el gas natural y carbón, así mismo como de fuentes renovables como la biomasa y la electrólisis del agua. Sin embargo, hoy más del 90 % del hidrógeno producido es derivado de fuentes fósiles [1].

En la electrólisis, se hace pasar una corriente eléctrica a través de una sustancia conductora (electrólito) para conducir una reacción no espontánea. La reacción de interés es la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno; esta reacción es endotérmica y se requiere una entrada de energía para llevarse a cabo. Un electrolizador de agua consiste en una serie de celdas electroquímicas, siendo los componentes principales de cada celda dos electrodos (ánodo y cátodo) y el electrólito [11].

A lo largo de los años, el creciente interés por la electrólisis del agua ha llevado al desarrollo de diversos tipos de electrolizadores. Las celdas electrolizadoras de membranas de intercambio de protones (CEMIP) y las celdas electrolizadoras

alcalinas (CEA) son los tipos más comunes de electrolizadores de agua. Los electrolizadores (CEMIP) ofrecen alta eficiencia y más compactibilidad en comparación con los electrolizadores de tipo alcalino [12]. Sin embargo, los electrolizadores (CEMIP) requieren electrodos más costosos, membranas poliméricas y componentes especiales para resistir la corrosión. Mientras los electrolizadores (CEA) son una tecnología madura con métodos más fáciles para la producción de hidrógeno, ofreciendo la ventaja de la simplicidad y con eficiencias moderadas entre 59 y 70 % [12] [13].

Los modelos matemáticos son desarrollados para dar una buena representación de los fenómenos físicos, químicos y eléctricos que ocurren en la electrólisis del agua. Un buen modelo matemático es aquel que permite reproducir la operación real con un aceptable grado de desviación, un buen modelo matemático puede encontrar las condiciones óptimas de operación o los parámetros para la fabricación de una celda electrolítica, asimismo permite identificar condiciones peligrosas o poco eficientes de operación, proporcionando información sobre una mayor amplitud de condiciones de operación de las que se pueden obtener experimentalmente, mejorar interpretación de los resultados experimentales y permitir escalamiento en tamaño de celdas para diferentes aplicaciones [13] [14] [15].

Los retos para el uso generalizado de la electrólisis del agua están en la reducción en consumo de energía, costo y mantenimiento; así mismo en el aumento de la confiabilidad, durabilidad y seguridad [12]. Al mismo tiempo la necesidad de hacer los motores más eficientes, con menor impacto en emisiones contaminantes, usando combustibles alternativos provenientes de fuentes renovables y uso de sistemas auxiliares que puedan ser fácilmente integrados tanto a vehículos nuevos como usados. Justifica la necesidad en el modelamiento matemático, caracterización y diseño de celda de combustible para la producción de hidrógeno a presión atmosférica con el fin de generar parámetros de optimización sobre la producción de hidrógeno frente a cambios en variable de operación (voltaje, corriente, temperatura, electrólito y diseño de celda) con miras a implementar la tecnología en motores de combustión interna.

3. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Modelar matemáticamente, caracterizar y diseñar una celda de electrólisis de agua para la producción de hidrógeno a presión atmosférica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Poner a punto el banco de prueba para celdas de electrólisis de agua.
- Caracterizar de 3 celdas de electrólisis de agua comerciales bajo variables de funcionamiento tales como densidad de corriente, voltaje, temperatura, electrólito usado y geometría de celda.
- Desarrollar el modelo unidimensional para una celda de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno.
- Comparar la relación de voltaje [V] vs densidad de corriente [mA cm^{-2}] entre datos experimentales y predicción del modelo en el rango de operación de temperatura y presión constante.
- Definir parámetros de diseño para celdas de electrólisis que se integren a motores de combustión interna.

4. MARCO TEÓRICO

En la Figura #1 se muestra una celda de electrólisis alcalina típica, el principio de funcionamiento es el paso de una corriente eléctrica continua entre dos electrodos inmersos en un electrolito. El hidrógeno se forma en el cátodo y el oxígeno en el ánodo (terminal positivo). La producción de hidrógeno es directamente proporcional a la corriente que pasa a través de los electrodos [14] [27] [28].

Los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, tener buena conductividad eléctrica, exhibir buenas propiedades catalíticas, mostrar integridad estructural adecuada y no reaccionar con el electrolito [27]. La reacción química global de la electrólisis del agua se puede escribir como:

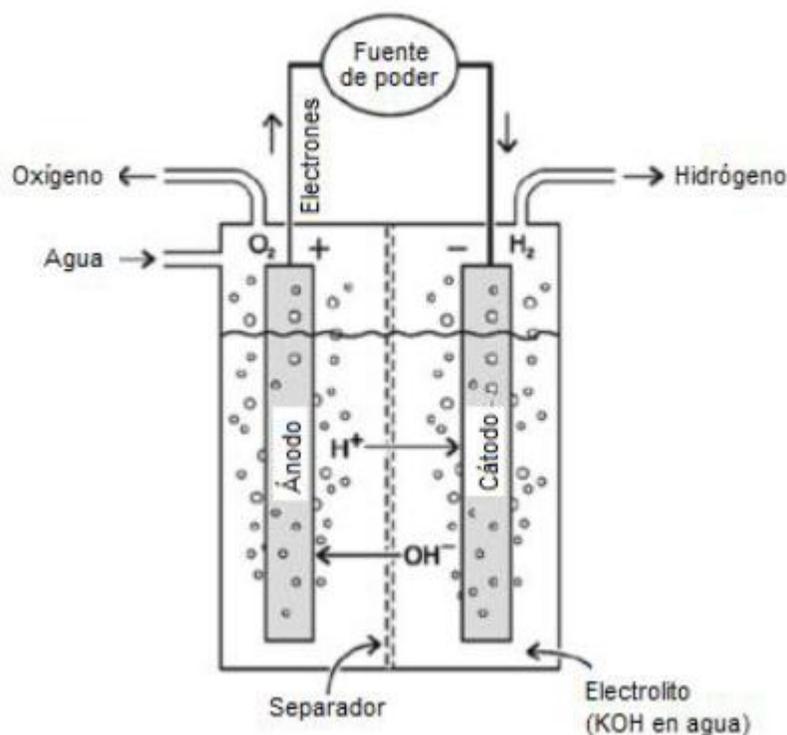
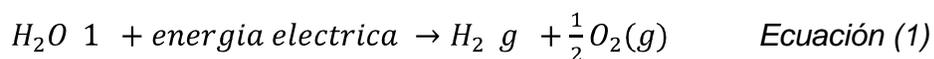


Figura 1 Celda de electrólisis alcalina [29]

Para su correcto funcionamiento se requiere la implementación de un diafragma o separador para evitar la recombinación del hidrógeno y el oxígeno para preservar la eficiencia y la seguridad. Los electrodos, el separador y el electrolito forman la celda electrolítica. Los electrólizadores de agua y las pilas de combustible utilizan

tecnología similar, y el proceso en pilas de combustible es el inverso; el hidrógeno se convierte en electricidad y calor. En términos generales los electrolizadores de agua son más eficientes que las pilas de combustible [29] [30].

En la electrólisis del agua, la energía eléctrica y térmica se convierte en energía química que se almacena en el hidrógeno. La energía requerida para la reacción descrita en la ecuación (1) es la energía asociada en la entalpía de formación del agua ΔH . Sólo la energía libre de esta reacción, llamada la energía libre de Gibbs ΔG . Tiene que ser suministrada a los electrodos en forma de energía eléctrica. El resto es energía térmica, que es el producto de la temperatura de proceso T del cambio de entropía ΔS [14] [27] [28] [30].

El cambio de entalpía se expresa como [14] [28] [31]:

$$\Delta H = \Delta G + T \Delta S = zF \left(T \frac{\partial U_{rev}}{\partial T} - U_{rev} \right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde z es el número de moles de electrones transferidos en la reacción, F es la constante de Faraday (96485,3365 C/mol), U_{rev} es el voltaje reversible y p la presión predominante en pascales. El voltaje de celda reversible U_{rev} es el voltaje más bajo requerido para que ocurra la electrólisis y también se conoce como la tensión de equilibrio o fuerza electromotriz de la celda electrolítica. El trabajo eléctrico realizado por una celda electrolítica es igual al cambio en la energía libre de Gibbs a una temperatura y presión constante y una fuerza motriz positiva [14][30][32].

$$\Delta G = -zFU_{rev} \quad \text{Ecuación (3)}$$

En la Figura 2 se muestra la relación que existe entre el voltaje ideal para la producción electrolítica de hidrógeno en función de la temperatura, el rango de temperatura presentado es 25 °C a 250 °C, la línea verde representa el voltaje de celda reversible U_{rev} y la línea roja corresponde al voltaje termoneutral U_{tn} . Sin la generación o absorción de calor por energía térmica, el voltaje mínimo requerido para la descomposición del agua es la tensión termoneutral U_{tn} . A la temperatura y presión atmosférica estándar ($T=298.15$ K, $p=1$ bar), las tensiones calculadas reversibles y termoneutrales son $U_{rev}=1,23$ V y $U_{tn}=1,48$ V para $\Delta G=237,21$ kJ/mol, $\Delta S=0,16$ kJ/mol.K, $\Delta H=285,84$ Kj/mol [27][30][33].

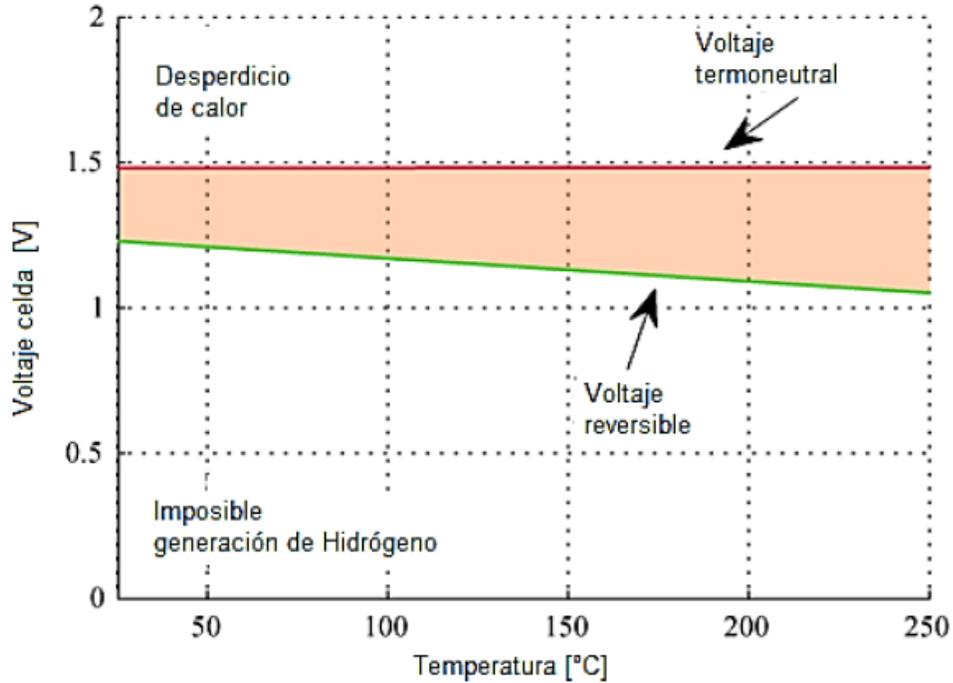


Figura 2 Voltaje para producción electrolítica de hidrógeno ideal en función de la temperatura [27]

En la Figura 3 se muestra la relación que existe entre la eficiencia de la celda electrolítica, la producción de hidrógeno y el voltaje aplicado. De esta figura se entiende que a medida que aumenta la temperatura del electrolito, el voltaje ideal requerido para separar las moléculas de agua disminuye. Si el potencial de la celda está por debajo del voltaje reversible, la generación de hidrógeno es imposible. El voltaje termo neutral es el voltaje mínimo real que tiene que ser aplicado a la celda electrolítica; por debajo de este voltaje la electrólisis es endotérmica, por encima es exotérmica y se genera calor residual. Si la reacción se produjera en el área de rosado mostrado en la Figura 2, la eficiencia sería del 100% y la separación del agua se produciría absorbiendo calor del ambiente [27] [28][30].

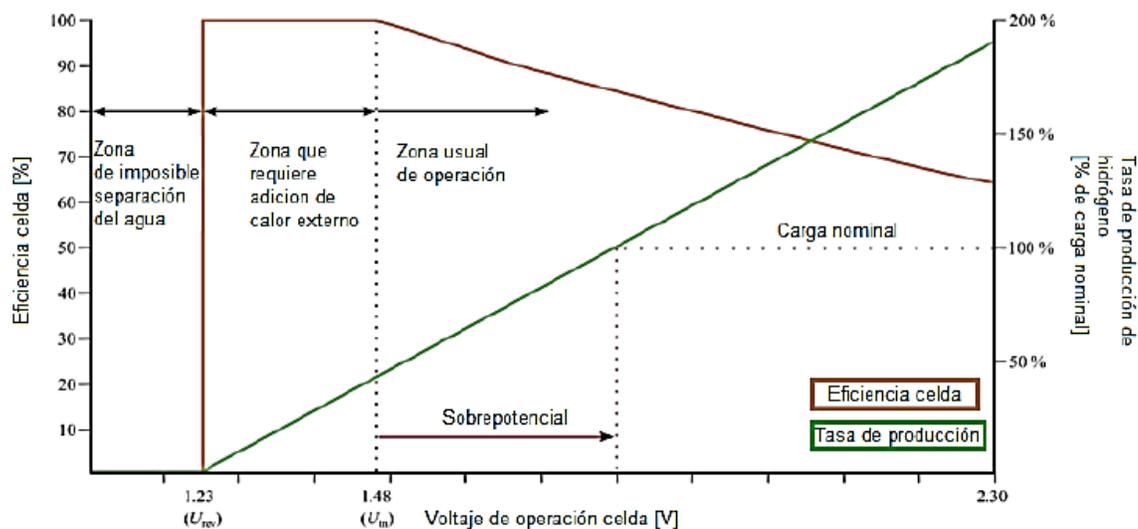


Figura 3 Eficiencia de celda y producción de hidrógeno en función del voltaje aplicado.

En la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua el voltaje de la celda aumenta con el aumento de la tensión o voltaje reversible. Esto se debe principalmente a sobretensiones y corrientes parasitas, que generan pérdidas de energía y limitan la eficiencia de la célula. El voltaje de la celda es la suma del voltaje reversible y las sobretensiones adicionales que aparecen en la celda [19] [27] [34].

$$U_{celda} = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{con} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde U_{celda} es el voltaje de la celda, U_{ohm} es el sobre potencial debido a las pérdidas óhmicas (perdidas por resistencia) en los elementos de la celda electrolítica, U_{act} es el sobre voltaje de activación y U_{con} está relacionado con el sobre voltaje a causa de la concentración. Las pérdidas óhmicas es la electrólisis del agua están relacionadas con el desperdicio de energía eléctrica en forma de calor de acuerdo con la ley de Ohm y son proporcionales a la corriente eléctrica. La oposición del flujo iónico del electrolito, la formación de burbujas de gas en la superficie de los electrodos y el diafragma hacen parte de las resistencias eléctricas de una celda electrolítica. Las pérdidas óhmicas dominantes son las pérdidas iónicas causadas por el electrolito. El voltaje de activación U_{act} es el sobre voltaje causado por la cinética del electrodo y depende en gran medida de las propiedades catalíticas de los materiales usados en la fabricación de los

electrodos. El voltaje de concentración U_{con} es causado por los procesos de transporte másico. Las limitaciones de transporte reducen la concentración de reactivos de los productos en la interface entre el electrodo y el electrólito. Como regla general se tiene que el sobre voltaje por concentración es mucho menor que el voltaje de activación y las pérdidas óhmicas [30] [34].

Por último, la transferencia de masa convectiva y la formación de burbujas juegan un papel esencial en la eficiencia de los sistemas que integran las celdas electrolíticas. La transferencia de masa convectiva es esencial en la transferencia iónica, la disipación y distribución de calor, asimismo en el comportamiento de las burbujas de gas en el electrólito. Una mayor transferencia de masa da lugar a mayores velocidades de reacción, pero por otro lado conduce a una formación aumentada de burbujas de gas, lo que puede dificultar el contacto entre los electrodos y el electrólito, estas burbujas de gas sobre la superficie de los electrodos incrementan localmente la resistencia eléctrica debido a la menor conductividad del gas con respecto al electrólito. La separación de las burbujas de gas puede ser acelerada mediante la recirculación del electrólito. Esta recirculación también iguala los niveles de concentración en el electrólito, ayudando así a evitar que se produzcan sobretensiones adicionales [12] [30] [35].

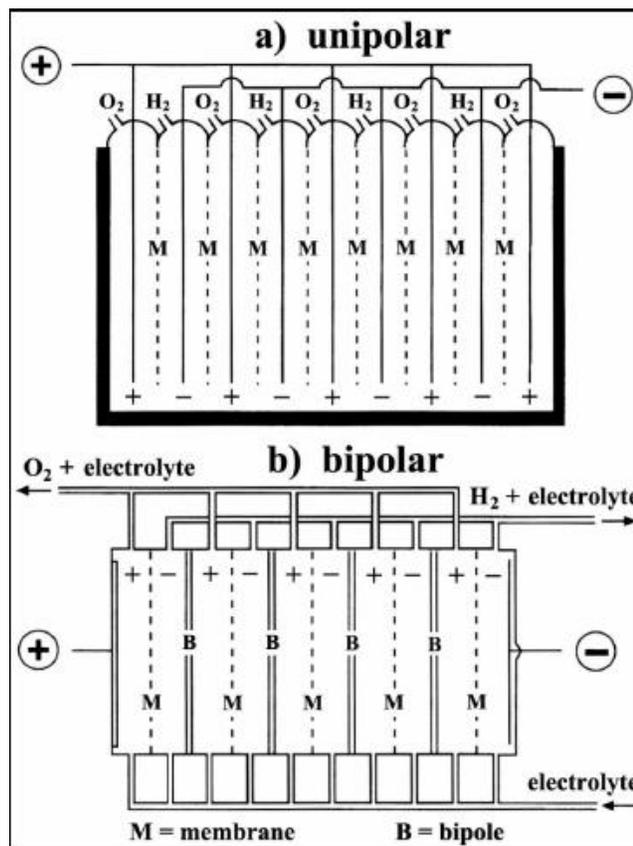


Figura 4 A) Celda Monopolar B) Celda Bipolar [38]

5. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico de este proyecto fue teórico-experimental, haciendo una comparación de los datos obtenidos de la práctica y comparándolos con el modelo matemático, en el cual se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizó la caracterización de tres (3) celdas electrolizadoras alcalinas de 4, 12, 16 litros utilizando como electrolito NaOH al 35% y 40% y KOH al 35% y se realizó una toma de datos tales como: Amperaje, Voltaje, Potencia, Tiempo, Caudal.
- Se realizó el planteamiento del modelo electroquímico para hacer un cálculo de la producción de hidrogeno y hacer un comparativo con los datos experimentales.
- Se diseño y se puso a punto el sistema de calibración de celdas de electrólisis de agua: Se instaló la fuente de voltaje variable, el tablero de sujeción de celdas, el sistema de adquisición de datos para medición de pérdida de masa de electrólito, Adicional se instaló un caudalímetro para cuantificar el gas generado y una línea de toma de muestra de gas, También se instaló un sistema de control y seguridad para el mantenimiento de los componentes que integran la celda de generación.
- Se cambió el agua desmineralizada, los empaques y tornillos, además de realizar un mantenimiento preventivo al ánodo y cátodo para cada una de las celdas, después de la realización de las pruebas de medición de caudal con diferentes parámetros.
- Se instalan las celdas en el sistema de calibración para la toma de datos as que generan las variables controladas en la producción de gas combustible, mediante el uso de herramientas y equipos de control como el PWM permitiendo la regulación de voltaje y corriente, además del caudalímetro que cumpla como equipo de medición de caudal generado en el sistema
- Se realiza el estudio de perfil de llama para evaluar las características del gas generado por la celda electrolizadora alcalina en procesos de combustión
- Se generaron variables de optimización del diseño para celdas de electrólisis y se identificaron las fortalezas y debilidades de los sistemas comerciales de electrolisis de agua analizados.

5.1. Elementos utilizados para la caracterización de las celdas

A continuación, se describen y se representan los componentes que hicieron parte de las pruebas.

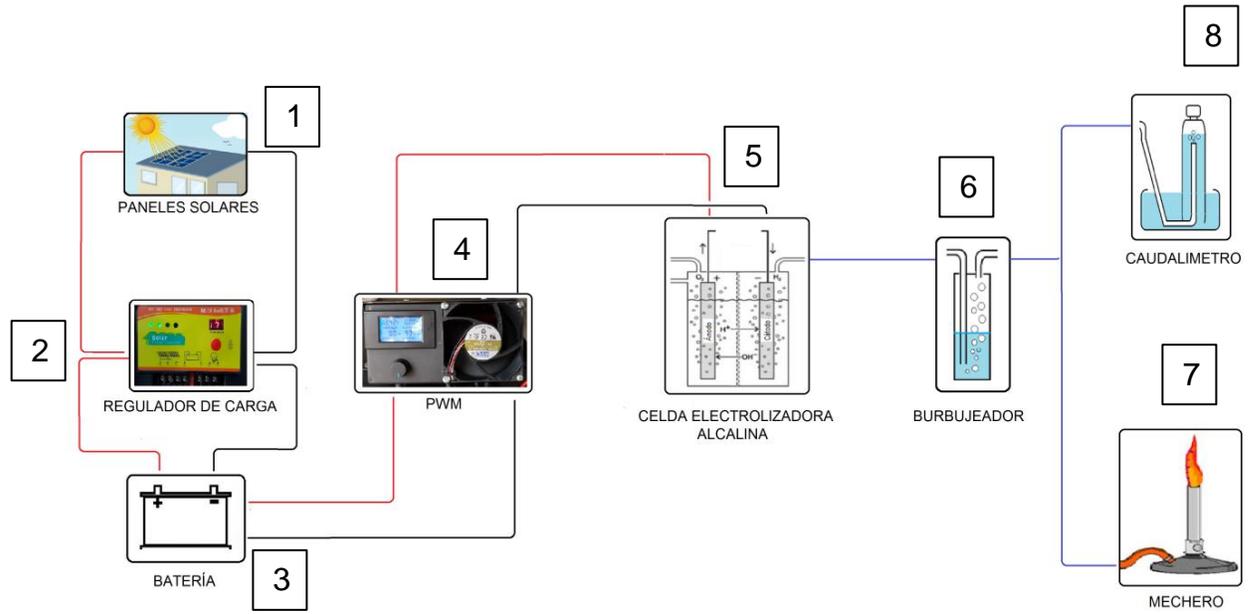


Figura 5 Diagrama de pruebas [Autores]

Tabla 1 Elementos del sistema generador de hidrógeno [Autores]

ITEM	ELEMENTOS	REFERENCIA
1	PANELES SOLARES	Policristalinos de 12V-130W
2	REGULADOR DE CARGA	MPPT 5 Amperios
3	BATERÍA	MT121550 12V 155AH
4	PWM	AVC U7581
5	CELDA ELECTROLIZADO-ALCALINA	4 litros - 12 litros -16 litros
6	BURBUJEADOR	Tanque 2 Litros
7	MECHERO	Mechero de laboratorio
8	CAUDALIMETRO	

5.1.1 Paneles Solares

La fuente de energía es generada principalmente por la existencia de dos paneles policristalinos como lo muestra la Figura #6., de 12V-130W conectados en paralelo los cuales están instalados en el techo del laboratorio de inyección y sincronización de la universidad ECCI.



Figura 6 Paneles Solares

5.1.2 Regulador de Carga

Como elemento siguiente encontramos un regulador de carga como lo muestra la Figura #7. Cuya misión es mantener el flujo de corriente y el voltaje que se dirige a la batería de forma segura y protegiendo los elementos de sobrecargas y sobre voltajes. La conexión entre los paneles solares, el regulador de carga y la batería se hace mediante un cable encauchetado AWG 2x10, el cual se caracteriza por evitar calentamiento excesivo por el paso de corriente.

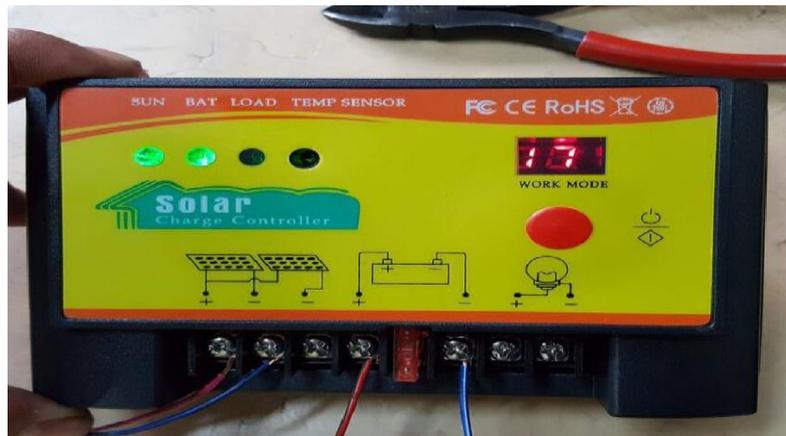


Figura 7 Regulador de carga solar

5.1.3 Batería

La batería de ciclo profundo cumple con el trabajo de almacenar la energía producida por los paneles policristalinos y controlados por el dispositivo electrónico regulador de carga, con la capacidad de trabajar entre los límites de sobrecarga y mínima carga.



Figura 8 Batería 12v

5.1.4 PWM

El PWM (modulador de ancho de pulso corriente constante) es el componente encargado de proporcionar el voltaje y la corriente requerida para controlar el sistema de hidrógeno, el circuito electrónico modera el pulso de corriente de entrada en la celda de hidrógeno y logra mantener temperaturas bajas para prolongar la vida útil de esta.



Figura 9 PWM

5.1.5 Celda Electrolizadora Alcalina

La celda electrolizadora alcalina es vital en este ciclo pues realiza la separación del hidrógeno mediante un electrolito seleccionado como combustible y una membrana polimérica separa la parte del ánodo de la del cátodo en una celda, su función es el permitir solo el paso de los iones de hidrogeno (H^+) a través de ella y ser impermeable al paso de otros agentes como son los gases o impurezas.

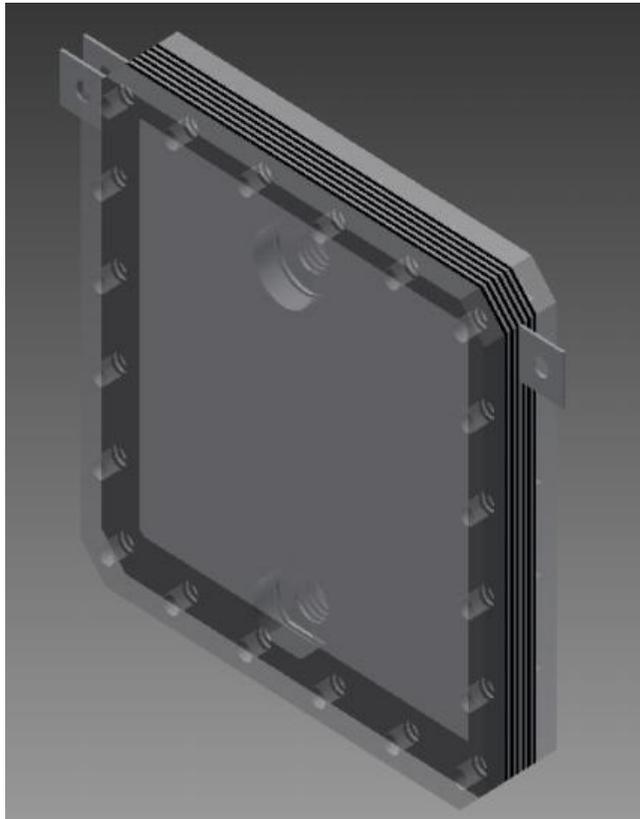


Figura 10 Celda Electrolizadora Alcalina [Autores]

Existen algunos diseños estándar para la fabricación de celdas, en ellos se aplican algunos criterios como el tipo de geometría y materiales, que deben tenerse en cuenta para determinar la complejidad de su fabricación, ensamble y rendimiento. Una celda de forma circular, por criterios de diseño hidráulico, permite presiones más altas si se compara con una rectangular, no obstante, los cortes circulares en acero son mucho más costosos ya que deben ser troquelados o cortados a láser en CNC. Actualmente se encuentran celdas fabricadas y ensambladas por empresas preocupadas en la reducción del uso de combustibles fósiles, las cuales cuentan con especificaciones claras de su productividad en litros por minuto de gas HHO y se siguen realizando estudios para mejorar su rendimiento.

El presente proyecto desea realizar celdas electrolizadoras alcalinas que brinden una muy buena opción en la relación rendimiento contra precio. Las celdas electrolizadoras alcalinas están basadas en el concepto de ensamble por los siguientes elementos:

- **Electrodos**
- **Empaquetaduras**
- **Mallas de Poliéster**
- **Mordazas**
- **Racores y acoples**

5.1.5.1. Electrodos

Son placas metálicas que permiten la separación del hidrógeno y del oxígeno presentes en el agua, fabricada comúnmente en metales nobles como paladio o platino, sin embargo, su elevado costo hace inviable su aplicación según presupuesto. Una forma más económica para la elaboración de los electrodos es el níquel, pero es complejo encontrar su presentación en láminas. Los electrodos utilizados en las celdas electrolizadoras alcalinas son láminas de acero inoxidable de referencia 316L, con un espesor de 1mm, se eligen este material como electrodo por su bajo costo comparado con un electrodo de plata o silicio.

Las placas que funcionan como electrodos presentan perforaciones las cuales cumplen con las siguientes funciones.

- Pasar gas y electrolito entre celdas
- Contacto eléctrico entre celda
- Perforaciones que permiten que el nivel de electrolito sea el mismo.

5.1.5.2. Empaquetaduras

Son separadores fabricados en teflón, nitrilo o polipropileno cuyo trabajo es generar un sello y separar las placas de acero para formar celdas individuales. Los factores principales para la selección de empaquetaduras son:

- La temperatura la cual puede deteriorar la integridad del empaque causando derramamientos y pérdidas del electrolito empleado.
- La presión de los tornillos debe ser pareja en cada ranura establecida, las cuales son posibles causas de escape y pérdida de líquido si se presenta una presión dispareja en los puntos establecidos. Es importante que el material de la empaquetadura sea neutro e inerte al álcali caliente.

5.1.5.3. Mallas de Poliéster

Posibilitan la separación adecuada del hidrógeno y el oxígeno generado en el proceso de electrólisis, conduciéndolos en vías diferentes y evitando que se unan de nuevo.

5.1.5.4. Mordazas

Son láminas acrílicas cuyas características de transparencia permiten la inspección de la electrólisis al interior de la celda. Son las paredes exteriores del contorno de la celda, que por medio de pernos en acero inoxidable mantienen prensado el conjunto de láminas y empaquetadura.

5.1.5.5. Racores y acoples

Estos funcionan para hacer la conexión entre tubos y mangueras que contienen fluidos líquidos y gaseosos. Estos suelen ser fabricados en material plástico o en acero inoxidable cuyas características mecánicas deben soportar altas temperaturas y la corrosión producida por el electrolito, sus características de diseño dependen de su uso y pueden ser roscados y de acoples para manguera. Para el proyecto son seleccionados por el calibre y material partiendo de la utilidad y posición en el circuito hidráulico. Los podemos encontrar en formas de ángulo recto, uniones y tipo de conexión, ya sea macho/hembra o para conexión a presión estriada tipo manguera.

5.1.6 Burbujeador

El burbujeador es un alimentador continuo de electrolito y recolector de hidrógeno generado por la celda alcalina según los parámetros de flujo de corriente.

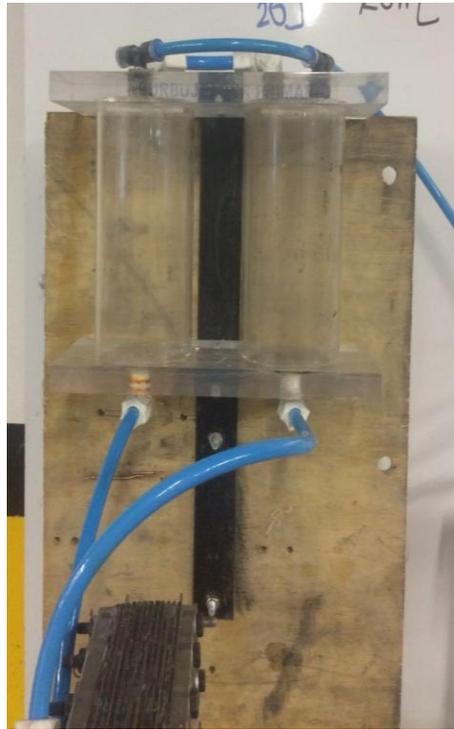


Figura 11 Tanque Burbujeador [Autores]

5.1.7 Mechero

El mechero permite verificar las características de llama generado por el hidrógeno como combustible fósil el cual puede ser utilizado como un reemplazo parcial de un combustible como la gasolina, mejorando su rendimiento representado en un menor consumo y fines de mejoramiento en la reducción de emisiones contaminantes.



Figura 12 Mechero de laboratorio [Autores]

5.1.8 Cámara termográfica

Una cámara termográfica o cámara térmica es una cámara que muestra en pantalla una imagen de la radiación calorífica que emite un cuerpo; en general, cuanto mayor es la radiación emitida, mayor es la temperatura del cuerpo. Esta radiación es invisible al ojo humano y su rango en el espectro electromagnético se sitúa entre la luz visible y la radiación de microondas. La cual nos permitió visualizar las características del perfil de llama que produce el gas combustible analizado.



Figura 2 Cámara termográfica Fluke Tis60 9hz Con Ir-fusión, G

5.1.9 Caudalímetro

El caudalímetro permite visualizar la cantidad de gas generada por la celda con el fin de poder calcular el caudal generado por este fluido, mediante la relación del tiempo con el desplazamiento generado de una columna de agua.

El método simple de calibración fue tomar un recipiente en el cual su interior estuviera ocupado por agua y aire, permitiendo por presión de fluidos se pudieran comprimir o desplazar el contenido del recipiente según el caso; para aplicación de estudio fue necesario aplicar presión en una columna de agua para ser desplazada y medir dicho recorrido, para ser calculado un caudal con base de las características de medidas y desplazamiento. Los pasos para el funcionamiento y obtención de datos del caudalímetro fueron los siguientes:

- Se realiza la conexión de racores y mangueras necesarias en el interior del recipiente de vidrio.
- Se llena de agua el recipiente de vidrio en un punto medio asegurando la limpieza y transparencia para la toma de datos.
- Se instala el soporte del vaso medidor mediante su ranura transversal, cuya característica es encajar en las láminas que componen el recipiente de vidrio.
- Se inserta el vaso medidor en su correspondiente soporte, asegurando que la ubicación de la regleta de medición se encuentre en una posición visible y que la el sistema de conexión neumática proveniente de la celda se encuentre centrada en el interior del vaso.
- Se ajusta la cantidad de agua ingresada en el recipiente, logrando ubicar un punto de partida para el registro de datos; sin permitir que la columna de agua al interior sea superior en altura que la manguera del sistema de conexión neumática
- Se cierra la válvula de bola ubicada en la cabeza del vaso medidor para aislar la presión atmosférica y evitar las fugas del gas generado por la celda
- Se toma las medidas correspondientes de desplazamiento en la columna de agua, y conociendo el área interior del vaso medidor, se relaciona con el tiempo y se expresa el resultado como caudal en valores de litros/minuto



Figura 13 Caudalímetro [Autores]

La característica principal de este caudalímetro es su construcción; debido a los altos costos en el mercado y solución mediática para continuar con el proyecto de grado, surge la idea de diseñar un artefacto que permitiera calcular gasto volumétrico de un fluido basado en la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

Q= Caudal
V= volumen
t= tiempo

Se puede descomponer la Ecuación #7 de la siguiente manera basado en que el recipiente es un cilindro

$$Q = \frac{A \cdot h}{t} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

Q= Caudal
A= Área
h=Altura
t= tiempo

Permite que sea viable el diseño de un caudalímetro con insumos económicos y viables para que sea herramienta de medición cuyas características cumplan con la necesidad de determinar el caudal generado por la celda electrolítica.

5.1.9.1 Estructura de caudalímetro

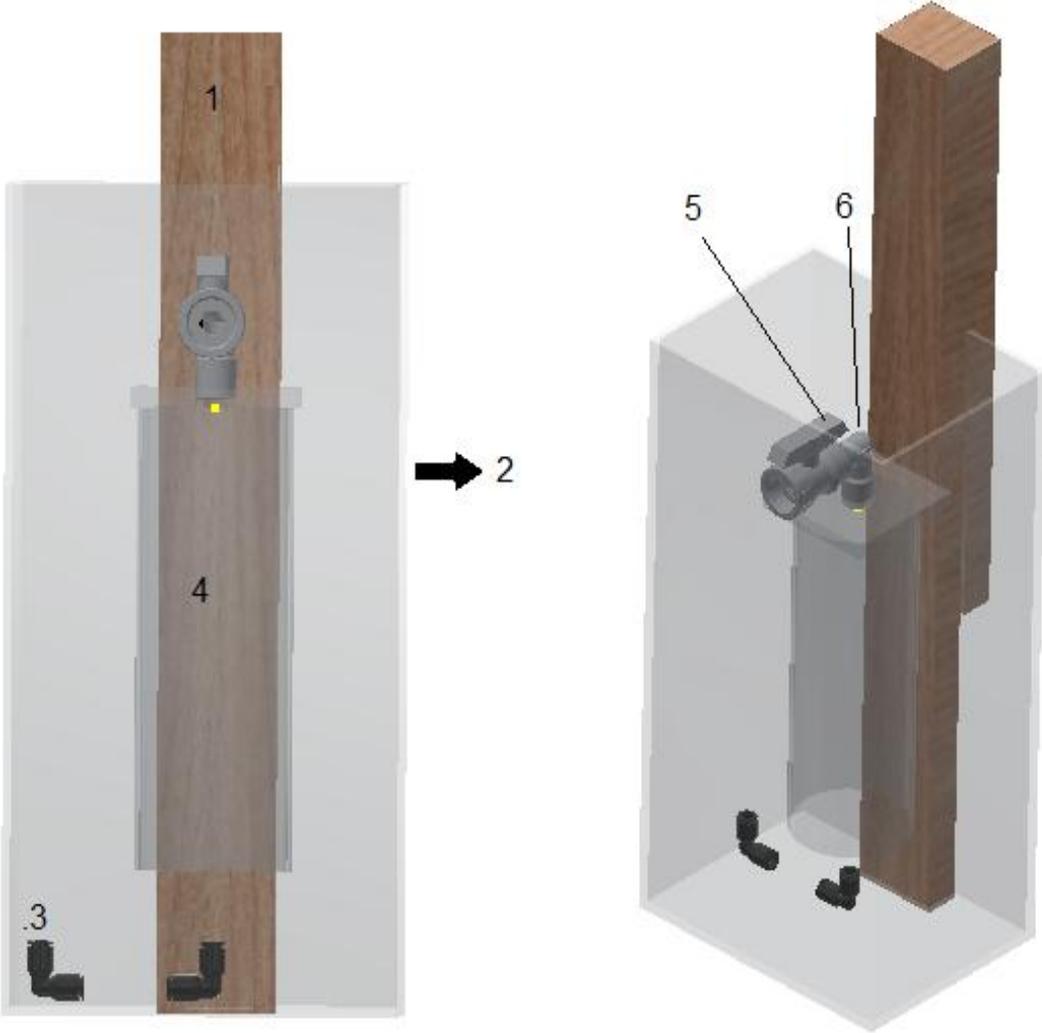


Figura 14 Esquema Caudalímetro

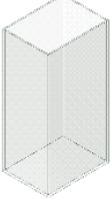
Item	Foto	Descripcion	Ficha tecnica
1		Soporte vaso	Madera, pino moldeado 600* 60* 50 mm
2		Recipiente	Laminas de vidrio 4,mm de espesor 400*200*150
3		Codo 90° de acople rapido	Plástico Polipropileno para manguera de 8mm
4		Vaso medidor	Acrilico mecanizado h=230mm øint 180mm
5		Valvula de bola 1/2"	Acero inoxidable
6		Codo 90° 1/2"	Acero inoxidable

Figura 15 Componentes Caudalímetro

Los materiales relacionados en la Figura #15 fueron los utilizados para la fabricación del caudalímetro.

El recipiente es el encargado de almacenar una cantidad determinada de agua en su interior el cual fue elaborado con la principal característica de tener una capacidad de transparencia gracias a su fabricación en vidrio, el cual permite verificar el proceso de presión ejercida en el agua para la toma de datos

Mediante la conexión neumática entre los racores de acople rápido y mangueras de 8 mm es posible conducir el flujo de gas generado por la celda a espacio vacío entre la pared superior del vaso medidor y una columna de agua, la cual será desplazada una vez el gas en estudio esté sometido a presión en el recipiente.

El soporte del vaso es una invención realizada por parte de los participantes del proyecto aprovechando los productos que fueron catalogados como basura en la calle, este dispositivo fue moldeado para lograr el encaje a presión las caras laterales del recipiente; mediante una ranura realizada entre sus caras. Debido a sus buenas características mecánicas y permeabilidad el pino es una madera que permite mantenerse sumergida por largos periodos de tiempo sin daño alguno.

El vaso medidor es un artefacto que ha sido equipado con una escala graduada en milímetros para poder determinar el desplazamiento de la columna de agua en su interior, adicionalmente se ha instalado una válvula de bola de $\frac{1}{2}$ " encargada de aislar el sistema de medición a presión atmosférica y así mismo permitir una purga de reinicio para la toma de datos.

Los datos del recipiente de medida utilizados para calcular el caudal son los siguientes:

Tabla 2. Parámetros de diseño Caudalímetro [Autores]

DATOS RECIPIENTE	
Diámetro (m)	0,0734
Radio (m)	0,0367
Area (m ²)	0,00423138
Dist, 1 (m)	0,03
Dist, 2 (m)	0,09
A*D1	0,00012694
A*D2	0,00038082

5.2. Fase de recolección de datos

La recolección de datos se realizó ejecutando pruebas a un grupo de celdas electrolizadoras alcalinas determinadas por su capacidad volumétrica y su capacidad de descomponer los electrolitos utilizados como: NaOH y KOH en concentraciones del 35% a 40% desarrollados en este proyecto con el fin de encontrar la celda y la mezcla de mejor rendimiento y características adecuadas para la generación de hidrógeno y oxi-hidrógeno respectivamente.

Las pruebas se desarrollaron en un ambiente controlado, donde de un tiempo cero hasta un tiempo N, se evaluaron las variables de flujo de corriente, voltaje, energía producida y potencia determinando la variabilidad en la generación de flujo de caudal en el hidrógeno separado en la electrólisis.

Las pruebas fueron realizadas con el fin de conocer el caudal producido por la celda a los diferentes parámetros de trabajo establecidos.

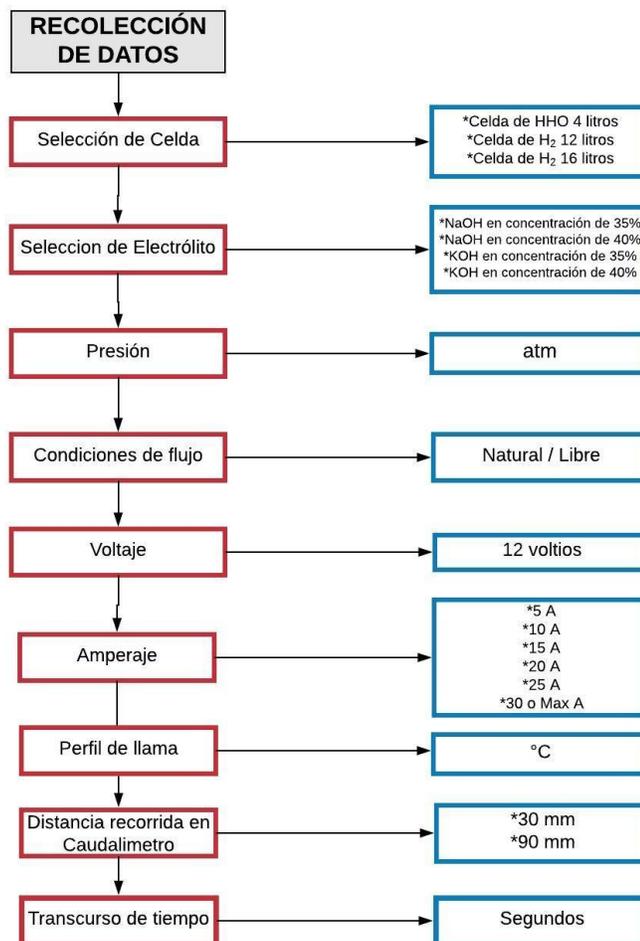


Figura 16 Flujo de Trabajo [Autores]

El desarrollo experimental fue diseñado con los siguientes parámetros para ejecución de las pruebas

- Selección de la celda electrolizadora
- Selección del electrolito
- Conexión hidráulica y eléctrica de la celda con el tanque burbujeador
- Inserción del electrolito a la celda
- Alimentación eléctrica por parte de la fuente de poder regulada para iniciar el proceso de electrólisis en la celda
- Regulación y estabilización de la celda según parámetros de amperaje, corriente, potencia y energía para realizar estudios
- Evaluación del combustible alternativo generado mediante la combustión del gas expresada en una llama de fuego, donde se evalúa sus características de temperatura
- Conexión al caudalímetro con el fin de poder evaluar el caudal que genera la celda según los parámetros establecidos por el amperaje aplicado, según el desplazamiento de una columna de agua en recorridos a 30 mm y 90 mm lineales.

Una vez se tenga establecidos los parámetros correspondientes para realizar la prueba se establece el siguiente patrón de acción, el cual es el procedimiento ejercido para ejecutar el proceso de obtención de datos:

- Se selecciona una celda alcalina, se procede a la conexión hidráulica al burbujeador mediante la utilización de mangueras y racores
- La conexión eléctrica se establece al PWM mediante el cable encauchado de tres fases, conectando las polaridades correspondientes a las láminas determinadas de la celda.
- Se realiza la alimentación del electrolito al sistema por medio del burbujeador, el cual permite un almacenaje cíclico
- La línea neumática de salida de gas generado proveniente del tanque burbujeador es direccionada al caudalímetro o el mechero según el análisis de estudio a elaborar.
- Al cerrar el circuito de corriente mediante un interruptor proveniente del regulador de carga, se energiza el modulador de ancho de pulso corriente constante (PWM) en el cual se regulará de forma analógica el flujo de corriente destinado para la de estudio, Este proceso se realiza en regulaciones de amperaje de 5,10,15,20,25,30 o máximo permitido por el equipo
- Se establece un tiempo de 2 minutos en el que la celda busca su punto de equilibrio en referencia a el flujo de corriente establecido
- Una vez se encuentra en el balance de estabilidad se registran los datos obtenidos en el visualizador del PWM como punto de referencia.

- Ya sea una vez conectado el burbujeador al caudalímetro se registra el tiempo que transcurre en el desplazamiento de la columna de agua en las distancias de 30mm y 90mm
- Las pruebas se realizan en un proceso de 5 repeticiones para controlar la estabilidad y la fiabilidad de los datos obtenidos
- Si es conectado al mechero se procede a generar una llama cuyo combustible es el producto desarrollado por la celda electrolítica; en donde se evaluará las características del producto en procesos de combustión.
- Una vez sea finalizadas las pruebas, se procede a apagar la fuente reguladora de energía para detener el proceso electrolítico de la celda; se deja transcurrir el tiempo necesario para la regulación de temperatura de la celda para realizar las maniobras de desconexión eléctrica
- Se realiza la desconexión existente entre la celda y el burbujeador para evacuar de forma controlada el líquido electrolítico existente en el sistema para ser envasado.
- Sea verificado que la celda se encuentra vacía de líquido y del correcto almacenamiento, se realiza el lavado interior de la celda mediante un chorro de agua a presión mediante sus conductos eliminando impurezas y sustancias relacionadas con el electrolito utilizado
- La celda se deja en condiciones para ser de nuevo llenada y utilizada.

6. RESULTADOS

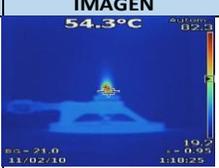
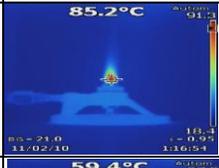
6.1. Análisis de Datos Experimentales

6.1.1 Datos obtenidos por perfil de llama

En el momento que se plantea la caracterización de las celdas electrolizadoras alcalinas es importante determinar el comportamiento del combustible generado en estado de combustión, por lo cual se realizó el estudio para determinar el comportamiento de la llama producida, el cual era caracterizada por las propiedades que componen los electrolitos, utilizando la cámara termografía podemos determinar la descripción de temperatura en cada llama evaluada en diferentes parámetros de amperaje establecidos

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas utilizando los diferentes electrolitos en estudio.

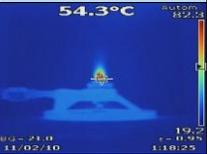
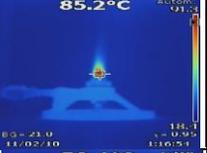
Tabla 3 Datos obtenidos perfil de llama utilizando NaOH 35%

NaOH 35%						
PRUEBA	AMP (A)	VOL (V)	ENERGIA (w/H)	POTENCIA (W)	IMAGEN	PWN
1	10,25	12,30	8834	125,7		
2	15,62	12,14	8830	189,6		
3	20,69	11,99	8827	206,9		
4	25,33	11,86	8820	300,4		
5	29,13	11,76	8815	342,5		

En la tabla #3 encontramos que la temperatura máxima se encontró en la prueba dos, mostrando 85.2 °C según la lectura realizada por la pistola termográfica, en

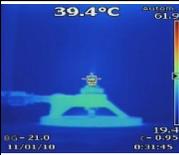
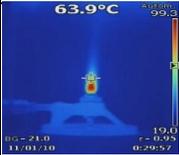
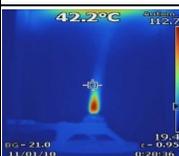
comparación de la prueba cinco, se ve una diferencia en la altura de la llama alcanzada a 29.13 A.

Tabla 4 Datos obtenidos perfil de llama utilizando NaOH 40%

NaOH 40%						
PRUEBA	AMP(A)	VOL(V)	ENERGIA (w/H)	POTENCIA (W)	IMAGEN	PWN
1	10,25	12,30	8834	125,7		
2	15,62	12,14	8830	189,6		
3	20,69	11,99	8827	248		
4	25,33	11,86	8820	300		
5	29,13	11,76	8815	342,5		

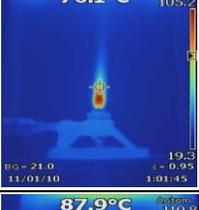
En la tabla #4 encontramos que la temperatura máxima se encontró en la prueba dos, mostrando 85.2 °C según la lectura realizada por la pistola termográfica, en comparación de la prueba cinco, se ve una diferencia en la altura de la llama alcanzada a 29.13 A.

Tabla 5 Datos obtenidos perfil de llama utilizando KOH 35%

KOH 35%						
PRUEBA	AMP (A)	VOL (V)	ENERGIA (w/H)	POTENCIA (W)	IMAGEN	PWN
1	5,16	12,64	65,2	8397		
2	10,08	12,48	125,7	8396		
3	15,32	12,31	188,5	8393		
4	20,32	12,17	247,2	8386		
5	25,51	12,04	307,1	8375		

En la tabla #5 encontramos que la temperatura máxima se encontró en la prueba cinco, mostrando 112 °C según la lectura realizada por la pistola termográfica, en comparación de la prueba dos, se ve una diferencia en la altura de la llama alcanzada a 25.51 A.

Tabla 6 Datos obtenidos perfil de llama utilizando KOH 40%

KOH 40%						
PRUEBA	AMP(A)	VOL(V)	ENERGIA (w/H)	POTENCIA (W)	IMAGEN	PWN
1	5,27	12,54	66	8466		
2	10,75	12,37	132,9	8464		
3	15,41	12,23	188,4	8461		
4	20,53	12,09	248,2	8458		
5	25,29	11,96	302,4	8453		
6	34,77	11,70	406,8	8440		

En la tabla #6 encontramos que la temperatura máxima se encontró en la prueba tres, mostrando 107.5 °C según la lectura realizada por la pistola termográfica, en comparación de la prueba cinco, se ve una diferencia en la altura de la llama alcanzada a 34.77 A.

6.1.2 Datos obtenidos por caudal

Una vez se obtuvieron los resultados de las pruebas ya descritas, se procedió a realizar un análisis estadístico en el cual se comparó y contrastó los valores que se obtuvieron en cada una de las pruebas. Demostrando así las características del gas combustible y flujo de caudal generado en relación con el amperaje utilizado en el proceso de electrólisis controlado

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en las diferentes celdas de estudio:

- **Celda A: Prueba 1**
 - Generadora de: (oxi)hidrógeno HHO
 - Capacidad volumétrica: 4 litros.
 - Electrolito: KOH al 35%

Tabla 7 Datos obtenidos de celda A prueba 1 [Autores]

DATOS PARA TIEMPOS PROMEDIOS							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	44,294	5,18	0,017195294	1	173,218	5,18	0,013191153
2	24,202	10,31	0,031470472	2	75,206	10,31	0,030382483
3	16,298	15,28	0,046732627	3	49,78	15,28	0,045900865
4	11,608	20,45	0,06561409	4	35,932	20,45	0,063590812
5	7,32	30,13	0,104050321	5	22,912	30,13	0,099727001

En la Tabla #4 se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

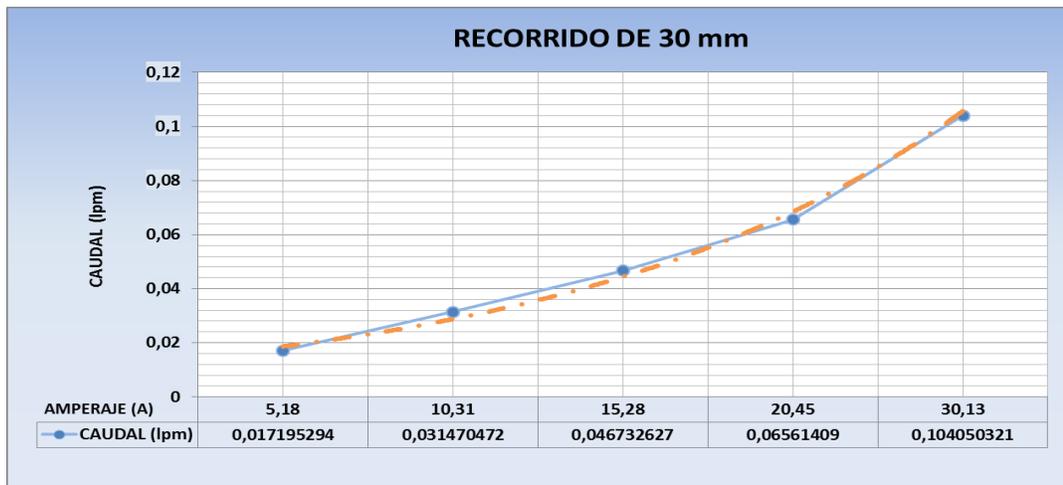


Figura 17 Datos obtenidos de celda A [Autores]

Como se observa en la Figura #17 y tabla # 4, se evidencia que al utilizar KOH 35% es posible alcanzar un amperaje máximo de 30.13 a el cual genera un caudal de 0.1040 (lpm)

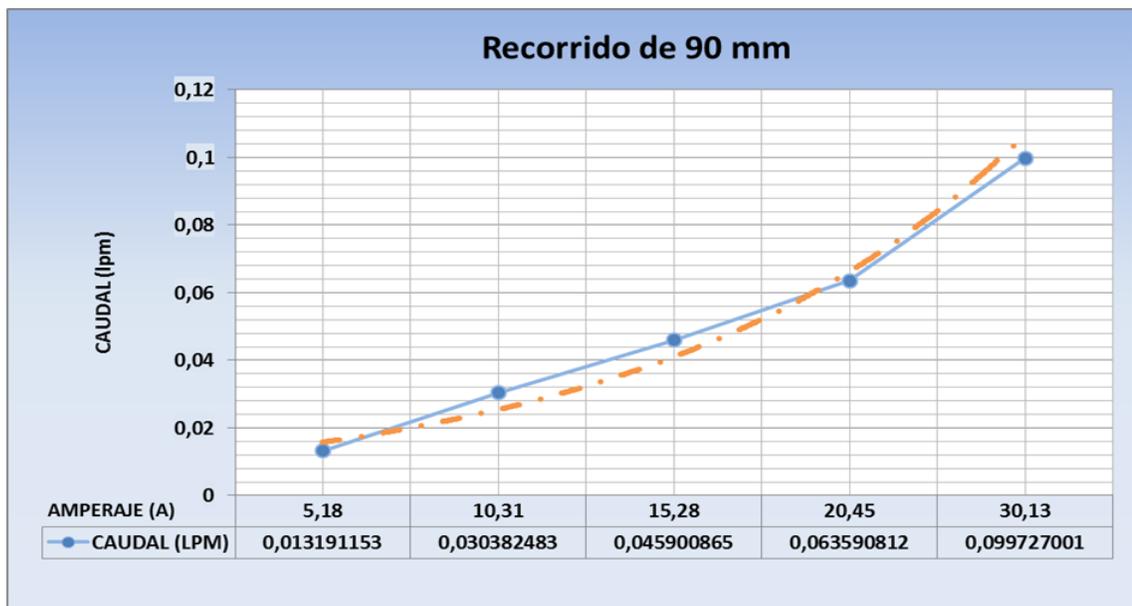


Figura 18 Datos obtenidos de celda A [Autores]

En un recorrido de 90 mm se obtuvo que al mantener el amperaje máximo de esta prueba se obtiene un caudal de 0.0997 (lpm)

Teniendo en cuenta las Figuras #17 y #18 se evidencian resultados con un ligero cambio de caudal a mayor recorrido, con las mismas condiciones amperaje en las cinco pruebas realizadas

- **Celda A: Prueba 2**
 - Generadora de: oxi-hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 4 litros.
 - Electrolito NaOH al 35%

Tabla 8 Datos obtenidos de celda A prueba 2 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	31,352	5,21	0,024293453	1	94,776	5,21	0,024108899
2	15,2	10,31	0,050108444	2	46,192	10,31	0,049466251
3	10,646	15,27	0,071543148	3	32,192	15,27	0,070978661
4	7,958	20,32	0,095708514	4	24,132	20,32	0,094685275
5	6,568	25,3	0,115963513	5	19,428	25,3	0,117610925
6	5,554	30,5	0,137135101	6	16,904	30,5	0,135171856

En la Tabla # 5 se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

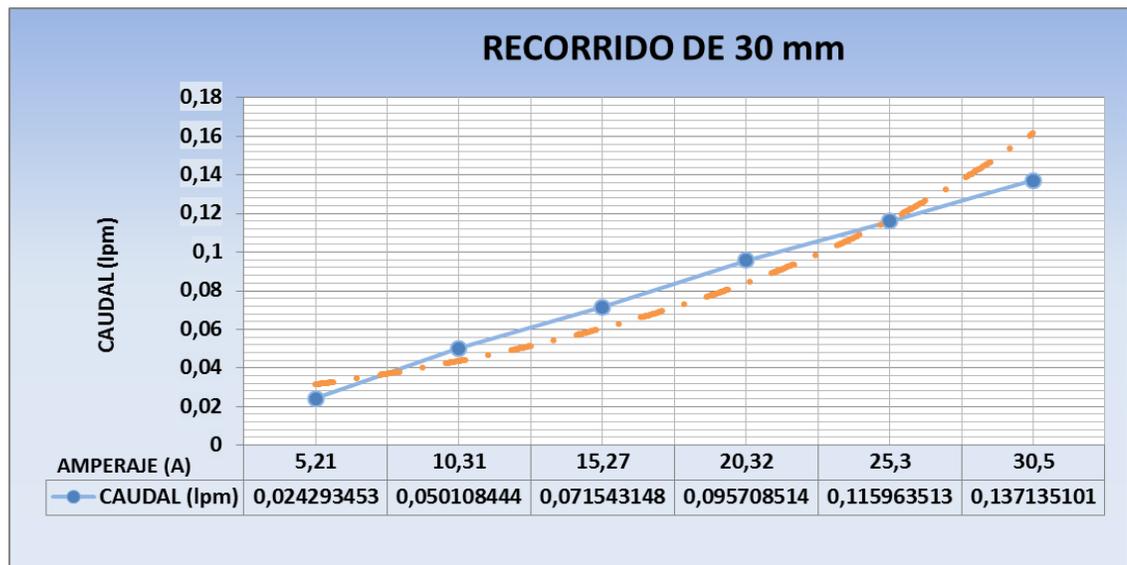


Figura 19 datos obtenidos de la celda A prueba 2 [Autores]

Se observa en la figura #19 la corriente máxima es de 30.5 A donde la celda permitió realizar un sexto análisis de datos, obteniendo un caudal 0.1371 (lpm)

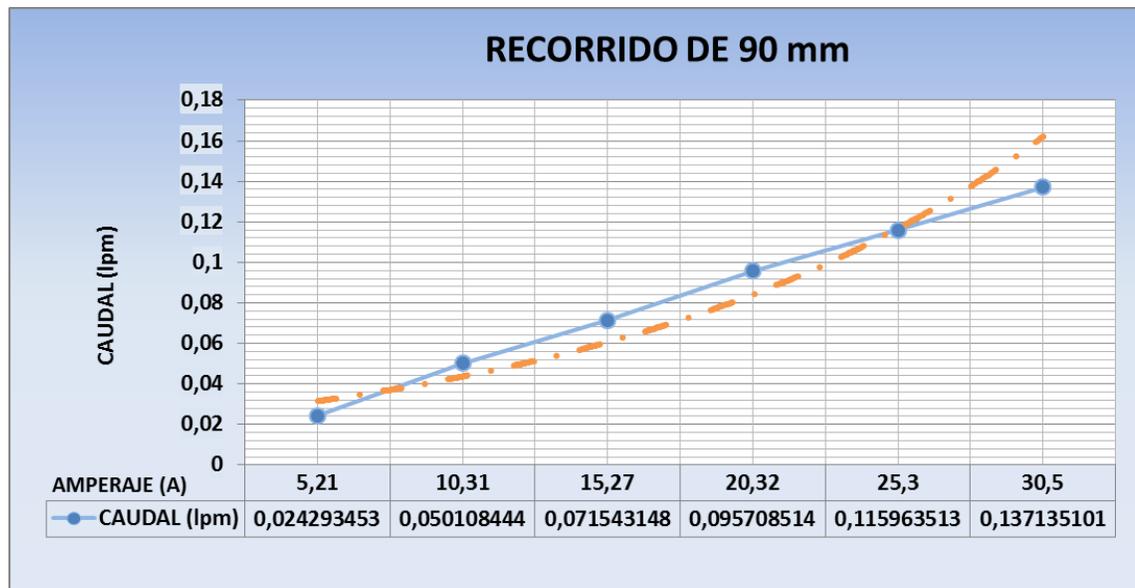


Figura 20 Datos obtenidos de la celda A prueba 2 [Autores]

Como se observa en la figura #20, las pruebas tienen una tendencia de caudal constante en relación de las distancias recorridas por la columna de agua. En las dos pruebas.

- **Celda A: Prueba 3**
 - Generadora de: oxi-hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 4 litros.
 - Electrolito NaOH al 40%

Tabla 9 . Datos obtenidos de celda A prueba 3 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio sin regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	36,942	5,25	0,02061741	1	111,9	5,25	0,020419527
2	16,702	10,14	0,045602224	2	50,538	10,14	0,045212415
3	10,78	15,26	0,070653836	3	33,188	15,26	0,068848531
4	8,366	20,46	0,091040922	4	25,314	20,46	0,090264085
5	7,018	25,3	0,108527836	5	21,208	25,3	0,107739771
6	5,918	30,42	0,128700296	6	17,986	30,42	0,127040201
7	5,196	35,48	0,146583593	7	15,764	35,48	0,144947035

En la Tabla #6 se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

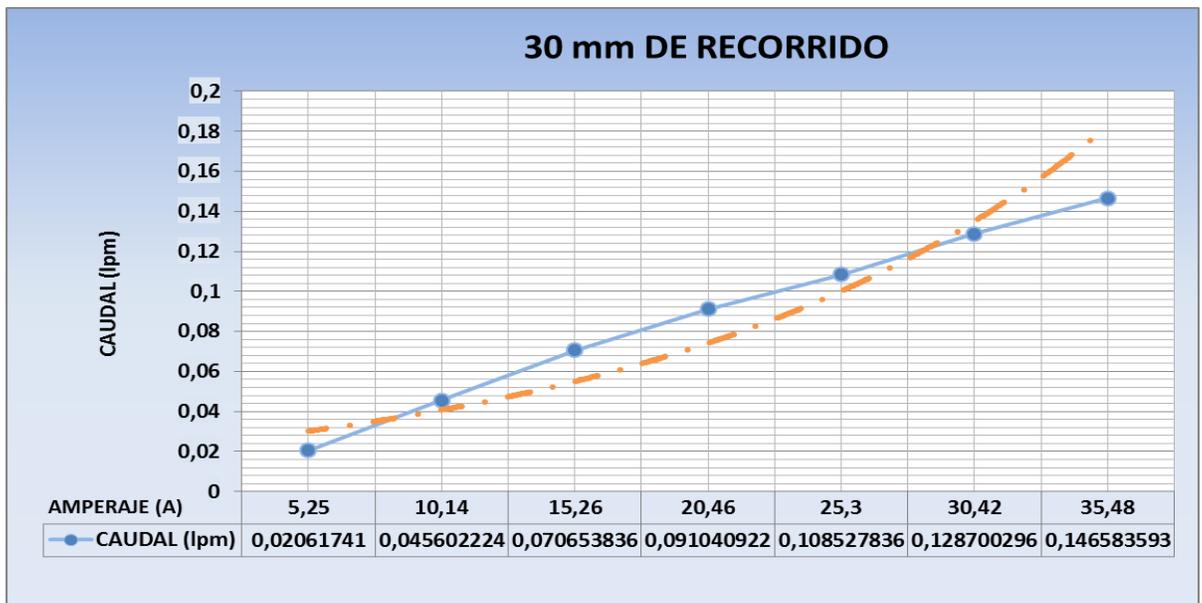


Figura 21 Datos obtenidos celda A prueba 3 [Autores]

En la Figura #21 muestra las condiciones de prueba donde se pudo acceder a una séptima toma de datos los cuales muestran un caudal de 0.1465 (lpm) a 35.48 A

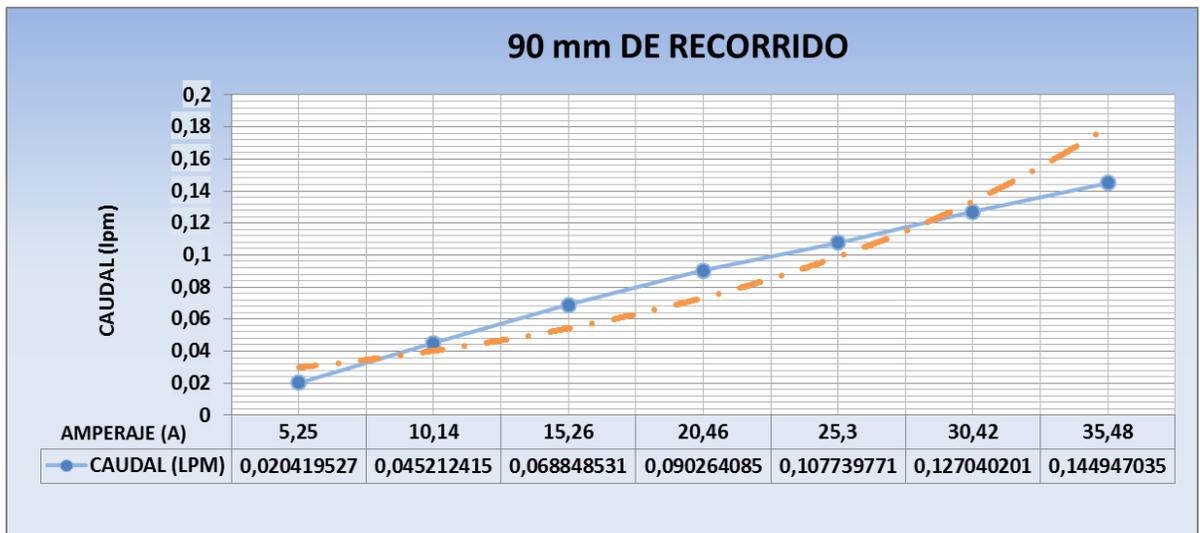


Figura 22 Datos obtenidos celda A prueba 3 [Autores]

En la Figura #22 describe las condiciones que presentan estos resultados tienen similitud con respecto a las pruebas relacionadas a un recorrido de 30 mm.

- **Celda B: Prueba 1**
 - Generadora de: Hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 12 litros.
 - Electrolito NaOH al 35%

Tabla 10 . Datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio sin regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	28,392	5,72	0,00804785	1	116,544	5,72	0,01960586
2	18,302	10,26	0,01248467	2	67,194	10,26	0,03400519
3	13,8	15,1	0,01655757	3	47,832	15,1	0,04777022
4	10,842	20,44	0,02107494	4	36,442	20,44	0,06270087
5	8,544	26,81	0,02674327	5	31,836	26,81	0,07177237

En la Tabla #7 se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

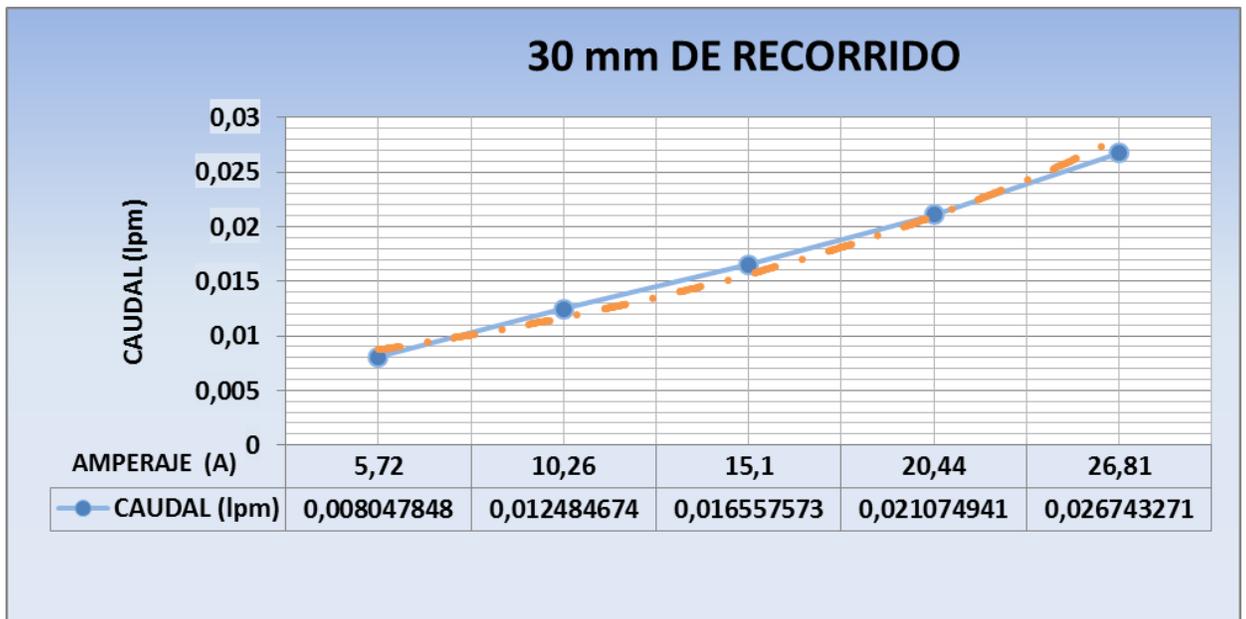


Figura 23 datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores]

La figura #23 muestra los resultados con esta celda, donde no se logró realizar más de cinco tomas de datos con bajo caudal alcanzado

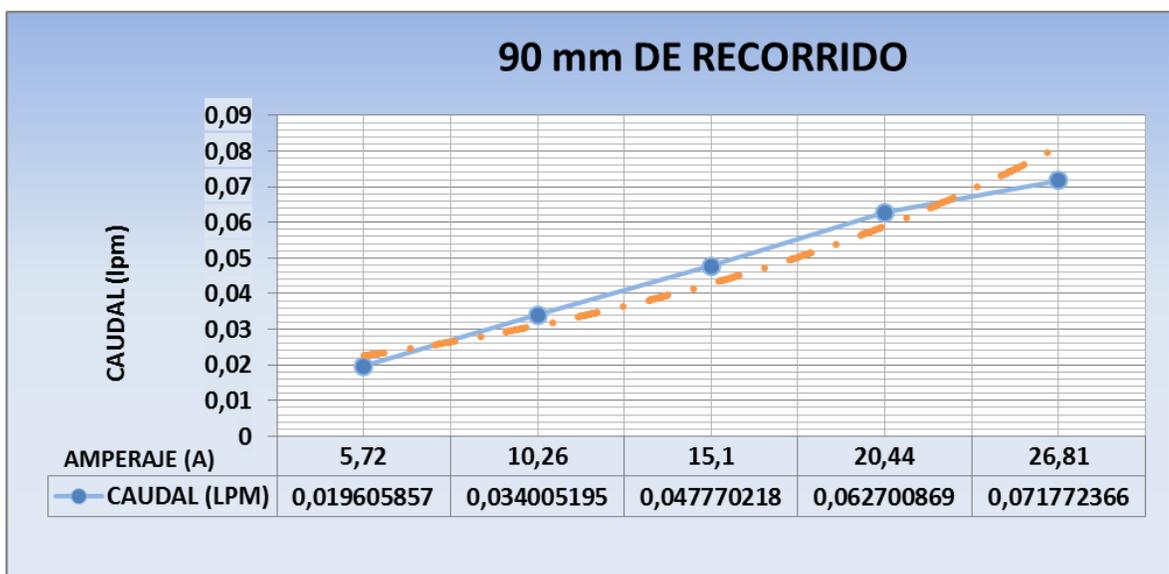


Figura 24 datos obtenidos de celda B prueba 1 [Autores]

En la Figura #24 encontramos que la prueba denota una ligera tendencia a mejorar sus capacidades de caudal con su análisis a un recorrido de 30 mm

- **Celda B: Prueba 2**
 - Generadora de Hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 12 litros.
 - Electrolito NaOH al 40%

Tabla 11 Datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio sin regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	29,482	5,58	0,02583435	1	156,752	5,58	0,014576816
2	13,552	10,23	0,05620191	2	67,412	10,23	0,033895227
3	12,156	13,952	0,06265617	3	59,5632	13,952	0,038361691
4	9,99	15,74	0,07624108	4	50,5	15,74	0,045246437

En la tabla #8 se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

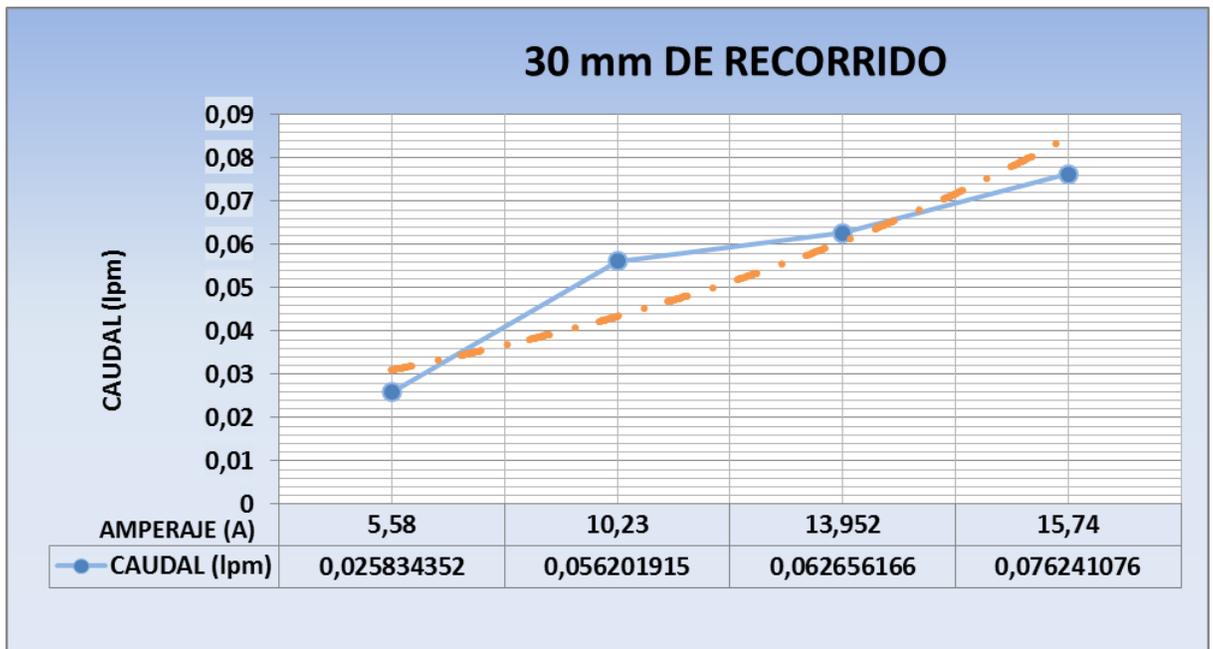


Figura 25 datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores]

En las condiciones de estudio expuesta en la Figura #25; solo se pudo tomar cuatro registros de datos, el cual marcaron un bajo flujo de hidrógeno, impidiendo recibir más de 15,74 A.

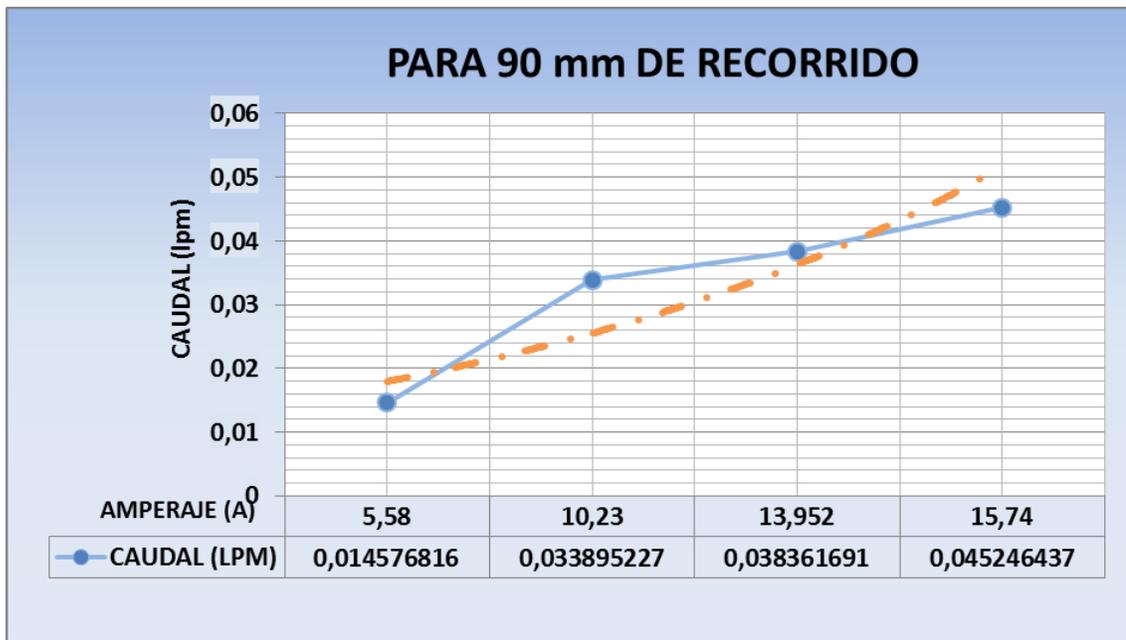


Figura 26 datos obtenidos de celda B prueba 2 [Autores]

La Figura #26 muestra los resultados obtenidos demostrando que la celda a mayor tiempo de trabajo pierde la capacidad de generar un caudal constante, donde una anotación de las pruebas realizadas es que lograr la estabilidad del flujo de corriente mediante el PWM fue limitada a 15,74 A

- **Celda C: Prueba 1**
 - Generadora de: Hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 16 litros.
 - Electrolito NaOH al 40%

Tabla 12 Datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio sin regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	34,964	5,58	0,021783788	1	156,752	5,58	0,014576816
2	16,874	10,23	0,045137392	2	67,412	10,23	0,033895227
3	14,85	13,952	0,051289451	3	59,5632	13,952	0,038361691
4	12,488	15,74	0,060990419	4	50,5	15,74	0,045246437

En la tabla #9. Se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

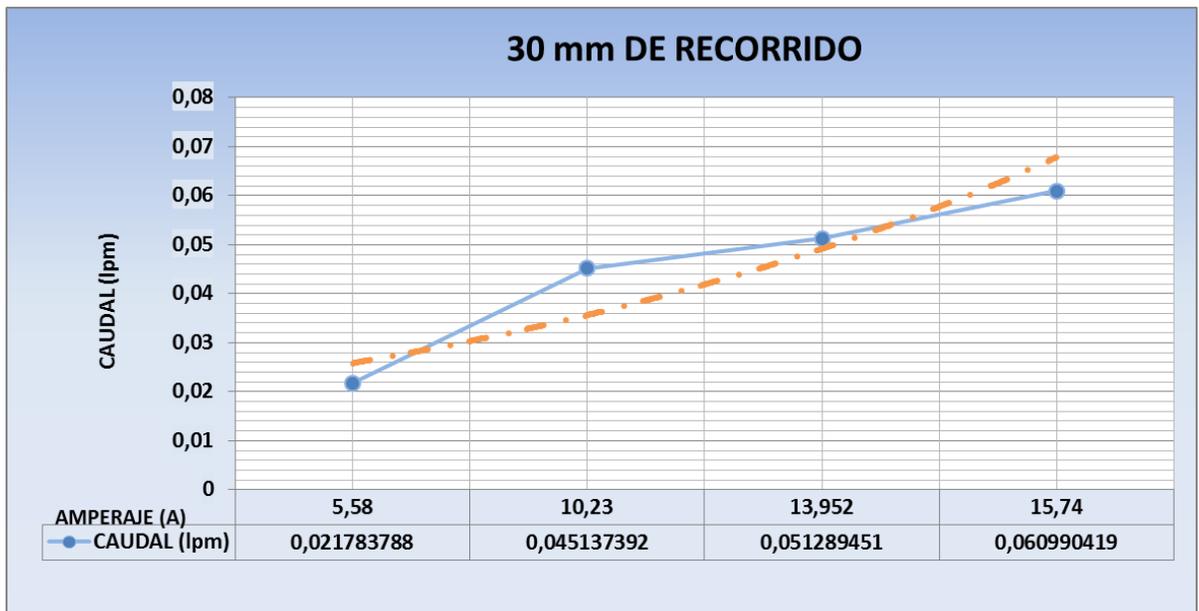


Figura 27 datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores]

En la Figura #27 expone que posible elaborar cuatro tomas de datos a un amperaje máximo alcanzado de 15,74 A permitiendo un caudal de 0.0609 (lpm)

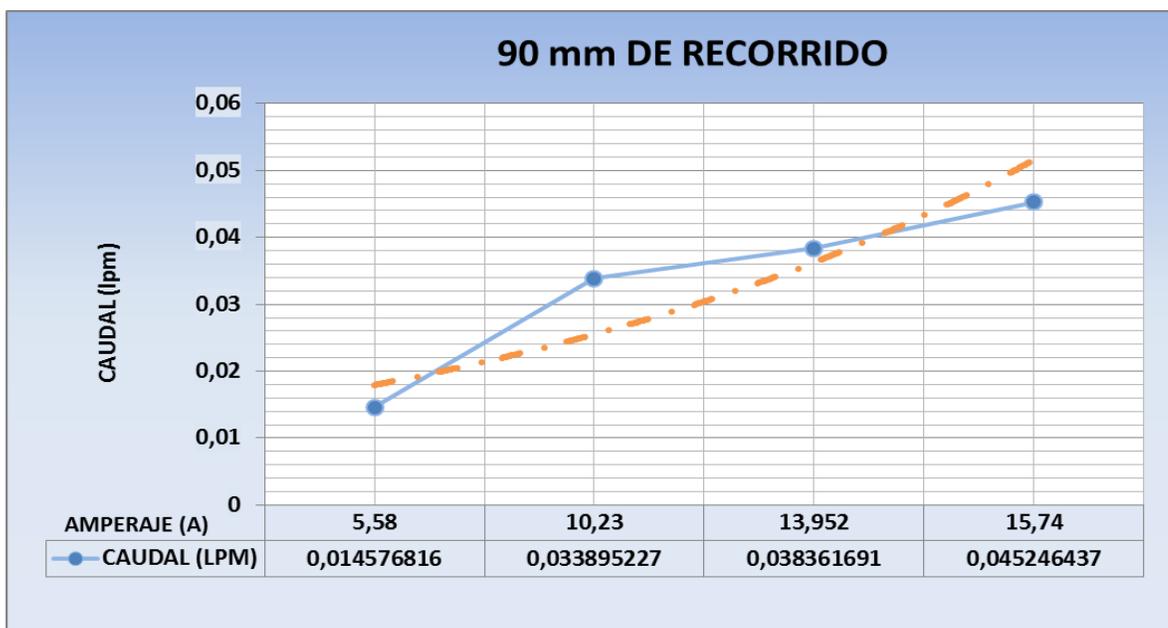


Figura 28 Datos obtenidos de celda C prueba 1 [Autores]

La Figura #28 permite visualizar los resultados obtenidos a 90mm de recorrido donde se evidencia que la característica principal de esta celda llega a ser su

incapacidad de mantener un caudal constante a través del tiempo, expresando nula mejoría con respecto a su estudio de recorrido a 30mm

- **Celda C: Prueba 2**
 - Generadora de: Hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 16 litros.
 - Electrolito KOH al 35%

Tabla 13 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio con regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	49,48	5,26	0,015393055	1	162,602	5,26	0,01405238
2	23,432	10,11	0,032504624	2	72,894	10,11	0,031346133
3	12,58	15,12	0,060544384	3	39,294	15,12	0,058149973
4	8,418	20,14	0,09047854	4	25,47	20,14	0,089711231
5	5,948	27,16	0,128051169	5	18,114	27,16	0,126142489

En la tabla # 13, se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

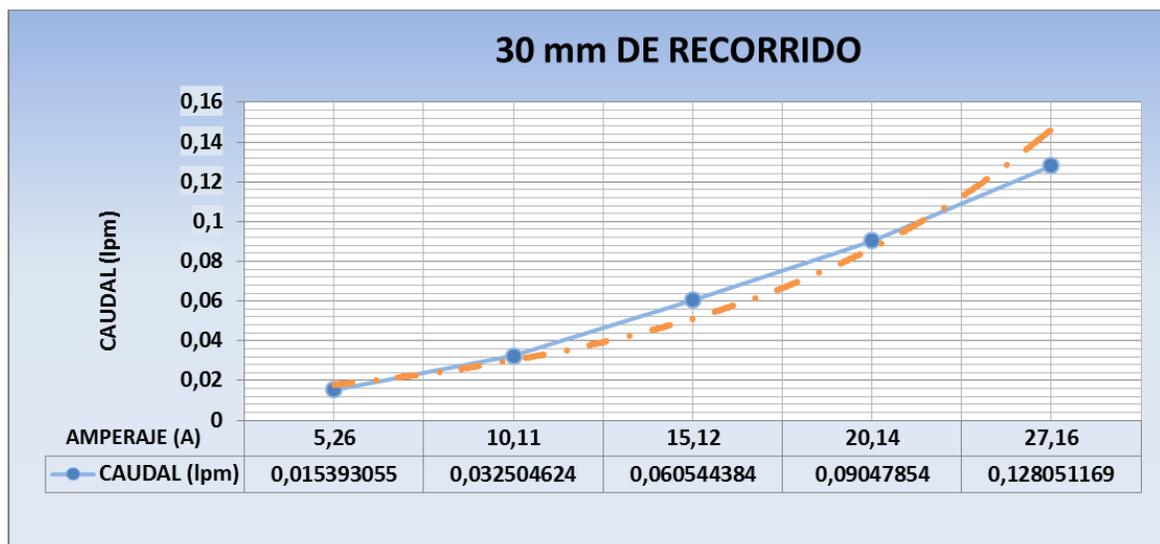


Figura 29 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores]

Como muestra la Figura #29 se hace una muestra de datos de cinco repeticiones se logra obtener un caudal de 0.1280 (lpm) a 27.16 A

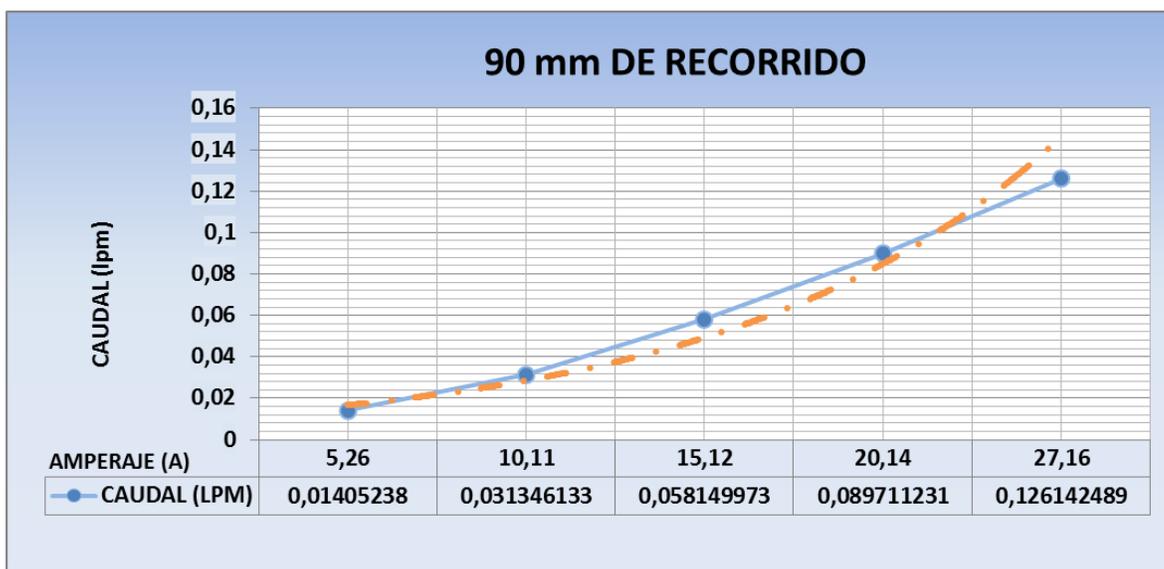


Figura 30 Datos obtenidos de celda C prueba 2 [Autores]

Los datos encontrados en la figura #30 describe que la celda estudiada tiene la capacidad de mantener un caudal a través de tiempo, pero limitando su capacidad por soportar 30 A.

- **Celda C: Prueba 3**
 - Generadora de: Hidrógeno
 - Capacidad volumétrica: 16 litros.
 - Electrolito KOH al 40%

Tabla 14 Datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores]

Datos para Tiempos Promedio sin regulador							
PARA 30 MM DE RECORRIDO				PARA 90 MM DE RECORRIDO			
Prueba	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (lpm)	PRUEBA	TIEMPO (S)	AMP (A)	CAUDAL (LPM)
1	34,878	5,28	0,0218375	1	151,38	5,28	0,0150941
2	17,588	10,3	0,043305	2	66,98	10,3	0,03411384
3	13,518	15,28	0,05634327	3	48,75	15,28	0,04687067
4	11,792	20,56	0,06459026	4	38,596	20,56	0,0592016

En la Tabla # 11, se puede observar los datos obtenidos de la relación del tiempo, amperaje y caudal en los dos recorridos establecidos para estudio.

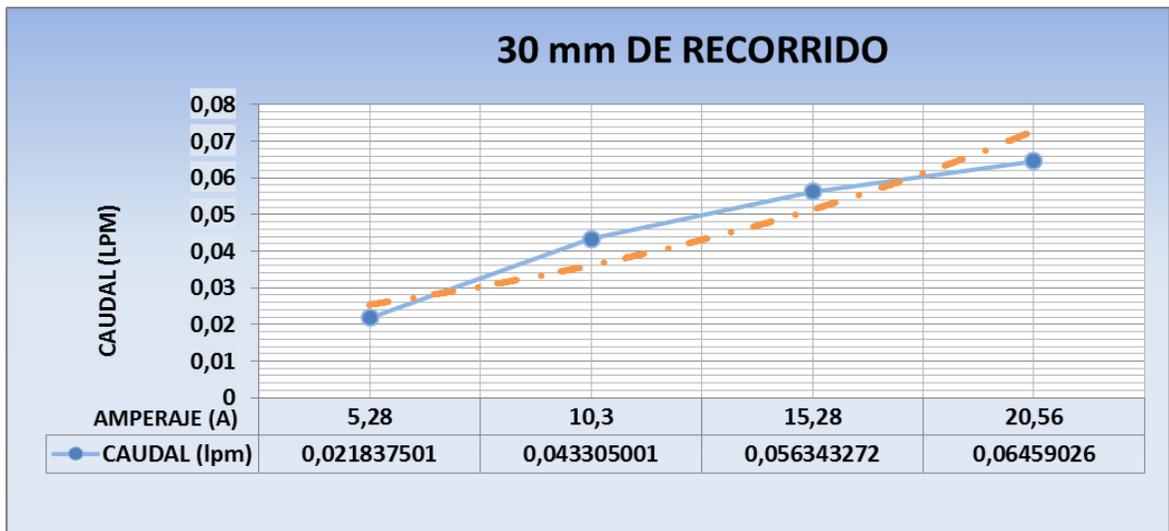


Figura 31 datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores]

La Figura #31 describe que a 20.56 A alcanzados se logra obtener un caudal de 0.0645 (lpm)

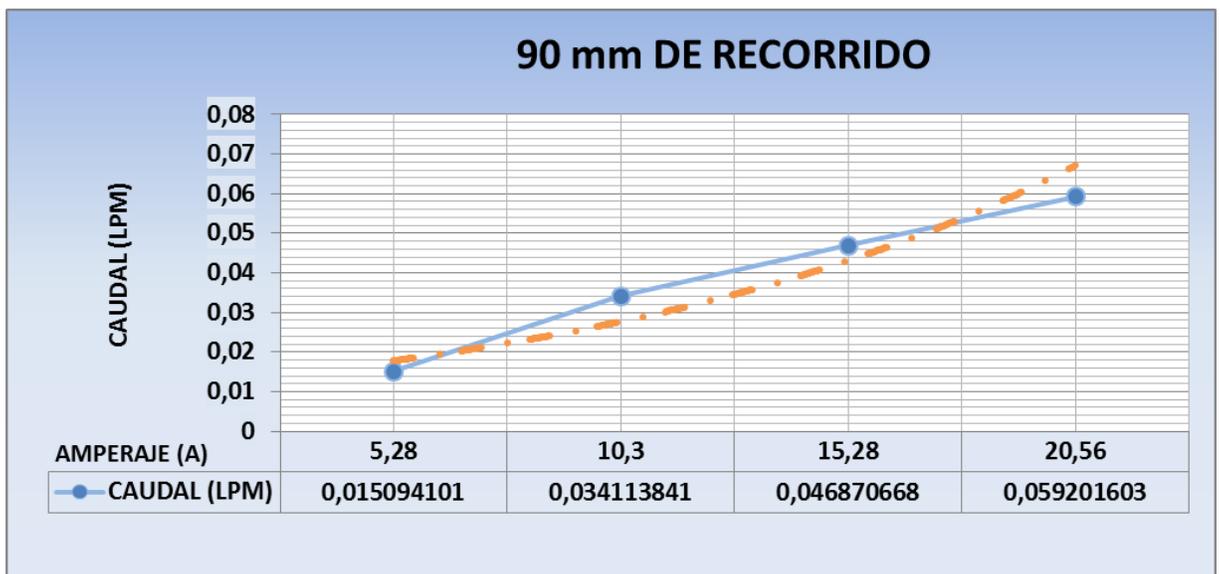


Figura 32 datos obtenidos de celda C prueba 3 [Autores]

La Figura #32 muestra que el caudal tiende a disminuir con respecto al tiempo en condiciones establecidas, es posible que por desgaste de las propiedades del electrolito no fuera posible la lectura de datos a mayor amperaje.

6.2. Modelación matemática para electrolizadores alcalinos

La combinación de relaciones empíricas electroquímicas, teoría de transferencia de calor y termodinámica fundamental permite presentar un modelo matemático para un electrolizador alcalino, donde las comparaciones entre los datos medidos y predichos muestran que el modelo puede utilizarse para predecir el voltaje de la celda, producción de HHO, eficiencias y temperatura de funcionamiento. El punto de referencia utilizada fue la celda A generadora de HHO. El número de parámetros necesarios se han reducido al mínimo para hacer el modelo adecuado para su uso en simulaciones de sistema de energía de HHO. Por lo tanto, el modelo puede ser particularmente útil para el diseño de Electrolizadores

6.2.1. Nomenclatura

SIGLAS	SIMBOLOS		
AC	corriente alterna	A	área del electrodo m^2
DC	corriente directa	aq	solución acuosa
KOH	hidróxido de potasio	C_{cw}	capacidad térmica del agua de enfriamiento
PEM	membrana protónica de intercambio	C	capacidad térmica total del electrolizador
RMS	raíz media cuadrática	emf	fuerza electromotriz en voltios
HHO	gas oxígeno	f_1	parámetro relacionado con la eficiencia
		f_2	parámetro relacionado la eficiencia de F
		g	gas
		h_{cond}	parámetro relacionados con la transferencia de calor conducción, $W K^{-1}$
		h_{conv}	parámetro relacionado con la transferencia de calor por convección, $W K$
		I	corriente en Amperios
		l	liquido
		LMTD	diferencia logarítmica promedio de temperatura
		n_c	numero de celdas en serie por stack
		p	presión en bars
		r	parámetro relacionados con la resistencia óhmica de electrolito, Ohms m
		R	resistencia térmica total de electrolizador, $W^{-2} K$
		s	coeficiente de sobretensión en los electrodos, Voltios
		t	coeficiente de sobretensión en los electrodos, $A^{-1} m^2$
		U	Voltaje en Voltios
		$U_{A_{HX}}$	todo el coeficiente por transferencia de calor área producto $W^{-1} K$
		ΔG	cambio en la energía de Gibbs, $J mol^{-1}$
		ΔH	cambio de entalpía, $J mol^{-1}$
		ΔS	cambio de entropía, $J K^{-1} mol^{-1}$
		\dot{n}	Rata de flujo molar mol/s
		\dot{Q}	Rata de transferencia de calor, W
		C	concentración o coulomb (carga eléctrica) $mol m^{-3}$
		E	potencial del electrodo o energía (V o J o KJ)
		E_A	Energía de activación en (KJ)
		F	Constante de Faraday (96.485 C mol^{-1})
		f	Fracción de volumen (adimensional)
		G	Energía libre de Gibbs (J)
		j	Densidad de corriente (Am^{-2})
		k	Factor de reacción (adimensional)
		l	Longitud en (m)
		n	Numero de electrones
		N	Numero de especies
		Q	Carga eléctrica (C)
		r	Velocidad de producción ($m^3 h^{-1}$)
		R	Resistencia eléctrica, constante de los gases
		t	Tiempo (s)
		T	Temperatura ($^{\circ}C$ o $^{\circ}K$)
		V	Volumen o unidad de voltaje (m^3 o V)
		x	Distancia en (m)
		α	Coefficiente de tránsito (adimensional)
		γ	Tensión superficial (N)
		η	Eficiencia (adimensional)
		θ	Angulo con la superficie del gas (grados)
		k	Conductividad eléctrica ($\Omega^{-1} m^{-2}$)
		ρ	Resistividad del gas (Ωm)
		Δ	Operador diferencia
		CONSTANTES	
		F =	96 485 C mol^{-1} o As mol^{-1} Constante de Faraday
		z =	2 numero of electrones transferidos por reacción
		R =	8.315 J $K^{-1} mol^{-1}$ Constante universal de los gases
		U_{ideal} =	0.0224136 $m^3 mol^{-1}$ volumen de un gas ideal en condiciones estándar

Figura 33 Nomenclatura para ecuaciones en el modelo matemático

6.2.2. Modelación

El objetivo de este contenido ha sido desarrollar un modelo que permita predecir el comportamiento dinámico electroquímico y térmico de la celda electrolítica, enfocando su uso principalmente en estudios de simulaciones de sistemas generadores de HHO

El modelo debía ser una conciliación entre modelos simples y complejos. Por ejemplo, las relaciones empíricas son utilizadas para modelar los más complejos procesos electroquímicos. Al mismo tiempo, se hizo un esfuerzo significativo para reducir al mínimo el número de parámetros necesarios y requeridos por las relaciones empíricas, Para hacer el modelo genérico viable; las teorías de

transferencia de calor y termodinámica fundamental se van a utilizar cuando sea necesario al caso.

6.2.3. Modelo Electroquímico

Los modelos electroquímicos son el corazón de cualquier trabajo de modelado del sistema de electrólisis y permiten establecer una relación entre la potencia eléctrica de entrada y la salida flujo de hidrógeno. Las balanzas de materia aplicadas a una celda de electrólisis permiten mostrar que el flujo de hidrógeno producido por la celda es proporcional a la corriente (I). Esta ecuación se denomina comúnmente Ley de Faraday y expresa el flujo molar de hidrógeno (\dot{n}_{H_2}) según el número estequiométrico de hidrógeno (ν_{H_2}) y la constante de Faraday (F).

$$n_{H_2} = \frac{I}{\nu_{H_2} F} = \frac{I}{2F} \quad \text{Ecuación (7)}$$

La eficiencia de Faraday está definida como el cociente entre la cantidad real y la máxima teórica de hidrógeno producido en el electrolizador. Puesto que la eficiencia de Faraday es causada por pérdidas de corriente parásitas a lo largo de los conductos de gas, a menudo se llama la eficiencia convencional. Las corrientes parásitas aumentan con la disminución de las densidades de corriente debido a una proporción creciente de electrolitos y por lo tanto también se debe a una menor resistencia eléctrica [47]. Además, la corriente parásita en una celda es lineal con el potencial de la celda. Por lo tanto, la fracción de corrientes parásitas total actual aumenta con la disminución de las densidades de corriente.

Un aumento de la temperatura conduce a una resistencia más baja, más pérdidas por corrientes parásitas y menor eficiencia de Faraday. Una expresión empírica que describe razonablemente estos fenómenos para una temperatura dada es: [48]

$$n_{Far} = \frac{I A^2}{f_1 + I A^2} f_2 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Para tener en cuenta que todos los electrones no están involucrados en la reacción de electrólisis (corrientes de fuga, reacciones parasitarias, etc.), esto la ecuación se puede modificar agregando la eficacia de Faraday

$$n_{H_2} = n_{far} \frac{I}{2F} \quad \text{Ecuación (9)}$$

6.2.4. Modelo termodinámico

Son desarrollos matemáticos que permiten evaluar el comportamiento termodinámico de una sustancia pura o de una mezcla bajo condiciones dadas; donde permite describir el equilibrio de la reacción y los efectos térmicos en los reactores electroquímicos; también puede conducir a la descripción de las propiedades de las soluciones electrolíticas

Pueden hacerse los siguientes supuestos sobre el agua para una reacción de división:

- El hidrógeno y el oxígeno son gases ideales
- El agua es un fluido incompresible
- Las fases gas y líquido son separadas.

Basado en estos supuestos el cambio de entalpía ΔH , de entropía ΔS y la energía de Gibbs ΔG de la reacción de división del agua puede calcularse con referencia a hidrógeno puro (H_2), oxígeno puro (O_2) y agua (H_2O) a temperatura y presión ($25^\circ C$ y 1 bar) estándar. El cambio total de entalpía para dividir el agua es la diferencia de entalpía entre los productos (H_2 y O_2) y los reactantes (H_2O). Lo mismo se aplica para el cambio total de entropía. El cambio en la energía de Gibbs se expresa por.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \text{ Ecuación (10)}$$

Para un proceso electroquímico que opera a temperatura y presión constante, el trabajo útil posible máximo (es decir, el trabajo reversible) es igual al cambio en la energía de Gibbs ΔG . La ley de Faraday relaciona la energía eléctrica (emf) necesaria para dividir el agua a la tasa de conversión química en cantidades molares. La emf para un proceso electroquímico reversible o el voltaje reversible de la celda reversible, se expresa por.

$$\frac{\Delta G^\circ}{z \cdot F} = \frac{237,000 \text{ J}}{2 \cdot 96,485 \text{ C}} = 1.23 \text{ V} = U_{rev}^\circ \text{ Ecuación (11)}$$

La cantidad total de energía necesaria en la electrólisis del agua es equivalente al cambio de entalpía ΔH . De la ecuación (9) se ve que ΔG incluye la irreversibilidad térmica $T\Delta S$, que para un proceso reversible es igual a la demanda de calor. La entalpía estándar para dividir el agua es $\Delta H^\circ = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$. La demanda total de energía ΔH está relacionada con el voltaje termo neutro de la celda por la expresión

$$\frac{\Delta H^\circ}{z \cdot F} = \frac{286,000 \text{ J}}{2 \cdot 96,485 \text{ C}} = 1.48 \text{ V} = U_{tn}^\circ \text{ Ecuación (12)}$$

6.2.5. Modelo térmico

La mayoría de los modelos térmicos consideran la pila de electrólisis como una capacidad térmica concentrada. Este enfoque permite tener en cuenta el impacto del punto de operación de la pila en su evolución de temperatura y en su eficiencia. Sin embargo, solo algunos de ellos incluyen una parte de la arquitectura térmica de un sistema de electrólisis que es necesaria para tener una mejor descripción del comportamiento térmico de la chimenea. Desafortunadamente, el sistema está parcialmente incluido y ninguno de los modelos existentes permite describir el comportamiento térmico de un sistema de electrólisis completo, incluyendo especialmente el grupo de regulación térmica con sus componentes (enfriadoras, bombas de circulación de refrigerante, ventiladores, etc.) y sus leyes de control de comando asociadas. Además, solo dos modelos de electrólisis PEM se identifican como parámetros distribuidos y permiten describir la distribución de temperatura en una celda de electrólisis y su impacto en la eficiencia y la eficiencia.

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{cool} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde

$$\dot{Q}_{gen} = \eta_c (U - U_{in}) I = \eta_c UI (1 - \eta_c) \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_T} (T - T_a) \quad \text{Ecuación (11)}$$

$$\dot{Q}_{cool} = C_{cw} (T_{cw,j} - T_{cw,o}) I = UA_{HX} LMTD \quad \text{Ecuación (15)}$$

Y

$$LMTD = \frac{(T - T_{cw,j}) - (T - T_{cw,o})}{\ln \left[\frac{(T - T_{cw,j})}{(T - T_{cw,o})} \right]} \quad \text{Ecuación (16)}$$

El primer término en el lado derecho de la ecuación #13 es la generación de calor interno h_{cat} , el segundo término es el total de calor perdido $heat\ loss$ que se lleva al ambiente y el tercer término es la demanda de refrigeración auxiliar. Toda la capacidad térmica C_t y resistencia R_t para el electrolizador y el producto $U-A$ para el intercambiador de calor de enfriamiento son las constantes que deben determinarse analíticamente o empíricamente antes de resolver las ecuaciones

térmicas. Cabe señalar que el modelo térmico presentado aquí es sobre un grupo básico de celdas.

Un método sencillo para calcular la temperatura del electrolizador es asumir la generación de calor constante y tasas de transferencia de calor para un determinado intervalo de tiempo. Si los intervalos de tiempo son elegidos suficientemente pequeños, el resultado es un modelo térmico cuasi estacionario. Utilizando la ecuación (13) como base, un modelo térmico cuasi estacionario puede ser expresado como.

$$T = T_{ini} + \frac{\Delta t}{C_t} (\dot{Q}_{gen} + \dot{Q}_{loss} + \dot{Q}_{cool})$$

Ecuación (16)

6.3. Verificación del Modelo

Después de hacer una comparación con los diferentes modelos matemáticos, se decide utilizar el modelo electroquímico, ya que este nos brinda una mayor facilidad para llegar a hacer un cálculo en la producción de hidrogeno a diferentes corrientes para llegar a hacer una comparación con los datos prácticos.

El electrolizador alcalino usado en nuestras pruebas emplea 11 placas de acero inoxidable 316L, es de diseño seco. Tiene 1 entrada y 1 salidas de electrolito. Es una celda bipolar, la cual está separada cada lámina con empaques o juntas de neopreno para realizar la electrolisis con esta configuración, además en cuenta con 2 placas de acrílico en sus laterales para observar el proceso y como es la producción de burbujas y su comportamiento, la celda está sellada con 24 torillos que cuentan con un termo empaque para garantizar el sello de la celda y evitar fugas de hidrógeno y de electrolito. Esta celda tiene un área de electrodo de $12,295 \text{ mm}^2$ y tiene una capacidad de 4 litros, Comparemos los datos obtenidos en la fase experimental se hará una comparación con la celda A, en la prueba #1 con un electrolito KOH al 35% y los datos de caudal que están en la Tabla #4.

Tabla 15 Parámetros de pruebas experimentales [Autores]

PRUEBA	AMP (A)	VOL (V)	ENERGÍA (W/H)	POTENCIA (W)
1	5,18	12,77	7758	66,1
2	10,31	12,56	7779	129,4
3	15,28	12,39	7802	189,3
4	20,45	12,19	7829	249,2
5	30,13	11,88	7850	357,9

Con estos valores empleamos la Ecuación #9, la cual es basada en un modelo electroquímico para la producción de hidrógeno, primero debemos establecer la

eficiencia farádica como lo muestra la Ecuación #8, donde utilizaremos los siguientes valores para reemplazar en la ecuación:

Tabla 16 Variables del modelo [Autores]

VARIABLES	
$I_1(A)$	5,18
$I_2(A)$	10,31
$I_3(A)$	15,28
$I_4(A)$	20,45
$I_5(A)$	30,13
$A (m^2)$	0,034
$f_1 40^\circ C (mA^2 cm^{-4})$	150
$f_2 \cdot 40^\circ C$	0,99
$F \left(\frac{C}{Mol} \right)$	96485
Z	2

Los valores de f_1 y f_2 fueron tomados de la Figura #34, donde el valor es calculado con la herramienta HYSOLAR y varía dependiendo la temperatura, se toma el valor más cercano a nuestro valor de temperatura de la celda que es de $40^\circ C$. [46]

PARAMETERS	Units			
Temperatures	$^\circ C$	40	60	80
f_1	$mA^2 cm^{-4}$	150	200	250
f_2	0...1	0.990	0.985	0.980

Figura 34 Parámetro Eficiencia de Faraday [46]

Después de calcular la eficiencia farádica, Se utiliza la Ecuación 6 donde se calculará la producción de hidrógeno, la única variable que cambiará en las pruebas será la Corriente I , ya que dependiendo de su valor el caudal tendrá variación.

Tabla 17 Valores de modelo matemático [Autores]

MODELO MATEMÁTICO "Producción de hidrógeno"					
Variable	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 4	PRUEBA 5
n_{far}	0,989203694	0,989798867	0,98990842	0,98994887	0,989976445
n_{H2}	2,65537E-05	2,65697E-05	7,83842E-05	0,00010491	0,000154573
Q	3,57105E-05	3,5732E-05	0,000105414	0,000141087	0,000207876
Q	0,035710531	0,035732017	0,105414219	0,141086967	0,207876222

Con los datos obtenidos en la tabla #17, se hace una comparación del Caudal Q con el valor que fue obtenido de método práctico.

Tabla 18 Caudal teórico vs Caudal Experimental [Autores]

Pruebas	Teórico (lpm)	Experimental (lpm)
Prueba 1	0,035710531	0,017195294
Prueba 2	0,035732017	0,031470472
Prueba 3	0,105414219	0,046732627
Prueba 4	0,141086967	0,06561409
Prueba 5	0,207876222	0,104050321

Se realiza una comparación con los datos tomados experimentalmente y se hace una gráfica para ver la diferencia de estos valores.

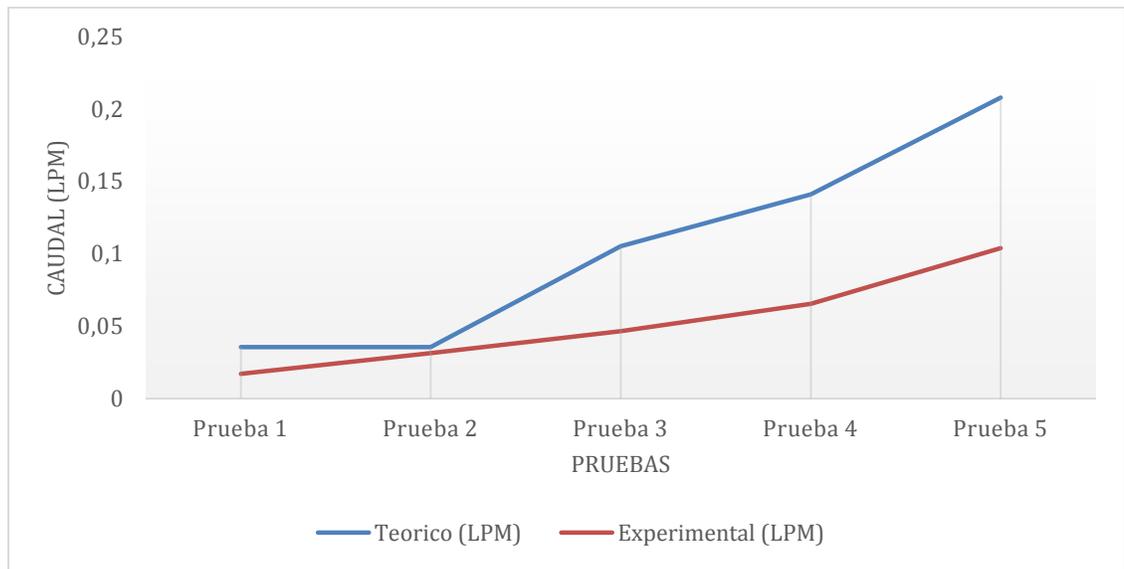


Figura 35 Caudal teórico vs caudal Experimental [Autores]

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al momento de hacer una comparación con los resultados teóricos y los resultados experimentales, tales como lo muestra la Tabla #15, se observa una diferencia máxima de 56%, entre los datos obtenidos de forma teórica con los datos experimentales y una diferencia mínima de 12% en el la prueba 2, esta diferencia se da en el modelo matico ya que este no tiene en cuenta varios factores que afecta el trabajo se la celda y eso produce una variación en los datos teóricos.
- En la evaluación del perfil de llama, existe una relación directamente proporcional entre Amperaje y la temperatura de la llama, donde se puede visualizar en la altura alcanzada, debido al caudal producido por el sistema generador de gas combustible según como lo describe las tablas #3, Tabla #4 Tabla #5 y Tabla #6
- El utilizar KOH como electrolito para las celdas alcalinas presentan mayor poder calorífico en las llamas producidas, teniendo como alcance temperaturas máximas de 112 °C como se evidencia en las tablas #5 y Tabla #6
- El flujo producido por las celdas generadoras de (oxi) hidrogeno no es constante, por lo cual fue imposible tomar los datos de perfil de llama, en relación con la generación de caudal es por impulsos de gases generados por la celda, siendo un flujo no constante.
- Las celdas generadoras de oxi-hidrogeno presentan mayor generación de caudal con respecto a las celdas generadoras de hidrogeno tal como se evidencias en los datos obtenidos pruebas experimentales que se encuentran en la Tabla #8 en relación de la Tabla #13
- El estado físico del electrolito es importante para la obtención de resultados, debido a que, si presenta desgaste e impurezas en su flujo, afectará el rendimiento de la celda para la generación de gas combustible.
- Las celdas pierden su capacidad de trabajo en producción de gas combustible en relación de largos periodos de trabajo aproximados a dos horas constantes de trabajo, sin embargo, si se realiza mantenimientos preventivos periódicos se puede asegurar un mejor rendimiento.
- La capacidad volumétrica de las celdas no fue un factor directo a la generación de (oxi)hidrógeno, planteando para futuros estudios la relación que existe entre las distancias de separación entre los electrodos en el proceso de electrólisis.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Yilmaz, E. Uludamar, and K. Aydin, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11366–11372, 2010.
- [2] M. K. Baltacioglu, H. T. Arat, M. Özcanli, and K. Aydin, "Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 1, pp. 3–9, 2015.
- [3] S. A. Musmar and A. A. Al-Rousan, "Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines," *Fuel*, vol. 90, no. 10, pp. 3066–3070, 2011.
- [4] I. E. Agency, "Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power."
- [5] M. M. El-Kassaby, Y. A. Eldrainy, M. E. Khidr, and K. I. Khidr, "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 243–251, 2016.
- [6] P. Chaiwongsa, N. Pornsuwanchaoen, and P. P. Yupapin, "Effective hydrogen generator testing for on-site small engine," *Phys. Procedia*, vol. 2, no. 1, pp. 93–100, 2009.
- [7] J. A. Caton, "Implications of fuel selection for an SI engine: Results from the first and second laws of thermodynamics," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3157–3166, 2010.
- [8] M. B. King, "Water electrolyzers and the zero-point energy," *Phys. Procedia*, vol. 20, pp. 435–445, 2011.
- [9] C. Bae and J. Kim, "Alternative fuels for internal combustion engines," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 0, pp. 1–25, 2016.
- [10] Energy.Gov, "Vehicle Technologies Office: Advanced Combustion Engines | Department of Energy." [Online]. Available: <http://energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office-advanced-combustion-engines>.
- [11] FuelCellToday, "Water Electrolysis & Renewable Energy Systems," vol. 2, p. 48, 2013.
- [12] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 307–326, 2010.
- [13] K. C. Sandeep, S. Kamath, K. Mistry, A. Kumar M, S. K. Bhattacharya, K. Bhanja, and S. Mohan, "Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, pp. 12094–12103, 2017.
- [14] Ø. Ulleberg, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 21–33, 2003.
- [15] J. Barco Burgos, "GASIFICACIÓN DE CUESCO DE PALMA PARA LA OBTENCIÓN DE GAS COMBUSTIBLE EN UN REACTOR DE LECHO FIJO," 2015.
- [16] I. Dincer and C. Acar, "Innovation in hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 22, pp. 14843–14864, 2017.
- [17] T. da Silva Veras, T. S. Mozer, D. da Costa Rubim Messeder dos Santos, and A. da Silva César, "Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 4, pp. 2018–2033, 2017.

- [18] Y. Attia and M. Samer, "Metal clusters: New era of hydrogen production," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May 2016, pp. 878–892, 2017.
- [19] M. Wang, Z. Wang, X. Gong, and Z. Guo, "The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014.
- [20] B. Paul and J. Andrews, "PEM unitised reversible/regenerative hydrogen fuel cell systems: State of the art and technical challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. April 2016, pp. 585–599, 2017.
- [21] L. Universidad Nacional Autónoma de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, E. HERRERA-PERAZA, G. ALONSO-NÚÑEZ, L. MANZANAREZ-PAPAYANOPOULOS, Y. VERDE-GÓMEZ, and A. KEER-RENDÓN, "MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA REACCIÓN DE EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 24, no. 1, pp. 21–31, 2008.
- [22] M. Ozcanli, M. A. Akar, A. Calik, and H. Serin, "Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 36, pp. 23366–23372, 2017.
- [23] C. Tecnova, "Análisis de libre operación celdas de hidrógeno para mejorar la eficiencia del combustible power hho," 2013.
- [24] G. Javier, S. Carlos, H. B. Alonso, M. Carlos, and T. Gonzalo, "Oxidación de H₂ y CO en una celda de combustible con ánodo de platino-estaño Oxidation of H₂ and CO in a fuel cell with a Platinum-tin Anode," *Ing. e Investig.*, vol. 24, no. 2, pp. 35–40, 2004.
- [25] C. Monsalve and B. Hoyos, "Evaluación de una celda de combustible de electrolito polimérico con ánodo de Pt-Sn operando con H₂, mezcla H₂-CO, propano y metano," *Energética*, vol. 34, pp. 11–14, 2005.
- [26] A. Ignacio and B. Arce, "tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico," 2011.
- [27] "Review of water electrolysis technologies and design of renewable hydrogen production systems."
- [28] A. Manabe, M. Kashiwase, T. Hashimoto, T. Hayashida, A. Kato, K. Hirao, I. Shimomura, and I. Nagashima, "Basic study of alkaline water electrolysis," *Electrochim. Acta*, 2013.
- [29] R. Bhandari, C. A. Trudewind, and P. Zapp, "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review," *Journal of Cleaner Production*. 2014.
- [30] S. Marini, P. Salvi, P. Nelli, R. Pesenti, M. Villa, M. Berrettoni, G. Zangari, and Y. Kiros, "Advanced alkaline water electrolysis," *Electrochim. Acta*, 2012.
- [31] C. K. Kjartansdóttir, L. P. Nielsen, and P. Müller, "Development of durable and efficient electrodes for large-scale alkaline water electrolysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013.
- [32] P. Shukla, K. K. Singh, P. K. Tewari, and P. K. Gupta, "Numerical simulation of flow electrolyzers: Effect of obstacles," *Electrochim. Acta*, vol. 79, pp. 57–66, 2012.
- [33] M. H. Sellami and K. Loudiyi, "Electrolytes behavior during hydrogen production by solar energy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, no. July 2016, pp. 1331–1335, 2017.

- [34] P. Haug, B. Kreitz, M. Koj, and T. Turek, "Process modelling of an alkaline water electrolyzer," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 24, pp. 15689–15707, 2017.
- [35] Z. Abdin, C. J. Webb, and E. M. A. Gray, "Modelling and simulation of an alkaline electrolyser cell," *Energy*, vol. 138, pp. 316–331, 2017.
- [36] M. J. Lavorante, R. Munaro, J. I. Franco, H. J. Fasoli, and A. Sanguinetti, "Impreso en la Argentina," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 15, 2011.
- [37] E. Aguilar, "Evaluación electroquímica de distintos arreglos de electrolizadores alcalinos," p. 71, 2015.
- [38] J. Rafael and L. Ramírez, "Modelo dinámico de un electrolizador alcalino."
- [39] Rousar I. Fundamentals of electrochemical reactors. In: Ismail MI, editor. *Electrochemical reactors: their science and technology part A*. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [40] Pickett DJ. *Electrochemical reactor design*, 2nd ed. New York: Elsevier, 1979.
- [41] Griesshaber W, Sick F. Simulation of Hydrogen–Oxygen–Systems with PV for the Self-Sufficient Solar House. FhG-ISE, Freiburg im Breisgau, 1991 (in German).
- [42] Havre K, Borg P, Tommerberg K. Modeling and control of pressurized electrolyzer for operation in stand alone power systems. Second Nordic Symposium on Hydrogen and Fuel Cells for Energy Storage, Helsinki, January 19–20, 1995. p. 63–78.
- [43] Vanhanen J. On the performance improvements of small-scale photovoltaic-hydrogen energy systems. PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 1996.
- [44] Hug W, Divisek J, Mergel J, Seeger W, Steeb H. Highly efficient advanced alkaline electrolyzer for solar operation. *Int J Hydrogen Energy* 1992;17(9):699–705.
- [45] Ulleberg I. Simulation of autonomous PV-H₂ systems: analysis of the PHOEBUS plant design, operation and energy management. ISES 1997 Solar World Congress, Taejon, August 24–30, 1997.
- [46] A. Salami Tijani, N. Afiqah Binti Yusup, and A. Abdol Rahim, "Mathematical Modelling and Simulation Analysis of Advanced Alkaline Electrolyzer System for Hydrogen Production," 2014.
- [47] A. El-Sharif, "Simulation Model of Solar-Hydrogen Generation System."
- [48] P. Olivier, C. Bourasseau, and P. B. Bouamama, "Low-temperature electrolysis system modelling: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. March, pp. 280–300, 2017.