



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE UN
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
RENOVABLE EN FORMA DE HIDRÓGENO**

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Alfonso Navarro Montejo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

ASESORES

Dra. Beatriz Escobar Morales

Dr. José Hernández Rodríguez

M.E.S. Roberto Acosta Olea

Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Trabajo de tesis bajo la supervisión del comité de asesoría y
aprobada como requisito para obtener el grado de:**

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

ASESOR:

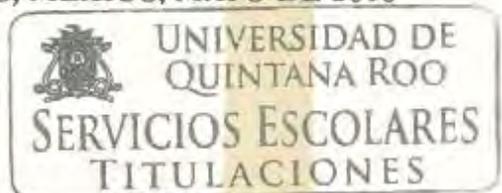
Dra. Beatriz Escobar Morales

ASESOR:

Dr. José Hernández Rodríguez



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, MAYO DE 2016



Dedicatoria

A mi mamá, la mujer más bella, valiente, bondadosa y afectuosa que existirá en mí vida. A ti, que por tu exorbitante esfuerzo y sacrificio, me diste todo, sin pedir nada, a ti que dejaste todo y entregaste todo por mí, sé que no me alcanzara el tiempo para devolverte lo que me has dado, pero yo, Alfonso Navarro Montejo, orgulloso de ser tu hijo, te dedico todos mis triunfos y esfuerzos ante la vida, y te prometo que cada día lo utilizare para enorgullecerte, mantente segura que tu hiciste un buen hombre para el mundo.

Te amo mamá.

Agradecimientos

A mi familia:

A todo ellos, que pese a la distancia que nos separa, me brindaron su apoyo e incondicionalidad ante todo momento. Especialmente agradezco a mi abuelito José y a mi tío Pepe, por el apoyo brindado a mi madre.

A mis profesores:

Que desde el primer momento me apoyaron y me brindaron su confianza durante todo el trayecto de mis estudios. Especialmente agradezco enormemente a los doctores Romeli Barbosa y Beatriz Escobar por el apoyo, guía y amistad que me proporcionaron en todo este proceso de crecimiento, les agradezco el haberme acogido como uno de sus estudiantes y mostrarme el mundo de la investigación.

Agradezco a los doctores Roberto Acosta, Jorge Ovidio, Emanuel Torres, José Hernández, Omar Yam, Javier Vázquez, Víctor Sánchez, Ávila Reveles y Geordi Chamlati, que durante toda la carrera me brindaron su confianza y apoyo en todo lo que necesite, agradezco a la vida por haber tenido excelentes profesores.

Agradezco al Dr. Inocente Bojórquez, por ser uno de los pilares que me sostuvieron en etapas difíciles de mi vida, su apoyo, amistad y enseñanzas, trascenderán por todo el tiempo en mi persona, gracias por todo.

Por el soporte técnico recibido durante la caracterización experimental del sistema de almacenamiento, realizado durante mi estancia de verano de investigación científica agradezco al M. C. Enrique Escobedo Hernández.

Financiamiento:

Un especial agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Secretaría de Educación Pública (SEP-CONACYT), por el apoyo económico brindado bajo el proyecto CB-2013/221988 y al programa de Redes Temáticas (RTH2).

Contenido

Justificación	.....	I
Resumen	.....	II
Objetivo general	.....	III
Objetivos particulares	.....	III
Lista de símbolos	.....	IV
Lista de acrónimos	.....	V
Introducción	.....	VI
 CAPITULO I		
Introducción al hidrógeno		1
1.1 Historia del hidrógeno	.....	1
1.2 Características generales del hidrógeno como combustible	.....	3
1.3 Propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del hidrógeno	.....	6
1.4 Propiedades del hidrógeno gaseoso	.....	11
 CAPITULO II		
Hidrógeno y energías renovables		14
2.1 Tecnologías de producción de hidrógeno	.....	15
2.1.1 Electrolisis del agua	.....	15
2.2 Tecnologías de almacenamiento del hidrógeno	.....	19
2.2.1 Almacenamiento como gas comprimido	.....	20
2.2.2 Almacenamiento criogénico	.....	20
2.2.3 Almacenamiento con hidruros metálicos	.....	21
2.3 Tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno	.....	25
2.3.1 Membrana de intercambio protónico	.....	26
2.3.2 Alcalinas	.....	26
2.3.3 Ácido fosfórico	.....	27
2.3.4 Carbonato fundido	.....	27

2.3.5	Óxido sólido	28
2.3.6	Celdas de combustible miniaturizadas	29
2.4	Sistemas híbridos de energía renovable	30
2.4.1	Sistema híbrido fotovoltaico-hidrógeno	30
2.4.2	Sistema híbrido eólico-hidrógeno	32

CAPITULO III

Metodología de experimentación		34
3.1	Materiales y equipo	34
3.2	Instalación del sistema	35
3.3	Técnica de caracterización	39
3.3.1	Carga de hidrógeno	39
3.3.2	Descarga de hidrógeno	42
3.3.3	Concentración de datos	42
3.3.4	Obtención de resultados	43

CAPITULO IV

Resultados experimentales		45
4.1	Punto de control de 0.5 bar	44
4.2	Punto de control de 1.5 bar	53
4.3	Punto de control de 2.5 bar	62
4.4	Punto de control de 4.0 bar	71
4.5	Punto de control de 6.5 bar	80
4.6	Punto de control de 9.0 bar	88
4.7	Punto de control de 9.0 bar (2 tanques)	96
4.8	Operación del sistema	102
Conclusiones	.....	109
Referencias bibliográficas	.....	110

Justificación

En la actualidad, existe poco trabajo y estudio tanto en México como en el mundo, con respecto a la investigación de las variables físicas que intervienen en el comportamiento real de un sistema modular de generación de hidrógeno que aprovecha las energías renovables, como la solar fotovoltaica o la energía eólica, y posteriormente el almacenaje del mismo. En esta situación, las condiciones que intervienen directamente en la producción del hidrógeno como combustible, deben ser estudiadas en beneficio de la óptima operación de todo el sistema y el incremento de la eficiencia de generación del combustible. En general, los gobiernos de todas las economías mundiales están interesados en un cambio de paradigma energético, ya que su sector social e industrial, se ve afectado por la creciente alza de precios en los combustibles fósiles, su inevitable escasez y los costos ambientales aunados a estos. En este escenario, esta tesis está dirigida a la identificación de las principales variables físicas que afectan a un sistema de generación de hidrógeno alimentado con energía sustentable. Mediante metodologías de mediciones eléctricas, velocidades de viento, recurso fotovoltaico, temperaturas, presiones y cálculos físico-matemáticos, se pretende retroalimentar y optimizar el funcionamiento de este sistema.

Resumen

El análisis de un sistema de almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno es fundamental para detectar aquellas variables físicas que rigen el comportamiento real del sistema e identificar estrategias que permitan incrementar la eficacia y eficiencia del sistema. Con la adquisición y análisis de datos en diversas condiciones de operación del sistema se pueden generar modelos que puedan predecir y caracterizar el desempeño real para retroalimentar su mejor implementación. Este trabajo de investigación consistió en detectar oportunidades de optimización del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, utilizando como técnicas: la medición y captura de datos de operación, la reducción y simplificación de información con métodos matemáticos, y el análisis e interpretación de resultados. Se evaluó un sistema compuesto por un electrolizador de celdas de membrana de intercambio protónico y dos tanques de hidruros metálicos, los cuales, fueron sometidos a diversas condiciones de operación: 1) el sistema produjo y almacenó hidrógeno en un tanque de almacenamiento a condiciones ambientales en los puntos de control de presión de 0.5 bar, 1.5 bar, 2.5 bar, 4.0 bar, 6.5 y 9.0 bar. 2) Simultáneamente se sometió la producción y carga de hidrógeno en 2 tanques de almacenamiento a 9.0 bar de presión. Los resultados de esta investigación ayudaron a conocer las capacidades y limitantes de un sistema de producción y almacenamiento de hidrógeno bajo ciertas condiciones de operación, enriqueciendo los criterios para la implementación de estos sistemas.

Objetivo general

Analizar teórica y experimentalmente las principales variables físicas que afectan el comportamiento real de un sistema de almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno para identificar estrategias que permitan aumentar la eficacia y eficiencia de operación.

Objetivos particulares

- ◆ Realizar el diseño conceptual del sistema para ejecutar la caracterización experimental.
- ◆ Caracterización de los componentes en el laboratorio para generar los modelos teóricos mediante regresión lineal.
- ◆ Análisis de los resultados experimentales en puntos de control para predecir el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación.

Lista de símbolos

H_2	Hidrógeno
CO_2	Dióxido de carbono
H_2O	Agua
O_2	Oxígeno
OH	Hidróxido
e^-	Electrón
H^+	Protón de hidrógeno o ion positivo de hidrógeno
H_2S	Ácido sulfhídrico
t	Tiempo
p	Presión
\dot{Q}_{prod}	Producción de hidrógeno
I	Corriente eléctrica
L	Potencial
T	Temperatura
P	Potencia eléctrica
\dot{Q}_{desc}	Descarga de hidrógeno
T_{carg}	Temperatura de carga
T_{desc}	Temperatura de descarga
p_{ce}	Punto de control establecido
E_R	Energía requerida
V_{prod}	Hidrógeno producido
Em	Energía por mililitro
phm	Producción de hidrógeno por minuto
E_{ex}	Potencial energético

Lista de acrónimos

PC	Punto de control
PEM	Membrana de intercambio protónico (Proton E. Membrane)
FC	Celda de combustible (Fuel cell)
cal/cm^2	Calorías por centímetro cuadrado
atm	Atmosfera
min	Minuto
seg	Segundo
m/s	Metros por segundo
cm^2/s	Centímetro cuadrado por segundo
A	Amperes
V	Volts
°C	Grados Celsius
W	Watt
kW	Kilowatt
L	Litro
K	Grados Kelvin
kg	Kilogramo
ml	Mililitro
J	Joule
kJ	Kilojoules
bar	Bares
ml/min	Mililitros por minuto
$°C/min$	Grados Celsius por minuto

Introducción

Poco después de la invención de la máquina de vapor en la década de 1860, cuando en la revolución industrial se comenzó a remplazar a los humanos y animales por fuentes de energía naturales, un futuro brillante parecía estar seguro para la humanidad, inicialmente como energía natural se utilizó la madera y el carbón, tiempo después el petróleo y gas natural estaban siendo aprovechados para beneficios de la humanidad [1]. Como resultado, durante este período reciente de la industrialización global, la calidad de vida de la población humana ha sido estrechamente relacionado con la cantidad de energía utilizada, donde en los últimos cuarenta años el consumo de energía per cápita en promedio es de alrededor de 1,5 toneladas equivalentes de petróleo (tep) por persona por año [2, 3]. En el año 2007, la distribución (porcentual) de la energía final fue de un 28% para el transporte, un 38% residencial-comercial y un 34% para el sector industrial [4, 5]. La demanda energética mundial, estimada en unos 10,000 millones de tep ha sido cubierta en más de un 87% por los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural. Desde el punto de vista ambiental, es la combustión de combustibles fósiles el principal causante de la emisión de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono primordialmente), responsables del efecto de calentamiento global que sufre nuestro planeta [6, 7].

La idea del hidrógeno como combustible del futuro no solo se justifica porque es un recurso renovable y amigable con el ambiente, sino también por su amplia gama de aplicaciones móviles y estacionarias [8]. Se pretende que un mediano plazo ayudará a resolver los problemas de almacenamiento y transporte de energía que en el futuro tendrá el uso masivo de las energías renovables, pero además durante un periodo de transición permitirá un uso más eficiente y menos contaminante de los combustibles fósiles, mejorando la calidad del aire y reduciendo la contaminación global del medio ambiente [9, 10]. Algunas propiedades del hidrógeno como un vector energético es que tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, la cantidad de energía contenida en 1 kg de hidrógeno es equiparable a la contenida en 3.5 litros de petróleo, en 1 kg de gas natural o en 1 kg de gasolina.

Además, cuando se le combina con el oxígeno, el hidrógeno produce agua. Por otro lado, su oxidación puede producir electricidad directamente en procesos electroquímicos y también se puede combustionar a altas relaciones de compresión incrementando eficiencias [10, 11].

La electrólisis del agua es uno de los caminos más directos para la obtención de hidrógeno, consiste en la ruptura de esa molécula por una corriente eléctrica que circula entre dos electrodos inertes, en una solución electrolítica adecuada [12]. Esta corriente eléctrica debe ser aportada por una fuente de energía renovable ya que representa una solución viable a los problemas que aquejan por el uso de combustibles fósiles [13, 14].

Este trabajo de investigación se concentra en la identificación de aquellas principales variables físicas que intervienen en un sistema de generación de hidrógeno alimentado con energías renovables como la solar fotovoltaica o la eólica, con el objetivo de retroalimentar y optimizar el funcionamiento de estos sistemas. Se encuentra dividido en cuatro capítulos: el primer capítulo contiene una introducción al hidrógeno, donde se describirán sus propiedades físicas, así como sus ventajas energéticas y su impacto en lo social, lo económico y lo ambiental. El segundo capítulo se enfoca hacia los aspectos técnicos e ingenieriles de la producción y aprovechamiento del hidrogeno como combustible. El tercer capítulo presenta la metodología de experimentación en la identificación de oportunidades para retroalimentar y optimizar un sistema de generación y almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno. Finalmente, en el capítulo 4 se muestran los resultados y la discusión de los datos obtenidos.

Cabe mencionar, la principal aportación de este trabajo es ubicar oportunidades de optimización en un sistema energético de generación y almacenamiento de hidrogeno aprovechando energías renovables. De manera ambiciosa se espera que la continuidad de los análisis presentados en esta tesis permita el desarrollo e implementación de un sistema híbrido para la producción de hidrógeno.

Capítulo I

Introducción al hidrógeno

1.1 Historia del hidrógeno

En la historia de la Química, la primera referencia al hidrógeno como tal aparece con la identificación de dos gases diferentes formando parte del agua, por el inglés Henry Cavendish en 1766. Cavendish le da el nombre de aire inflamable. Más tarde, Antoine Lavoisier le da el nombre por el que lo conocemos, hidrógeno, generador de agua. Antes de que finalizara el siglo XVIII, el hidrógeno encontró su primera aplicación práctica, como es habitual, por el ejército francés para sus globos de reconocimiento. Más de un siglo después, Alemania lo empleó en sus dirigibles para cruzar el Océano Atlántico e incluso como combustible para propulsión de los llamados Zeppelines. Esta empresa concluyó después de la catástrofe de Hindenburg en 1937 (*figura 1*).



Figura 1. Accidente del Zeppelin Hindenburg [15].

Más tarde, antes y después de la segunda guerra mundial, el hidrógeno se empleó como combustible de motores de vehículos de todo tipo, incluidos locomotoras y submarinos, pero sin gran éxito. Posteriormente, el auge del carbón en el siglo XIX y

del petróleo en el siglo XX eliminaron toda posibilidad del uso másico del hidrógeno. Solamente la industria química seguía interesada, primero con la producción de fertilizantes derivados del amoníaco y después con la necesidad de utilizar el hidrógeno para eliminar azufre y otros componentes de las gasolinas y gasóleos en máquinas de locomoción y como complemento en la síntesis de productos derivados del petróleo, manteniendo en el mundo una producción baja y sustancial del hidrógeno. Más adelante, ya en la segunda mitad del siglo XX la preocupación por el ambiente y los posibles efectos sobre el clima, el comienzo de la era espacial y la inquietud sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, ha traído de nuevo un gran impulso, sobre todo, de la industria automovilista por el empleo en gran escala del hidrógeno.

El interés de las industrias aeroespacial y automovilista por el hidrógeno se debe a la llamada celda de combustible, dispositivo que puede convertir al hidrógeno administrado en energía eléctrica y térmica, sin una combustión y emisión de contaminantes de por medio. Este proceso fue descubierto en 1839 por el galés William R. Grove, pero su desarrollo comenzó en la década de los 1960 por la NASA para producir electricidad y agua en algunas de sus misiones especiales.

En el año 2002 tuvo lugar la XIV Conferencia Mundial sobre la Energía del Hidrógeno, en la que se presentaron gran cantidad de trabajos relativos al tema del hidrógeno. En casi 30 años desde esta primera edición se han celebrado 14 Conferencias Mundiales de la Energía del Hidrógeno.

Actualmente, un gran número de prototipos de las principales marcas de automóviles y autobuses ensayan celdas de combustible, de tipos y combustibles diversos [16].

1.2 Características generales del hidrógeno como combustible

El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica, con un número atómico 1, masa atómica 1,007 y simbolizado con una única letra “H”. Es el elemento

químico más ligero que existe, su átomo está formado por un protón y un electrón (figura 2), y es bastante estable en forma de molécula diatómica (H_2), además en condiciones normales se puede encontrar en estado gaseoso, y es inodoro, incoloro e insípido [17].

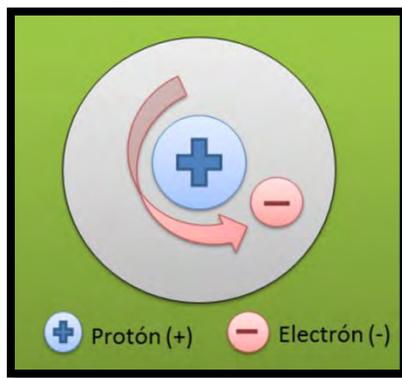


Figura 2. Átomo de hidrógeno (elaboración propia).

En la Tierra es un elemento muy abundante y constituye aproximadamente el 75% de la materia de todo el Universo, pero este se encuentra combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua (H_2O), o combinado con carbono, formando compuestos orgánicos, siendo el más simple, el metano (CH_4). Por tanto, no es un combustible que pueda tomarse libremente y directamente de la naturaleza, sino que se puede conceptualizar como un vector energético, transporta la energía (como la electricidad) y por ello se tiene que extraer de aquellas moléculas que lo poseen, pero para esto existen diversos métodos y tecnologías en existencia, desarrollo o aun en investigación para lograr este propósito [18]. En proporción, un kilogramo de hidrógeno puede liberar más energía que un kilogramo de cualquier otro combustible (casi el triple que la gasolina o el gas natural), en el proceso de aprovechamiento y liberación de toda esa energía, no emite gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO) o dióxido de carbono (CO_2), sino el producto es agua en forma líquida o vapor, por lo que el impacto ambiental es drásticamente reducido [19].

Algunas de las propiedades que más resaltan del hidrógeno, a la hora de ser considerado como un buen combustible alternativo que se enfrente a las necesidades del presente y del futuro, se pueden resumir en lo siguiente [20]:

- ⦿ Es inagotable y seguro.
- ⦿ Es fácilmente almacenable y transportable.
- ⦿ No altera el estado de la atmósfera, no es contaminante.
- ⦿ Es bastante económico de producir.
- ⦿ Más eficiente que los demás combustibles (carbón, gas natural, gasolina).

La generación del hidrógeno está muy diversificada, porque puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes de energía tanto tradicionales (combustibles fósiles), como con energías renovables (solar fotovoltaica, eólica, hidráulica, geotérmica, etc.); Desde los inicios de su producción, a escala mundial se ha producido tradicionalmente a partir de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y el gas natural, pero también aunque en pequeña y micro escala se obtiene el hidrógeno de alta pureza por electrólisis del agua, que es considerada la principal fuente de hidrógeno. También existen otros métodos para el rompimiento de la molécula del agua, como la descomposición termocatalítica. Pero actualmente ya es indiscutible que el hidrógeno producido a partir de fuentes de energías renovables será la base energética del futuro, tales sistemas de producción de hidrógeno pueden basarse en energía del océano, energía geotérmica, energía eólica, energía de la biomasa, por mencionar algunos. En la figura 3 se muestra las principales fuentes y demandas de este combustible. Por último, cabe resaltar que en reciente investigación se encuentran otros sistemas de producción de hidrógeno que se basan en energía nuclear y en métodos biológicos usando compuestos orgánicos, algas y diversas bacterias, son los llamados procesos de fotoproducción y bioproducción [21].

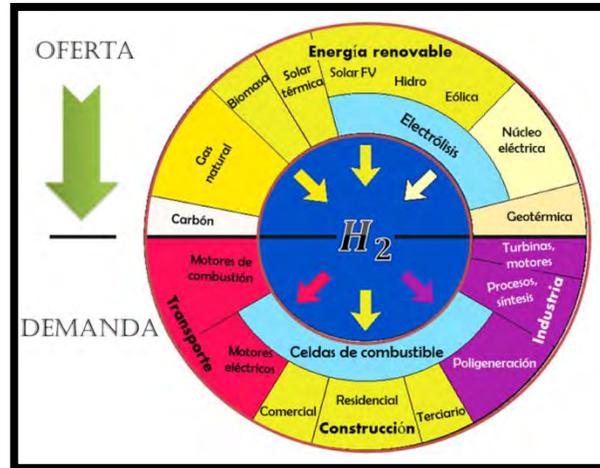


Figura 3. Fuentes de generación y aprovechamiento de H_2 (modificado de [22]).

Debido a que el hidrógeno puede obtenerse de una diversa gama de fuentes de energía renovables, estos podrían reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía. Por otra parte a causa de la contaminación del aire, los costos relacionados con la preservación de la salud son un problema creciente y el hidrógeno también contribuiría a reducir estos costos ya que no contamina. El hidrógeno se le considera un vector energético respetuoso con el medio ambiente porque se convierte en vapor de agua al hacer combustión. A largo plazo, el hidrógeno obtenido de fuentes renovables ofrece un potencial de energía enorme, que será sostenible en todos los sentidos.

1.3 Propiedades fisicoquímicas y termodinámicas del hidrógeno

El hidrógeno tiene una de las configuraciones electrónicas más simples de las existentes, a pesar de su aparente simplicidad, el hidrógeno existe de más de 40 formas distintas. La diversidad de formas se debe, en gran medida, a la existencia de especies atómicas, moleculares e iónicas en fase gaseosa: H , H_2 , H^+ , H^- , H_2^+ y H_3^+ ; a la existencia de tres isótopos, $1H$, $2H$ (D, deuterio), $3H$ (T, tritio) y sus especies correspondientes D, D_2 , HD, DT, por mencionar algunos; y por último, a la existencia de isómeros de espín nuclear en las especies diatómicas homonucleares, esta rotación del spin atómico ya sea en la misma dirección (paralelos) se denominan orto-

hidrógeno; y aquellas con los spins en direcciones opuestas (antiparalelas) se denominan, para-hidrógeno. A medida que la temperatura va disminuyendo, las moléculas de orto-hidrógeno se convierten en para-hidrógeno. En la licuación del hidrógeno será muy importante tener en cuenta esta propiedad. Estas moléculas tienen pequeñas diferencias en las propiedades físicas pero son químicamente equivalentes; por lo tanto, los riesgos en general asociados con el uso de todo tipo de hidrógeno es el mismo para todas sus formas de configuración molecular, atómica y iónica [23].

Principales propiedades:

Densidad

Es el elemento químico más ligero y más abundante en el universo, con una densidad de: $0.0899 \frac{kg}{N \cdot m^3}$.

Poder calorífico superior e inferior

De acuerdo con los estudios el hidrógeno es uno de los combustibles más seguros, su seguridad es comparable a la del gas natural, por algo ha sido muy usado mundialmente desde hace décadas en aplicaciones convencionales en la industria química y petroquímica; tiene contenido energético alto por cada unidad de masa con un Poder Calorífico Superior de $141 MJ/kg$ e Inferior de $119 MJ/kg$. Estos valores son superiores comparándolos con otros combustibles convencionales, por ejemplo el poder calorífico inferior del hidrógeno es tres veces mayor al de la gasolina. No obstante, debido a su baja densidad en condiciones normales de temperatura y presión, tiene una baja densidad energética por unidad de volumen, siendo de $10.79 MJ/m^3$. Esta densidad energética por unidad de volumen puede incrementarse al aumentar la presión o disminuir la temperatura.

Inflamabilidad

El hidrógeno no es un elemento explosivo, en condiciones normales, es una molécula estable, y a diferencia de los elementos explosivos, el hidrógeno necesita una fuente

de ignición externa para que se produzca una ignición. Para que el hidrógeno se combustione, se necesitan tres condiciones: una mezcla de hidrógeno con un oxidante, que la mezcla se encuentre en el límite de inflamabilidad y que esté presente una fuente de ignición. La mezcla de hidrógeno con aire, oxígeno, o algún otro oxidante, es altamente inflamable en un rango bastante amplio de composiciones con un bajo límite de inflamabilidad.

Los límites de inflamabilidad de un elemento químico, dependen de la temperatura, presión, presencia de diluyentes, geometría del recipiente, instalación del sistema y sobre todo de la energía de ignición. El rango de inflamabilidad de la mezcla $H_2 - \text{aire}$ y $H_2 - O_2$, se estrecha si la propagación de la llama es hacia abajo y se amplía si la propagación de la llama es hacia arriba.

Los límites de inflamabilidad inferior y superior del hidrógeno en aire seco a una temperatura de 298.15 K a y a una presión de 101.3 kPa , son de 4.1% y 74.8% , y para la mezcla $H_2 - O_2$ son de 4.1% y 94% . La reducción en la presión por debajo de 101.3 kPa tiende a estrechar el rango de inflamabilidad, aumentando el límite inferior y disminuyendo el superior.

Una mezcla en los límites de inflamabilidad puede ser diluida con sus propios componentes hasta que la concentración de la mezcla se encuentre fuera de estos límites. La baja densidad que tiene el hidrógeno, hace que se eleve velozmente y en el caso de un accidente, se reduce potencialmente la posibilidad de una explosión. En la figura 4 se muestra los límites de inflamabilidad de la mezcla hidrógeno-oxígeno-nitrógeno de acuerdo a su concentración porcentual [24].

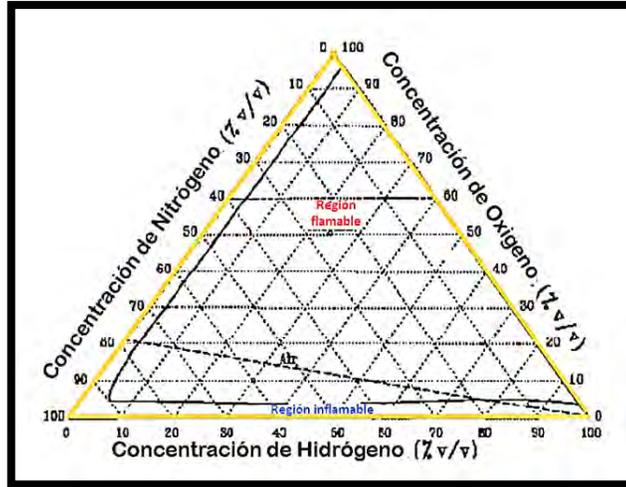


Figura 4. Límite de inflamabilidad de mezcla $H_2 - N - O$ (modificado de [25]).

Temperatura de autoignición

Las temperaturas de ignición dependen de la concentración, presión del hidrógeno gaseoso y del tratamiento superficial del contenedor que lo resguarda. Las temperaturas que se manejan son muy dependientes del sistema, de los valores con los que se trabaje y de los rangos en que se encuentre, en general se deben aplicar a sistemas similares. A una presión atmosférica de 101.3 kPa, el rango de temperaturas de autoignición del hidrógeno estequiométrico en aire está entre 773 y 850 K; en oxígeno estequiométrico está entre 773 y 833 K [26].

Energía mínima para la chispa de ignición

La energía mínima de la chispa para la ignición de la mezcla $H_2 - aire$ para diferentes presiones se presenta en la *tabla 1*.

Tabla 1. Energía mínima de chispa, para la ignición de una mezcla hidrógeno-aire Fuente especificada no válida.

Energía mínima de la chispa (mJ)	Presión (kPa)
0.017	101.3
0.09	5.1
0.56	2.03

La energía de chispa requerida para hacer combustión del hidrógeno es inferior que la del metano que es de 0.29 mJ y la de la gasolina que es de 0.24 mJ ; no obstante, la energía de ignición de estos tres combustibles es lo suficientemente baja que en presencia de cualquier fuente de ignición débil; como superficies calientes, chispas, cerillas o la misma electricidad estática que puede cargar un cuerpo humano, puede ser suficiente para comenzar una ignición de cualquiera de estos combustibles mezclados con aire.

Entalpia, punto de fusión y ebullición

El hidrógeno tiene un punto de fusión de 13.957 K , un punto de ebullición de 20.39 K y una entalpia de 435.9 kJ/mol .

Detonación

El peor suceso de la liberación accidental del hidrógeno, es que se mezcle con un oxidante como el aire, que la mezcla se sitúe dentro de los límites de concentración para la detonación, y que por lo tanto produzca una mezcla detonante. La flotabilidad positiva del hidrógeno y su rápida difusión molecular, hacen que cualquier fuga se mezcle rápidamente con el aire circundante. Si se llegara a producir una detonación, el resultado en la zona de reacción es una onda de choque y una onda expansiva de gran radio inherente al suceso, con potencial para causar daño a la instalación y al personal.

Los límites de detonación varían con la naturaleza y dimensión del confinamiento. Este no puede ser especificado para ninguna mezcla combustible – oxidante, a menos que estén especificados. En la figura 5 se muestran las dimensiones mínimas de la mezcla hidrógeno - aire para la detonación en tres tipos de confinamiento a una presión de 101.3 kPa . También se observa la influencia del tipo de confinamiento y los límites de detonación [27].

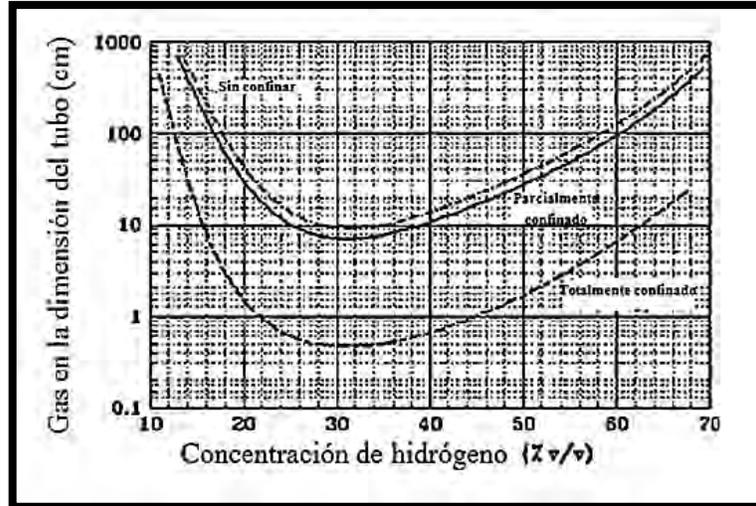


Figura 5. Dimensiones mínimas para detonación de mezcla H_2 -Aire a NPT (modificado de [27]).

Los límites de detonación que se encuentran en la literatura deben ser utilizados con precaución ya que la energía para la detonación aumenta para las mezclas pobres y ricas, es posible producir detonaciones inducidas en casi cualquier mezcla de H_2 – *aire* si se introducen gran energía de ignición.

Transición de la deflagración a la detonación

La combustión H_2 – *aire* puede comenzar como una detonación o como una deflagración, posteriormente transformarse a una detonación después de que la llama haya viajado una cierta distancia. El rango de composición el cual se puede desarrollar una detonación es más estrecho que el de una deflagración. El rango para la detonación de la mezcla H_2 – *aire*, va desde 18.5% y 59 % de hidrógeno. No obstante, con mayor energía de ignición estos límites pueden ser ampliados. Se necesita una fuente que proporcione una energía convenientemente grande para que una combustión comience como una detonación. Para que la deflagración pase a ser una detonación, es necesario un mecanismo de aceleración de la llama [28].

1.4 Propiedades del hidrógeno gaseoso

El hidrógeno gaseoso tiene unas características particulares que deben ser

especialmente analizadas.

Detección

En estado de gas, el hidrógeno es incoloro, inodoro y es indetectable bajo ninguna concentración por los sentidos humanos. El hidrógeno propiamente no es tóxico, pero puede resultar asfixiante al desplazar al oxígeno presente en el aire respirable. Una atmósfera que contenga una concentración de oxígeno inferior al 19.5 % del volumen, se considera como deficiente en oxígeno, es recomendable utilizar detectores de hidrógeno o cámaras térmicas para detectar una llama invisible.

Adsorción

El hidrógeno es fácilmente adsorbido por algunos metales finamente divididos, siendo los principales paladio, platino y oro, no obstante también puede ser adsorbido por el fierro, el titanio, el níquel, el lantano y elementos raros como el neodimio y el serio, por mencionar algunos. Por ejemplo, uno volumen de paladio finamente dividido puede adsorber aproximadamente 850 volúmenes de hidrógeno a temperatura ambiente. El hidrógeno adsorbido es muy activo químicamente.

Densidad variable

Es más ligero que el aire en condiciones normales de temperatura y presión, tiende a elevarse a temperaturas superiores de 23 K. El vapor saturado es más pesado que el aire, lo cual hace que este cerca del suelo hasta que aumenta la temperatura y ascienda. Las velocidades de flotabilidad están relacionadas con la diferencia de densidades entre el combustible y el aire; por lo tanto, el combustible gaseoso de baja temperatura y mayor densidad producido por los escapes de hidrógeno líquido subirán de manera más lenta que aquellos de temperatura y presión estándar. La velocidad de elevación del hidrógeno en condiciones normales en aire, está entre 1.2 y 9 m/s.

Llama incolora

La llama hidrógeno-aire-oxígeno es incolora. Cualquier visibilidad de la misma es causada por impurezas. A presiones reducidas puede presentarse en un azul o

morado pálidos, en casos convenientes, se puede agregar aditivos colorantes para poder detectar la llama.

Temperatura de la llama en aire

La temperatura de la llama para un porcentaje en volumen de hidrógeno de 19.6 % es de 2,321 K.

Velocidad de combustión en aire en condiciones normales.

La velocidad de combustión en aire a condiciones normales, definida como la velocidad subsónica a la que la llama se propaga a través de una mezcla de aire combustible, es de 2.7 a 3.5 m/s. Las velocidades de combustión dependen de la presión, temperatura y composición de la mezcla. La alta velocidad de combustión del hidrógeno indica su alto potencial explosivo y la dificultad de confinar las llamas y explosiones de hidrógeno.

Energía térmica radiante de la llama

La exposición a fuegos de hidrógeno puede resultar significativamente dañina por radiación térmica. La radiación térmica depende de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. La humedad atmosférica absorbe la energía térmica radiada desde un fuego y puede reducir los valores. Este efecto es significativo en los fuegos de hidrógeno. En la *figura 6* se muestra la intensidad de la radiación desde una llama de hidrógeno a una distancia determinada que depende fuertemente de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera [29, 30].

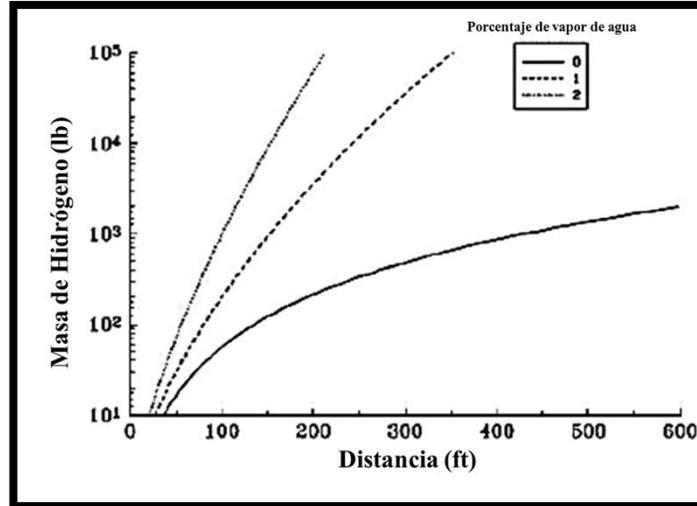


Figura 6. Variación de la distancia de la llama de hidrógeno a una exposición de radiación de $2 \text{ cal}/\text{cm}^2$, en un tiempo de exposición de 10 seg (modificado de [31]).

Coeficiente de difusión en aire para condiciones normales NTP

El coeficiente de difusión para el hidrógeno en condiciones normales de presión y temperatura es de $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Índice límite de oxígeno

El índice límite de oxígeno es la concentración mínima de oxígeno que puede mantener la propagación de una llama en una mezcla de combustible con aire y nitrógeno. Ninguna mezcla de hidrógeno con aire y nitrógeno en condiciones normales propagará una llama, si la mezcla contiene menos de un 5% en volumen de oxígeno.

Coeficiente de Joule-Thomson

El hidrógeno tiene un coeficiente negativo de Joule-Thomson. Esto significa que este gas ante una expansión isoentálpica se calienta. Aunque este calentamiento no aumenta significativamente el peligro de ignición y deflagración [31].

Capítulo II

Hidrógeno y energías renovables

El almacenamiento de la energía renovable o convencional en forma de hidrógeno es un reto actual para la sociedad, sistemas como el solar fotovoltaico y eólico, presentan el problema de la intermitencia, no siempre pueden generar energía, y cuando la generan no se tiene la demanda suficiente para ser aprovechada. Caso contrario del sistema energético actual, se tiene enormes pérdidas de energía, ya que las centrales generan superávits de energía que no son aprovechados por las ciudades e industria. Almacenar la energía de fuentes renovables o excesos de centrales muy grandes en un combustible tan versátil como el hidrógeno, para posteriormente utilizarse de manera más eficiente cuando se requiera en diversas aplicaciones, es de vital importancia para el desarrollo como humanidad. En la figura 7 se muestra un diagrama de los elementos típicos que conformaría un sistema complejo de hidrógeno implementado a un sistema energético actual [32, 33, 34].



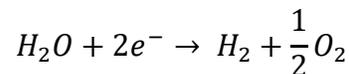
Figura 7. Sistema energético basado en hidrógeno (elaboración propia).

2.1 Tecnologías de producción del hidrógeno

El hidrógeno puede ser generado por varias fuentes de energía, desde combustibles fósiles como el gas natural o el carbón, o fuentes de energía renovables como la solar, eólica, biomasa, geotermia o nuclear, por mencionar algunos. Hay una suficiente variedad de procesos tecnológicos que son utilizados en la producción de hidrógeno estos pueden ser químicos, biológicos, electrolíticos, fotolíticos o termoquímicos. Cada tecnología tiene un grado de desarrollo e investigación diferente, y cada una ofrece diferentes oportunidades y beneficios a futuro. Específicamente, la disponibilidad y diversidad local de las fuentes energéticas, la maduración tecnológica, costos económicos, la aplicación y demanda del mercado, sería decisivo en la elección de las diferentes opciones para producir hidrógeno [35]. A continuación se presenta de manera general los diferentes métodos de producción de hidrógeno que aprovechan las energías renovables:

2.1.1 Electrólisis del agua

La electrólisis del agua es el proceso más común, el cual la molécula de agua se descompone en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, a través de la aplicación de una corriente eléctrica que proporciona una fuente de energía, esta reacción general se representa por:



La corriente eléctrica que se requiere, disminuye gradualmente cuando la temperatura del agua se incrementa gradualmente, esto es posible cuando se dispone de una cantidad alta de calor que proceda preferentemente del rechazo de otro proceso [36]. La descomposición de la molécula de agua por medio de electrolisis, puede ser a través de los siguientes métodos:

Electrolisis alcalina:

Este tipo de electrólisis utiliza una disolución alcalina de KOH como un electrolito que circula a través de una celda electrolítica, en la figura 8 se muestra este dispositivo cuyo propósito es descomponer un sustancia ionizada u electrolito por medio de la inducción de una corriente eléctrica. Se suelen operar a una presión alrededor de los 25 bares y son utilizados en diversas aplicaciones industriales [36, 37], la siguiente reacción se lleva a cabo en la celda electrolítica:

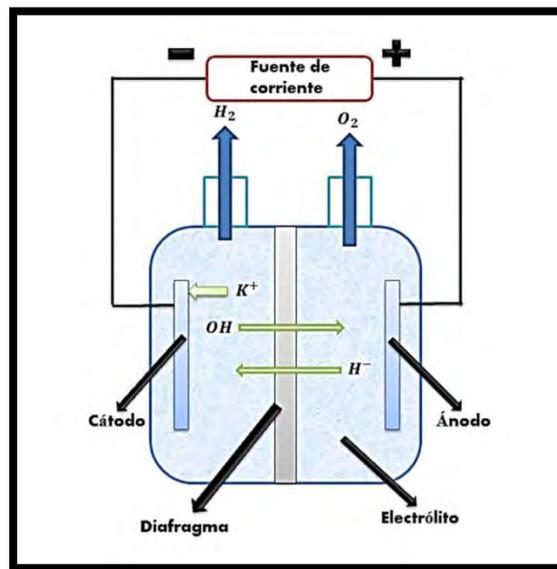
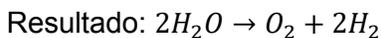
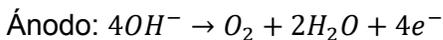
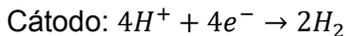
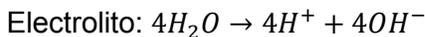


Figura 8. Electrolisis alcalina en una celda electrolítica (elaboración propia).

Electrólisis por membrana de intercambio protónico (PEM)

Esta electrólisis se lleva a cabo en electrolizadores con celdas de membrana de intercambio protónico o PEM, por sus siglas en inglés. La tendencia apunta a que este método de producción es el más óptimo para implementarse en el sistema energético actual ya que los electrolizadores tipo PEM son sistemas versátiles, de tamaño y peso reducido, que no sacrifican potencia de producción de hidrógeno, pueden llegar a ser escalables y por su sistema de control los hace bastante seguros y fáciles de utilizar

[37]. En la figura 9 se muestra una celda típica que se encuentra en el interior de un electrolizador tipo PEM y su reacción general es la siguiente:

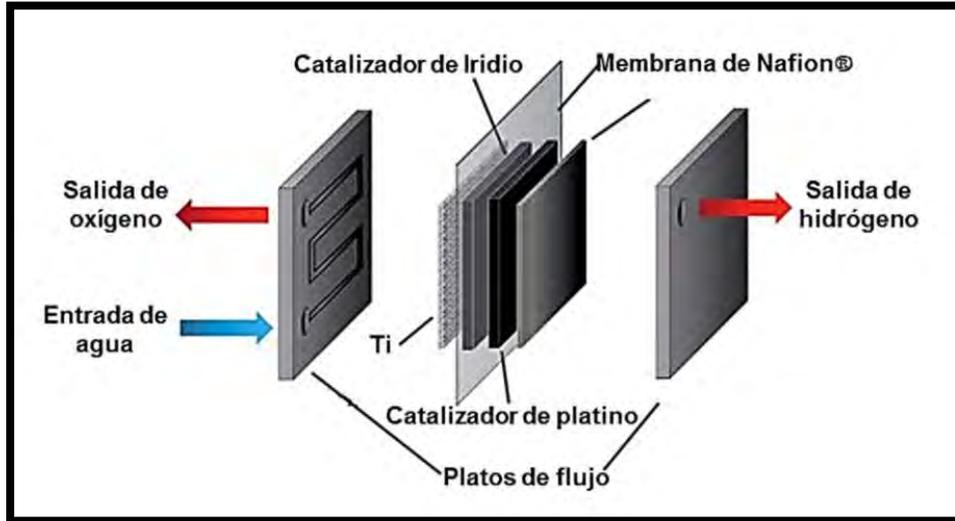
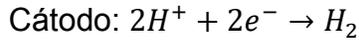
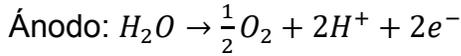


Figura 9. Componentes de una celda típica de un electrolizador tipo PEM (modificado de [38]).

Electrólisis a altas temperaturas

Esta tecnología está basada en celdas de combustible parecidas a las anteriores pero adaptadas a trabajar con altas temperaturas. En la figura 10 se muestra el hecho de que la corriente necesaria para descomponer al agua a 1000 °C es menor que la necesaria a los 100 °C. Esto hace que los electrolizadores a mayores temperaturas pueden operar más eficientemente que los electrolizadores típicos, ya que las reacciones en los electrodos son más reversibles y hace que la celda de combustible sea más propensa a la reacción de electrólisis [39].

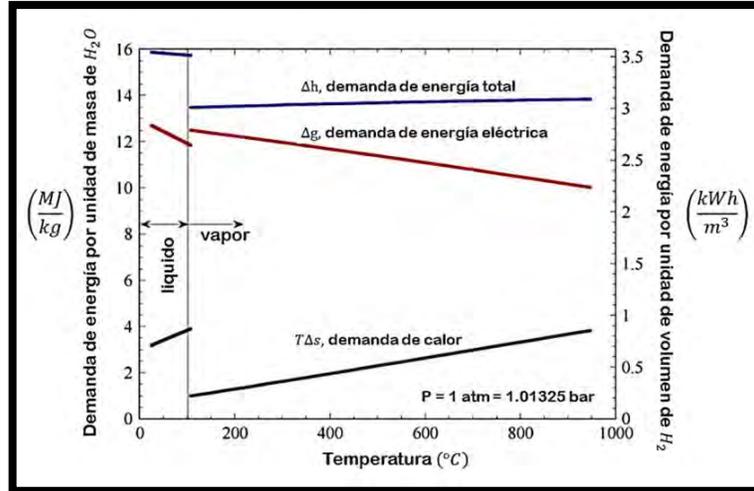


Figura 10. Energía requerida para la electrolisis con respecto a la temperatura (modificado de [40]).

Fotoelectrólisis

Esta tecnología utiliza la luz directa del sol para generar la electrolisis, figura 11. Se convierte un fragmento del espectro de luz a corriente eléctrica y luego esta es utilizada en la descomposición de H_2O o H_2S , por mencionar algunos, para posteriormente extraer el hidrógeno. Las celdas fotoelectroquímicas son usadas para producir varias reacciones fotoeléctricas, esta celda se compone de un dispositivo semiconductor que absorbe la energía solar y genera el voltaje necesario para mover los electrones y formar una corriente eléctrica que descomponga la molécula de agua [41].

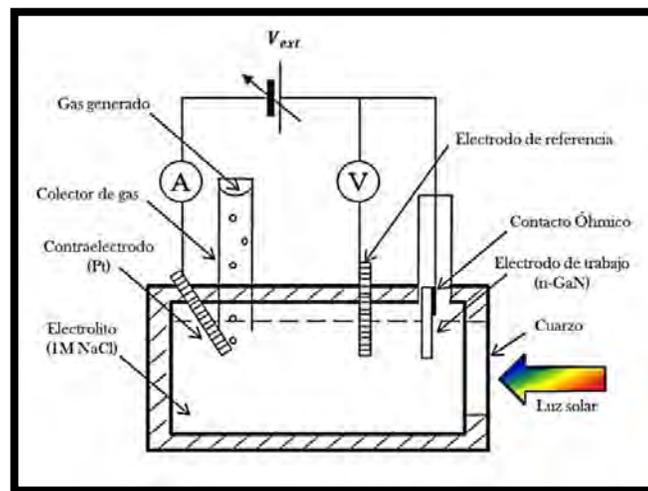


Figura 11. Esquema de celda fotoeléctrica con electrodo de n-GaN (modificado de [42]).

Producción fotobiológica

Esta tecnología de reciente investigación se centra en la producción de hidrógeno, basada en dos etapas principales: la fotosíntesis y la producción catalizada de hidrógeno a través de hidrogenasas, como las algas verdes. En el proceso de fotosíntesis de cierto tipo de algas marinas se libera hidrógeno en el proceso. Para incrementar la producción de hidrógeno se utilizan diversos catalizadores y se requiere mantener a las algas en condiciones de mucho control para no descomponerse [43]. En la figura 12 se muestra un esquema del funcionamiento de este tipo de tecnología y a continuación se presenta la reacción general que se lleva a cabo en el sistema.

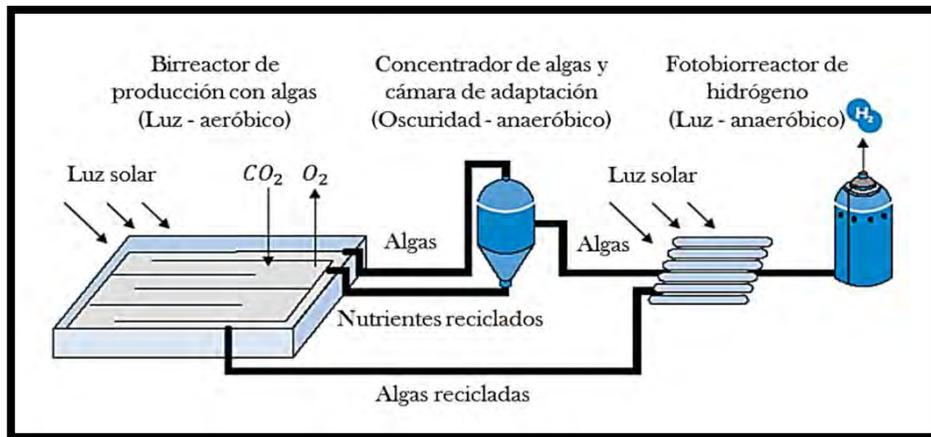
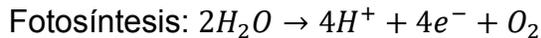


Figura 12. Esquema de producción fotobiológica de hidrógeno (modificado de [44]).

Descomposición a alta temperatura

La descomposición de la molécula del agua se produce a una alta temperatura, cercano a los 3000 °C. A esta elevada temperatura, un 10% del agua se descompone mientras que el 90% restante se recicla, actualmente se analiza la posibilidad de alcanzar estas temperatura con fuentes termonucleares o geotérmicas [45].

2.2 Tecnologías de almacenamiento del hidrógeno

Un desarrollo seguro, fiable, compacto y rentable son algunas de las problemáticas actuales para el almacenamiento del hidrógeno. Las características implícitas del

hidrógeno dificultan almacenar grandes cantidades sin ocupar un espacio significativo. A continuación se presenta de manera general los diferentes métodos de almacenamiento de hidrógeno:

2.2.1 Almacenamiento como gas comprimido

Al comprimir el hidrógeno, este reduce su volumen de acuerdo al recipiente contenedor, de este modo es posible almacenar una mayor cantidad de energía por unidad de volumen. No obstante, la seguridad, tamaño y peso de los tanques a altas presiones son elementos que dificultan su movilidad y aplicación en dispositivos de menor tamaño, en la figura 13 se muestra un ejemplo de aplicación. El hidrógeno puede ser comprimido con cualquier tipo de compresor mecánico estándar, pero la energía requerida para comprimirse se ve incrementada debido a que la temperatura del gas no es isotérmica, en la carga, esta se incrementa y las moléculas de gas se expanden, aumentando el trabajo del compresor.

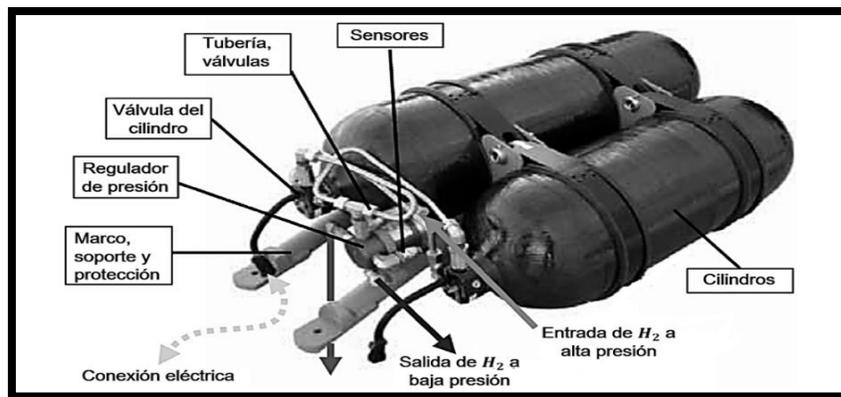


Figura. 13. Tanque de hidrógeno comprimido para vehículos (modificado de [46]).

2.2.2 Almacenamiento criogénico

El hidrógeno en estado líquido se almacena en tanques criogénicos a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura a presión ambiente. El ciclo termodinámico bajo el que opera este sistema, es el de Joule-Thompson, donde el gas es primeramente comprimido y

después de enfriar con un intercambiador de calor, antes de pasar por una válvula de estrangulación, donde se expande de manera isoentálpica, cambiando de estado a hidrógeno líquido, el gas que queda de residuo circula de nuevo a través del sistema. Debido a la temperatura crítica, solo puede ser almacenado en sistemas de almacenaje abiertos, ya que la presión en un sistema cerrado a una temperatura ambiente, pudiera alcanzar una presión de 10,000 bar. El hidrógeno líquido tiene mayor densidad y por lo tanto más energía por volumen, pudiéndose almacenar más energía que como gas comprimido. La problemática de este tipo de almacenamiento es que se requiere mucha energía para licuar el hidrógeno, cerca de 15.2 kWh/kg , y costo y peso de los tanques se ve incrementado por el aislamiento térmico que requieren, en la figura 14 se muestra un ejemplo de este tanque. Recientes investigaciones se enfocan a un tipo de tanque híbrido que puede almacenar el gas a condiciones criogénicas de -120 °C a -196 °C de temperatura y a altas presiones, haciéndolos más ligeros y más compactos [47].



Figura 14. Tanque de hidrógeno licuefactado como combustible de cohete [48].

2.2.3 Almacenamiento con hidruros metálicos

Los átomos de hidrógeno o moléculas unidas se comportan bien con otro tipo de compuestos o materiales de potencial almacenamiento. Esto hace posible almacenar mayores cantidades de hidrógeno en volúmenes más pequeños en condiciones ya

conocidas en la práctica. Recientemente para almacenar hidrógeno se investiga diferentes tipos de materiales adsorbentes, hidruros químicos e hidruros metálicos, este último con mejores resultados. La tecnología de hidruros de metal ha tenido mucho avance, dentro de los últimos 10 años, principalmente por el desarrollo y la comercialización de baterías de níquel/hidruros metálicos. A continuación se detallan características generales de los hidruros metálicos y otros tipos de almacenamiento: Para almacenar hidrógeno el tipo ideal de hidruros son los de metal-aleación, que de forma reversible puede adsorber y libera el hidrógeno. Algunos metales son más propensos a reaccionar con el hidrógeno y adsorberlo, como las mezclas de titanio, lantano, zirconio, cromo, por mencionar algunos, estos se combinan con metales cuya característica es no adsorber el hidrógeno para formar una aleación como el hierro, níquel, manganeso o el cobalto. La problemática de aleaciones como $Fe - Ti$ y $La - Ni$, que presentan buenos resultados, es su elevado costo. Para esto, en la práctica se utiliza en los tanques una mezcla de metales llamados “Mischmetal”, los cuales utilizan mezclas de cerio, lantano, neodimio, praseodimio, por mencionar algunos, para mantener un equilibrio de costo de fabricación, vida útil de carga y descarga, velocidad de adsorción y desorción, y la capacidad de almacenar hidrógeno [49, 50]. En general los hidruros se pueden clasificar en dos tipos:

- ⊙ Alta temperatura: El hidruro es de bajo peso molecular y el hidrógeno se une con enlaces iónicos.
- ⊙ Baja temperatura: El hidruro es de alto peso molecular y el hidrógeno se une con enlaces covalentes.

Adsorción

El fenómeno de adsorción es el proceso por el cual los átomos o moléculas del hidrógeno u otra sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidos en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida, ya sea como moléculas diatómicas (H_2) o como átomos de hidrógeno (H). En el tanque de hidruros metálicos, se induce gradualmente una presión para inyectar al interior el hidrógeno y este pueda ser adsorbido por los metales en su

interior como se muestran en la figura 15 y las moléculas se acomodan en los espacios libres del metal [51, 52].

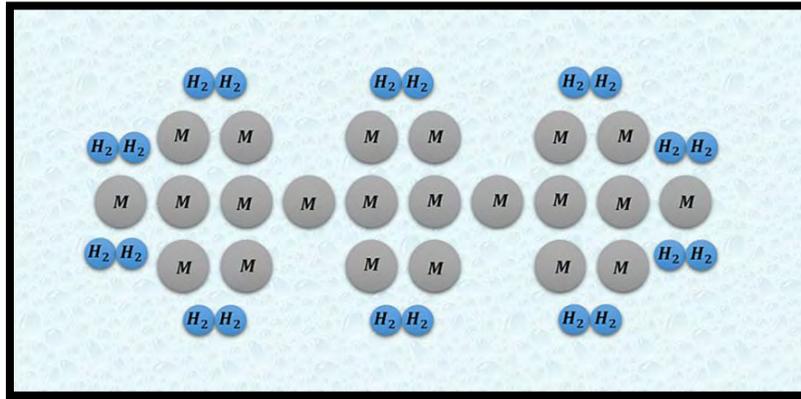


Figura 15. Superficie de adsorción (elaboración propia).

Absorción

El fenómeno de absorción es el proceso por el cual las moléculas de hidrógeno se ven disociadas en átomos de hidrógeno que se incorporan internamente en el mallado sólido de otro elemento como se muestran en la figura 16, este método puede hacer que sea posible almacenar mayor cantidad de hidrógeno en volúmenes más pequeños a una presión menor y a una temperatura cercana a la ambiental, mejorando la capacidad de los tanques de almacenamiento. Recientes investigaciones utilizan paladio, platino y etileno con base de titanio, por mencionar algunos, para mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas y comprobar las estructuras que se forman en las distintas fases de formación de los hidruros metálicos y su relación con la electropositividad de los metales [52].

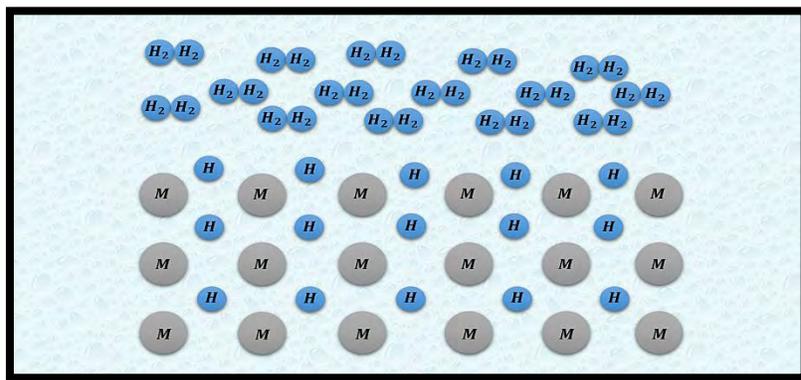


Figura 16. Formación de hidruro intermetálico por absorción interatómica (elaboración propia).

Nuevos materiales

La investigación de almacenar la mayor cantidad de hidrógeno en el menor espacio posible, lleva al enfoque de dos tipos distintos de hidruros: los hidruros complejos y los hidruros químicos. En la figura 17 se muestra la interacción para la formación de un hidruro complejo (A) y un hidruro químico (B). Los hidruros complejos se forman a partir de que el hidrógeno se deriva de sistemas moleculares, formando varios enlaces complejos de conexión a través de la transición de dos o más fases termodinámicas, el borohidruro de litio ($LiBH_4$), borohidruro de aluminio ($Al(BH_4)_3$), por mencionar algunos, presentan buenos resultados de investigación. Los hidruros químicos se forman a partir del proceso de ligar fuertemente al hidrógeno con estructuras moleculares de compuestos químicos que ya contengan hidrógeno [52, 53] .

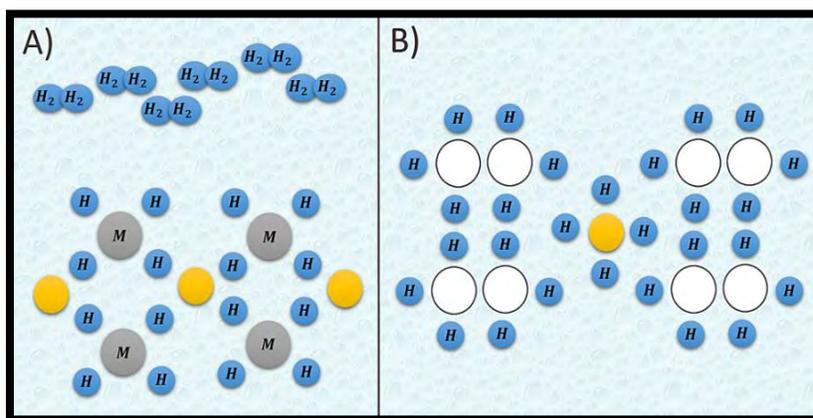


Figura 17. Interacción de hidruro complejo (A) e Hidruro químico (B) (elaboración propia).

2.3 Tecnologías de celdas de combustible de hidrógeno

La celda de combustible o *fuel cell* (FC) por sus siglas en inglés, son dispositivos electroquímicos que convierten la energía contenida de un combustible, en una energía eléctrica de CD. Las celdas de combustible generalmente utilizan hidrógeno y oxígeno para generar una corriente eléctrica.

La celda de combustible opera similar a una batería común, produce electricidad a partir de la energía química almacenada. Las celdas utilizan hidrógeno como combustible y oxígeno como oxidante, este último puede ser obtenido del aire

circundante. Diferentes celdas pueden utilizar otro tipo de combustible rico en hidrógeno, como lo es el metano, gas natural, etanol o gasolina, por mencionar algunos. Estos dispositivos básicamente funcionan por la oxidación del hidrógeno, generando energía eléctrica, agua y calor en el proceso [54]. El uso de diversos materiales para su fabricación y su manera de oxidar el hidrógeno, diferencian un tipo de celda de otra, como se hablara a continuación, pero toda celda de combustible está compuesta por un cátodo, un ánodo y un electrólito, como se muestra en la figura 18.

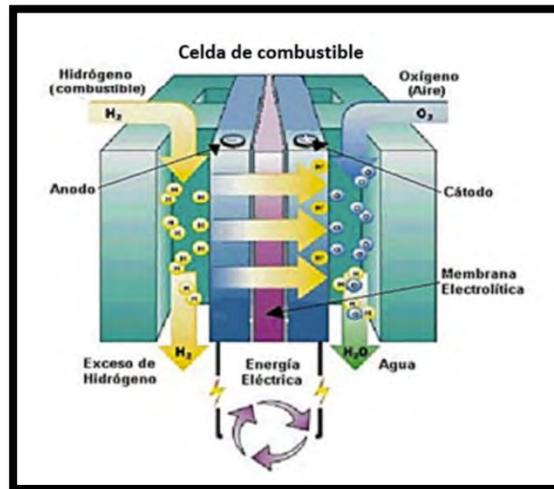


Figura 18. Esquema básico de una celda de combustible (modificado de [55]).

2.3.1 Membrana de intercambio protónico

Las celdas de combustible con membrana de intercambio protónico o *Proton Exchange Membrana Fuel Cell* (PEMFC), por sus siglas en ingles. Están constituidas principalmente por una membrana de intercambio protónico en su interior, esta se encuentra ensamblada entre dos electrodos porosos de base carbón y utiliza platino como catalizador. Este tipo de celdas por ser compactas y ligeras, son las más comunes y con mayor potencial para su explotación comercial. Cuentan con una densidad de potencia eléctrica alta, el cual puede ser adaptado y controlado a la demanda requerida, satisfaciendo instantáneamente una alta demanda inicial como lo requiere un vehículo, figura 19. Debido a su baja temperatura de operación, este tipo

de celdas PEM operan con hidrógeno puro como combustible y actualmente cuentan con un 50% de eficiencia [56].



Figura 19. Celda de combustible tipo PEM para vehículo eléctrico [57].

2.3.2 Alcalinas

Las celdas de combustible alcalinas o *Alkaline Fuel Cell* (AFC), por sus siglas en inglés. Utilizan hidróxido de potasio como electrólito, este se encuentra confinado entre dos electrodos porosos de base carbón y platino como catalizador. Como combustible utilizan hidrógeno y oxígeno, este tipo de celdas llegan hasta eficiencias del 70%. No obstante, las celdas necesitan ingresar oxígeno de alta calidad, teniendo que aplicarse dispositivos que extraigan los contaminantes a la entrada de las celdas, incrementando su tamaño, peso y costo [58]. En la figura 20, se muestra este tipo de celdas en aplicaciones espaciales.

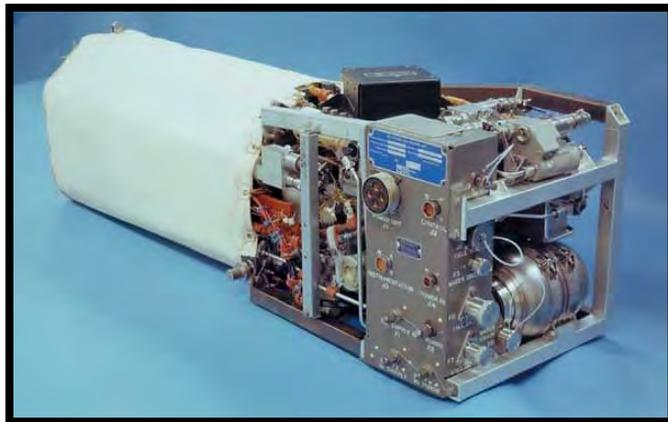


Figura 20. Celda de combustible alcalina para lanzamientos espaciales de la NASA [59].

2.3.3 Ácido fosfórico

Las celdas de combustible de ácido fosfórico o *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), por sus siglas en inglés. Utilizan ácido fosfórico como electrolito, este se encuentra confinado entre electrodos porosos de base carbón y materiales preciosos como catalizador. Este tipo de celda con mayor desarrollo comercial, generan energía eléctrica con un 37% de eficiencia, si el vapor que produce se emplea para cogeneración puede alcanzar los 87% de eficiencia (figura 21), por eso pueden ser utilizadas en vehículos de mayor tamaño, como son los camiones o trenes [60].



Figura 21. Planta de celdas de combustible tipo PAFC de 200kW [61].

2.3.4 Carbonato fundido

Las celdas de combustible de carbonato fundido o *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), por sus siglas en inglés. Utilizan carbonato fundido como electrolito, este se encuentra confinado por electrodos porosos de níquel. Este tipo de celdas prometen altas eficiencias de conversión energética debido a que generan gran cantidad de corriente eléctrica y el calor que liberan en el proceso puede ser aprovechado, aumentando su rentabilidad, igualmente cuentan con el potencial de consumir combustibles a base de carbón, como metanol o gas natural (figura 22). No obstante, estas celdas por ser de alta potencia, son de tamaño y peso elevado [62].



Figura 22. Planta de celdas de combustible tipo MCFC de 600 kW [63].

2.3.5 Óxido sólido

Las celdas de combustible de óxido sólido o *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC), por sus siglas en ingles. Utilizan un cerámico sólido no conductor de iones negativos como electrolito, este se encuentra confinado por electrodos cerámicos. Este tipo de celdas pueden operar a temperaturas elevadas de 800 – 1000 °C, mejorando la vida útil del sistema por la corrosión asociada a las altas temperaturas de operación y así poder reformar cualquier combustible rico en hidrógeno. Estos elementos pueden fomentar el desarrollo de nuevos sistemas de cogeneración de energía eléctrica que utilicen turbinas de vapor o gas, con eficiencias más altas de los sistemas actuales y en aplicaciones de alta potencia como industrias o grandes centrales de generación [64].



Figura 23. Planta de celdas de combustible tipo SOFC de 100 kW de la NASA [65].

2.3.6 Celdas de combustible miniaturizadas

Actualmente se investigan y desarrollan celdas de combustible PEM miniaturizadas, que ofrezcan alta densidad de potencia con una reducción de costo, peso y volumen. Por su sencillez y características, este tipo de celdas son ideales en la aplicación de dispositivos eléctricos y electrónicos portátiles como celulares, computadoras o drones [66, 67]. En la figura 24 se muestra el prototipo de una celda de combustible tipo PEM miniaturizada de 1.8 cm^2 .



Figura 24. Celda de combustible miniaturizada desarrollada por la Universidad de Quintana Roo [68].

2.4 Sistemas híbridos de energía renovable e hidrógeno

Los sistemas híbridos de energía renovable e hidrógeno, se diseñan para la generación de energía eléctrica y su almacenamiento en forma de hidrógeno. Generalmente estos sistemas son independientes de cualquier red eléctrica local y son utilizados para zonas difíciles de acceso y con escasas energéticas. Este tipo de sistemas híbridos interconectan elementos como módulos fotovoltaicos o turbinas eólicas, con tecnologías del hidrógeno como electrolizadores y tanques de almacenamiento. Usualmente, dos fuentes de energía renovable alimentan un electrolizador, pero eso se condiciona por los recursos energéticos que se cuenten en el área, permitiendo utilizarse otro tipo de fuentes como la energía proveniente de fuentes hidráulicas, geotérmicas o incluso nucleares para hacer un sistema de mayor

tamaño y potencia, o almacenar y aprovechar los superávits de energía producidos en grandes centrales eléctricas [69].

El funcionamiento de un sistema híbrido se basa en la generación energética de cada fuente, su intermitencia de generación se cubre por la constante generación y almacenaje de hidrógeno. De esta forma, se evita el problema de la intermitencia de generación de energía con módulos fotovoltaicos en la transición del día y la noche, o la inestabilidad de generación de los generadores eólicos por las erráticas rachas de velocidad de viento. De acuerdo al recurso eólico o fotovoltaico con el que se cuente, se puede optar por el dimensionamiento de una fuente o la conexión de ambas. La energía en corriente directa (CD) proveniente de estas fuentes, se acondiciona y puede ser convertida con inversores a corriente alterna (CA), para alimentar directamente los electrolizadores y estos generen el hidrógeno para almacenarse en tanque de almacenamiento, o mantenerse en CD y proporcionar directamente la energía a las celdas para producir hidrógeno. En cualquiera de los casos, el hidrógeno almacenado puede transportarse de manera más fácil y/o aprovecharse, convirtiéndolo de nuevo a energía eléctrica a través de celdas de combustible. A continuación se detalla los sistemas de energía híbridos con fuente de energía fotovoltaica y energía eólica [69, 70].

2.4.1 Sistema híbrido fotovoltaico – hidrógeno

Un sistema híbrido de energía fotovoltaica e hidrógeno, es un sistema completamente limpio en la producción energética, el cual puede proporcionar toda la energía necesaria para alimentar casas, comunidades o industria. La energía proporcionada está condicionada a la cantidad de potencia instalada con módulos fotovoltaicos, al recurso solar, tamaño de los inversores, del electrolizador y la capacidad de almacenaje en los tanques. El mayor obstáculo para la utilización de la energía solar son los costos iniciales del sistema, especialmente los módulos fotovoltaicos. Existe la necesidad de minimizar los costos, reducir los espacios utilizados y finalmente aumentar la eficiencia. El proceso consiste en lo siguiente, la energía llega a los

módulos fotovoltaicos por medio de la radiación solar, mediante celdas fotovoltaicas internas en los módulos, el espectro de luz visible es convertido en electrones, que a su vez son movidos por el potencial proporcionado por el arreglo de semiconductores de las celdas, creando una corriente eléctrica directa (CD). La corriente eléctrica generada y la tensión se incrementan convenientemente por el arreglo en serie o paralelo del número de celdas fotovoltaicas y por la cantidad de módulos fotovoltaicos. Una vez obtenida la corriente y tensión eléctrica necesaria, se dirige a un inversor de onda completa, cuyo trabajo es controlar, modular y convertir la corriente de CD a CA e incrementar o disminuir la tensión según se requiera. Posteriormente esta energía es dirigida a un electrolizador, el cual la convierte en CD, para aprovecharla en el sistema electrónico de control de procesos y en las celdas internas para producir hidrógeno. Para finalizar, el hidrógeno producido se almacena en tanques, para su posterior transporte y aprovechamiento en celdas de combustible. En la figura 25 se muestra un diagrama general de la integración y funcionamiento de elementos que conforman un sistema híbrido de energía fotovoltaica e hidrógeno, desde su fuente de generación hasta su almacenamiento y posterior aprovechamiento en cargas eléctricas de CD y CA [71, 72].

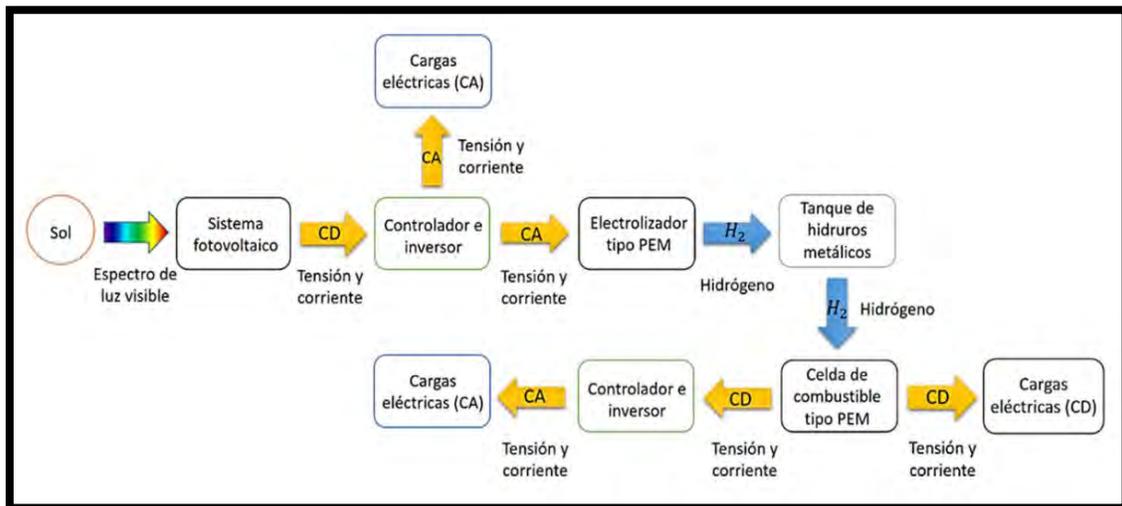


Figura 25. Diagrama general de un sistema híbrido solar fotovoltaico-hidrógeno (elaboración propia).

Actualmente las aplicaciones teóricas de estos sistemas se están trabajando, por

ejemplo en Quintana Roo, donde se planteó la necesidad de utilizar este tipo de sistema híbrido como una alternativa de suministro energético para redes de comunicación portátiles en caso de un desastre natural. En el trabajo realizado, se analizó la aplicación hipotética de un sistema de comunicación de emergencia, bajo el escenario resultante de los efectos provocados por un huracán. Este tipo de sistema, además de considerar ser compacto, seguro, de fácil maniobra y de bajo costo de operación, reduce al mínimo la energía requerida en su operación para su ideal abastecimiento con un sistema híbrido de energía fotovoltaica e hidrógeno de reducido tamaño, incrementando su vida útil y rendimiento, así mismo se trabaja con el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico-hidrógeno para un modelo de aeronave de larga duración operando en alta altitud para proveer o conectar redes de comunicación de forma inalámbrica [72, 73, 74, 75, 76].

2.4.2 Sistema híbrido eólico – hidrógeno

Un sistema híbrido de energía eólica e hidrógeno (figura 26), es un sistema eficiente y limpio en la producción energética, el cual puede proporcionar la energía requerida para alimentar casas, comunidades o industria. La energía proporcionada está condicionada a la cantidad de potencia instalada de aerogeneradores, al recurso eólico, tamaño de los inversores, del electrolizador y la capacidad de almacenaje en los tanques. Primeramente, la energía llega a los aerogeneradores por medio de la velocidad y flujo de viento, mediante los alabes conectados al generador asincrónico interno de la góndola de cada aerogenerador, la fuerza de arrastre y sustentación son convertidos en energía mecánica, haciendo girar un eje principal conectado a un multiplicador de velocidad y a su vez al generador de inducción. En generador induce una corriente alterna (CA) que se regula y acondiciona por un módulo interno de control, seguidamente pasa a un transformador eléctrico para incrementar convenientemente la tensión eléctrica y posteriormente la energía resultante llega al electrolizador, el cual la convierte en CD, para aprovecharla en el sistema electrónico de control de procesos y en las celdas internas para la producción hidrógeno. Para

finalizar, el hidrógeno producido es almacenado en tanques, para su posterior transporte y aprovechamiento en celdas de combustible [77, 78].

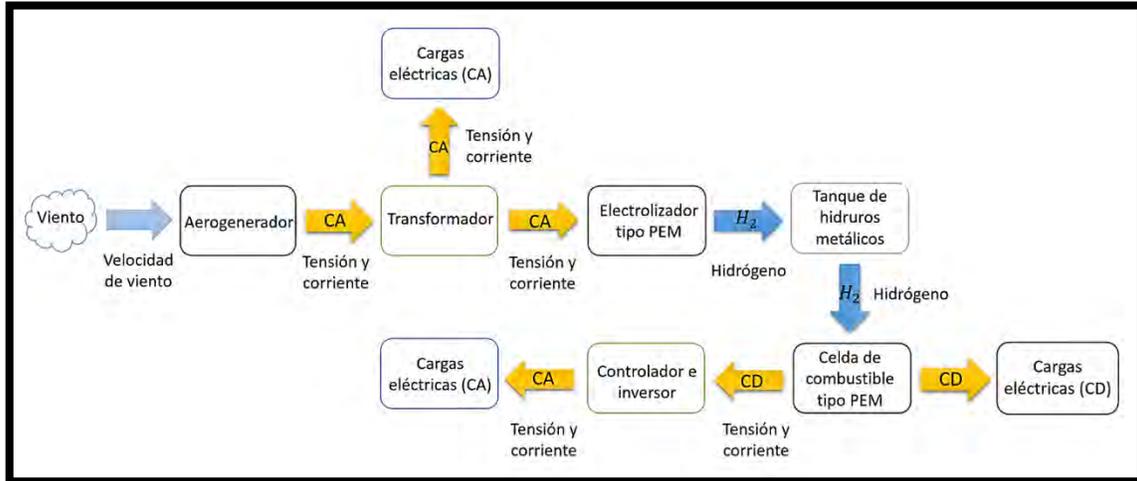


Figura 26. Diagrama general de sistema híbrido eólico-hidrógeno (elaboración propia).

Cabe mencionar, que en México diversas instituciones trabajan en conjunto como la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), la Universidad de Quintana Roo (UQRoo) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), por mencionar algunos, en la investigación sobre la optimización o de sistemas híbridos eólico-hidrógeno en aplicaciones residenciales en México y específicamente en el sureste del país. Los trabajos incluyen la implementación de modelos matemáticos y algoritmos de inteligencia artificial que puedan predecir y optimizar la generación y almacenamiento de energía y su correspondiente viabilidad tecno-económica [77, 78]. Específicamente, en el Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México, antes CIE y el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) donde participe en un intercambio académico por 6 meses y en una estancia profesional por 2 meses respectivamente, en el primero trabajan con la implementación de un sistema solar fotovoltaico-hidrógeno-celdas de combustible, realizando diversas pruebas y simulaciones de los componentes del sistema, y en el segundo se trabaja con la simulación de nuevos modelos de celdas de combustible, y el comportamiento global implícito en ellas [79, 80, 81]

Capítulo III

Metodología de experimentación

3.1 Materiales y equipo

Materiales

- 2.5 metros de tubería flexible de material plástico PUN FESTO de 4 mm
- 5 cm de tubería inoxidable Swagelok de 4 mm
- 3 válvulas de bola QH-QS-4 FESTO (conexión rápida para tubo de 4mm)
- 5 férulas y 5 nueces para tubería de 4 mm de acero inoxidable Swagelok
- 2 férulas y 2 nueces para tubería de 2 mm de acero inoxidable Swagelok
- 1 manguito macho hexagonal para conexión 2 mm a 4 mm inox. Swagelok
- 1 conector Tee macho roscado de 4 mm Swagelok
- 1 conector hembra-hembra de 6 mm a 4 mm Swagelok
- 1 conector rápido HLCQ03 para tanque de hidruros MH150-B P. Industries
- 1 cable Ethernet National Instruments
- Tanque de agua cuatridestilada

Equipo

- Generador de hidrógeno Hydro50L Lemman Instruments
- Adquisidor NI USB-9162 National Instruments con 4 termopares tipo k
- Tanque de hidruros metálicos MH150-B Pragma Industries
- Flujo metro MTS-A-150 ElectroChem, Inc.
- Laptop con software Labview
- Bomba de vacío
- Manómetro de Bourbon de 160 psi con conexión de 6 mm DEWIT

3.2 Instalación de sistema

El sistema de almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno está integrado principalmente por un generador de hidrógeno marca Hydro50L Lemman Instruments, dos tanques de hidruros metálicos marca MH150-B Pragma Industries, un manómetro de Bourbon marca Dewit, un interruptor termomagnético SQUARE D de 10 A como protección eléctrica y múltiples conectores de la marca Festo. En la figura 27 se muestra un esquema de la conexión entre los componentes que integran el sistema teóricamente alimentado por una fuente de energía renovable.

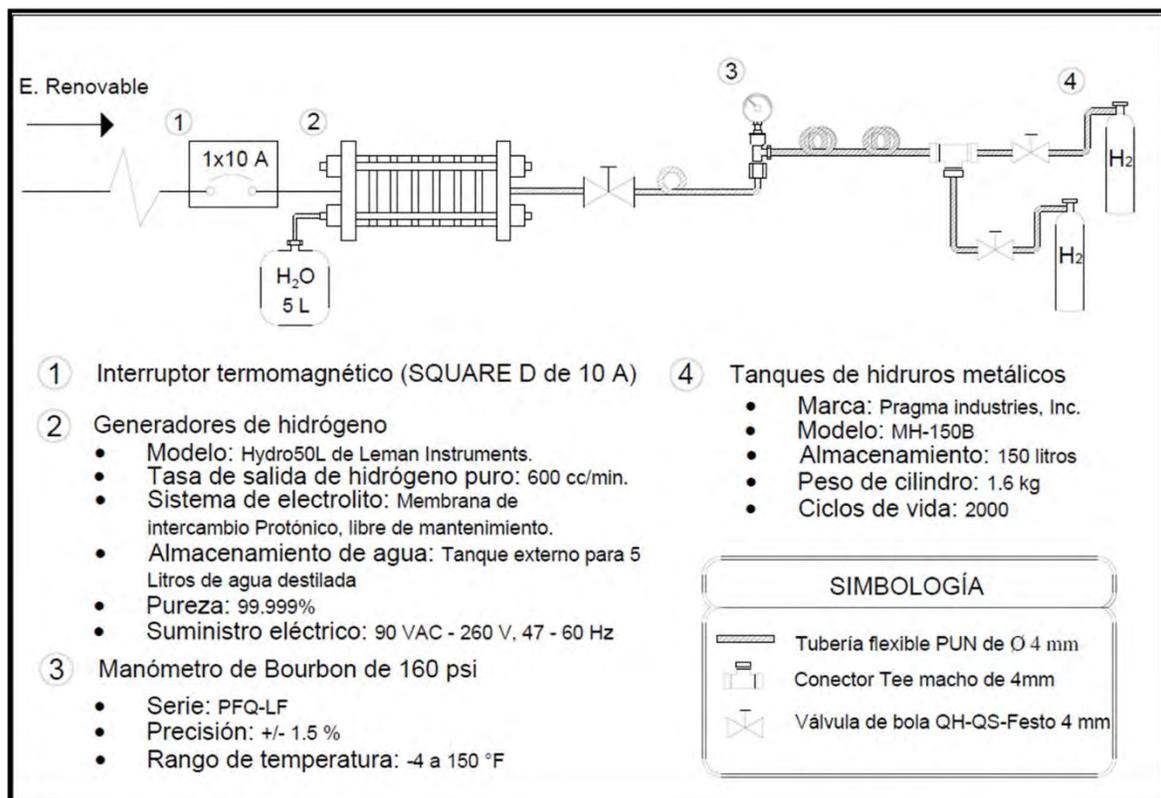


Figura 27. Sistema de almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno (Elaboración propia).

Armado de conectores para tanque de agua y tanque de hidruros metálicos

El electrolizador Hydro50L fue conectado al tanque de agua cuatridestilada por medio de 2 férulas, 2 nueces y tubería flexible de 6 mm sin ninguna llave especial, solo a presión y enroscamiento a mano.

Posteriormente se procede a la conexión entre el electrolizador y el dispositivo para el almacenamiento del hidrógeno producido. Para esto, se armó un adaptador para conexión entre diámetros de tubería de 2 mm a 4 mm con un tramo pequeño de tubería inoxidable de 5 cm, 2 férulas y 2 nueces de 2 mm. A cada lateral del tubo se insertó una férula y una nuez; primero uno de los lados se conectó a la entrada correspondiente a la salida del hidrógeno en el electrolizador. Para su sellado se utilizó cinta de teflón, enroscándose la nuez con una llave milimétrica de 12 mm hasta sentir ligera presión. Finalmente, reapretar dando 1 y un $\frac{1}{4}$ de vuelta más para su correcta instalación. Al lado restante también se le insertó el mango adaptador de 2 mm a 4 mm y se repitió el proceso con la cinta de teflón y el enroscamiento de la nuez para asegurar su conexión como se muestra en la figura 28.

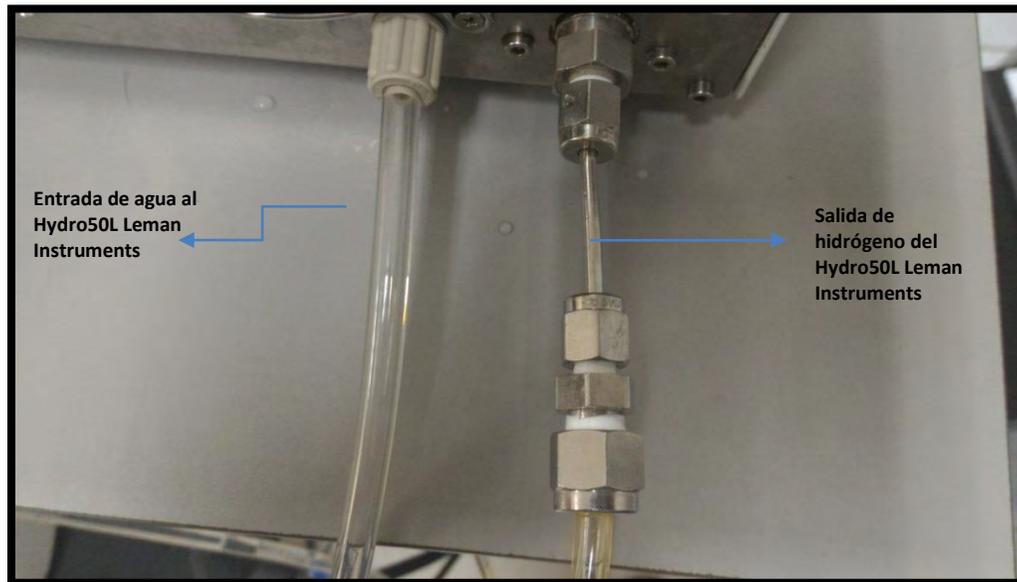


Figura 28. Conexiones del electrolizador al tanque de agua destilada e hidruros metálicos.

Conexión de tubería y manómetro de Bourbon

Una vez armado el adaptador para conexión, se continuó con el armado de las conexiones para la tubería flexible de 4 mm. Primero, se cortó un tramo de 40 cm de tubería, insertándose en uno de los extremos una férula y una nuez de 4 mm. En el adaptador ya instalado, en la sección de 4 mm (recubierta con teflón) se colocó la tubería con la nuez y la férula armada. Posteriormente, se aseguró su conexión con las vueltas correspondientes mediante una llave milimétrica. En el lado de la tubería

restante se insertó una válvula cerrada de bola de inserción rápida, empujando a presión el tubo. Finalmente, se cortó otro tramo de tubería de 40 cm y se colocó del lado opuesto de la válvula cerrada de 4 mm.

Seguidamente, a la Tee que cuenta con entradas roscadas de 4 mm se le colocó 3 vueltas de cinta de teflon en cada entrada y en el apartado de en medio se insertó el conector hembra de 4 mm a 6 mm, asegurando el sellado con la llave milimétrica adecuada. Después en la entrada del conector de 6 mm, se insertó el manómetro de Bourbon cerciorando su conexión con una llave milimétrica de 15 mm como se muestra en la figura 29.



Figura 29. Instalación y conexiones del manómetro de bourbon.

Conexión de tanque de hidruros metálicos

Se cortaron dos tramos de tubería flexible de 20 cm respectivamente y a un lateral de cada tramo se le inserto una férula y una nuez de 4 mm, posteriormente se colocó en las entradas de la Tee previamente utilizada y se enrosco con la llave milimétrica de 15 mm hasta quedar correctamente ajustadas.

Para la conexión del tanque de hidruros metálicos a la tubería flexible de 1.3 m restante, se le coloco al extremo una válvula cerrada de bola de inserción rápida.

Mientras que el otro extremo fue colocada una férula y una nuez de 4 mm, insertándose en el conector rápido HLCQ03. Se enrosco con varias vueltas hasta sentir ligera presión, seguidamente se le dio 1 y un $\frac{1}{4}$ de vuelta más, para asegurar la conexión con una llave milimétrica de 15 mm. La conexión final se muestra en la figura 30. Se prosigue a insertar el conector especial al tanque de hidruros metálicos imprimiendo presión con el conector rápido hacia la boquilla del tanque y se asegura su conexión; la tubería aun sin conexión de la Tee con el manómetro previamente armado se conectó a la válvula del electrolizador y el lado restante de la tubería se conectó a la válvula del tanque de almacenamiento, finalizando así la conexión del tanque de almacenamiento de hidrógeno al generador de hidrógeno. Finalmente, las conexiones se adaptaron convenientemente para la instalación de un segundo tanque de almacenamiento cuando fue requerido, agregando un segundo conector de tanque y una Tee.



Figura 30. Conector del tanque de hidruros metálicos.

Conexión de la tarjeta de adquisición de datos

Al adquisidor de datos NI USB-9162 se le conectaron 4 termopares tipo k en las ranuras de la parte trasera inferior del equipo, desatornillando el sistema de agarre y

asegurando con un desatornillador plano de 4 mm, colocando la punta trasera del termopar y fijándolo de nuevo hasta sentir ligera presión y un correcto amarre, se repitió este proceso para cada termopar. Seguidamente se insertó una punta del cable Ethernet al adquisidor de datos y la otra punta Ethernet a la laptop con LabView, las 4 puntas de unión de los termopares se instalaron con cinta adhesiva en el tanque de hidruros, procurando que el punto de unión este totalmente pegado a la superficie metálica del tanque y que exista una equidistancia de separación de 8 cm entre cada uno de ellos. Finalmente se conectó el electrolizador a la toma de corriente y se abrieron todas las válvulas instaladas como se muestra en la figura 31.

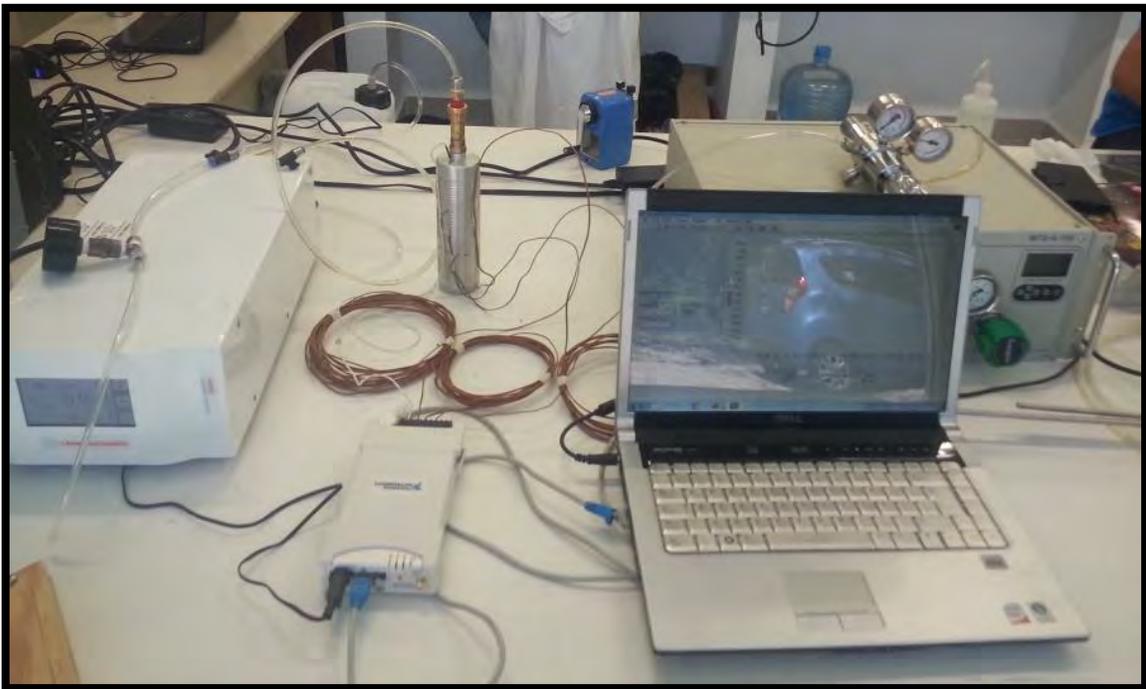


Figura 31. Sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno.

3.3 Técnicas de caracterización

3.3.1 Carga de hidrógeno

Para extraer impurezas y asegurar un mejor almacenamiento de hidrógeno en el tanque de hidruros metálicos, se cerró y se desconectó desde la válvula de bola

instalada para evitar el ingreso de contaminantes. Como se muestra en la figura 32 para inducir una extracción óptima de algún material o residuo en el interior del tanque de hidruros, se conectó a una bomba de vacío con la válvula abierta y se aplicó 15 psi de presión negativa máxima que permitió la bomba por un lapso conveniente de 30 minutos.



Figura 32. Tanque de hidruros metálicos al vacío

Una vez finalizado, para evitar el ingreso de aire e impurezas, se cerró la válvula del tanque y se desconectó de la bomba de vacío para conectarse nuevamente al electrolizador. Se prosiguió a encender el electrolizador, el adquisidor de datos y la laptop con el software LabView. Se abrieron las válvulas instaladas al sistema y se inició con una prueba de fugas en el sistema. Para verificar la inexistencia de fugas en las conexiones, se programó el electrolizador para alimentar el tanque de hidruros con una presión máxima de 9 bares. El hidrógeno se generó y almacenó en el tanque, gradual y progresivamente la presión en el tanque se incrementa hasta alcanzar la presión establecida. En el proceso de carga, se verificaron las fugas a lo largo de la instalación. Seguidamente, al finalizarse la carga de hidrógeno se cerró la válvula de salida del electrolizador y se mantuvo abierta la del tanque, se apagó el sistema y se dejó reposar por 24 horas. Posteriormente, se corroboró la presión medida en el

manómetro instalado el cual no debió disminuir significativamente de los 9 bares suministrados.

Una vez constatado la inexistencia de fugas, para retirar el hidrógeno del tanque, se desconectó y desfogó controladamente al ambiente el gas almacenado; Continuando con la experimentación, se encendieron los equipos utilizados, se verificó su correcto funcionamiento y se inició la generación de hidrógeno con un punto de control (PC) de presión de 0.5 bar. Al momento de comenzar la carga de hidrógeno, se sincronizó manualmente con el adquisidor de datos de temperatura LabView del tanque de hidruros metálicos y la grabación de datos por medio de una cámara de video enfocada a la pantalla del electrolizador, el cual con sensores internos, mide parámetros como caudal de generación de hidrógeno, temperatura y potencial, por mencionar algunos. La adquisición de datos de ambos sistemas se detuvo hasta que se visualizó en la pantalla del electrolizador una producción de hidrógeno de 0 ml/min. El video y el archivo de LabView se guardó y categorizo, este mismo proceso se repitió 3 veces, para asegurar la confiabilidad de los datos. Todo el proceso realizado se repitió para las presiones de 1.5 bar, 2.5 bar, 4.0 bar, 6.5 bar y 9.0 bar, respectivamente. Paso seguido, se realizó una medición con 2 tanques de hidruros metálicos a un PC de 9.0 bar, el segundo tanque instalado se encontraba en normales condiciones exteriores, posteriormente cuando se analizaron los datos recopilados, se encontraron variaciones irregulares en su comportamiento. Finalmente un comportamiento general fue que a una mayor PC de presión establecida, el tiempo de carga se incrementó considerablemente, por ejemplo, para una presión de 0.5 bares se obtuvo un tiempo de carga de 5 minutos y para 9 bares un tiempo de carga de 14.7 horas [82, 83, 84].

3.3.2 Descarga de hidrógeno

Para medir la descarga de hidrógeno del tanque de hidruros metálicos a la máxima capacidad de gas almacenado en los PC de 0.5 bar, 1.5 bar, 2.5 bar, 4.0 bar y 9.0 bar de presión respectivamente, se conectó a la entrada del flujometro MTS-A-150 en el apartado de combustible del equipo, mientras que a la salida del sistema se mantuvo

de manera controlada el canal abierto hacia el ambiente. El flujómetro se programó para manejar al hidrógeno como gas de trabajo y permitió medir el flujo del gas a caudal abierto. El tanque de hidruros se mantuvo conectado a los 4 termopares equidistantes del adquisidor de datos y este mismo a LabView, posteriormente se colocó una cámara de video enfocando la pantalla del flujómetro y se revisó la correcta instalación del sistema. El siguiente paso fue sincronizar manualmente la grabación de video con la apertura de la válvula del tanque. Finalmente, se detuvo la grabación hasta que la pantalla del flujómetro marcara un caudal nulo de hidrógeno y el mismo proceso se reprodujo 3 veces para corroborar los datos obtenidos, prosiguiéndose a repetir la metodología con cada una de las presiones restantes. Finalmente cada video y archivo se clasificó y almacenó. En la figura 33 se muestra el sistema de medición de descarga de hidrógeno instalado.



Figura 33. Programación y conexiones de flujómetro.

3.3.3 Concentración de datos

Para facilitar el manejo, cálculo y análisis de los datos obtenidos, los videos adquiridos se reprodujeron y visualizaron para capturar manualmente en hojas de Excel, los datos de temperatura, potencial y corriente de las celdas internas, así como el

comportamiento progresivo de la presión, generación de hidrógeno, descarga de hidrógeno, temperaturas de carga y descarga de los tanques. Primero fue cronometrado en lapsos de 10 segundos hasta alcanzar la presión establecida y después en lapsos de 1 minuto hasta alcanzar una producción nula de hidrógeno. Con el flujometro se capturó la información cada 10 segundos hasta un determinado momento en que la descarga de hidrógeno no varía significativamente, se tomaron datos en lapsos de 1 minuto respecto a la información emitida por LabView tanto en el proceso de carga como en el de descarga. Se tomó una medición de temperatura cada 10 segundos y se emitió el archivo final en formato Excel para su consiguiente concentración de datos. Una vez capturados todos los datos originales de las mediciones de todas las presiones, se unificaron de acuerdo a la experimentación correspondiente en un único documento Excel con sus respectivos datos cronometrados del electrolizador, descarga del flujometro y temperaturas de carga/descarga del adquisidor. Para finalizar, en cada una de las respectivas presiones de carga se obtuvo el dato de potencia eléctrica de las celdas multiplicando la columna de potencial y la de corriente eléctrica.

3.3.4 Obtención de resultados

Para caracterizar el comportamiento de las 2 celdas internas de 85 W tipo PEM del electrolizador y del tanque de hidruros metálicos, se obtuvieron promedios omitiendo la parte dinámica provocada por el crecimiento lineal en el trayecto en alcanzar el PC en una serie de columnas Excel, de los datos de corriente, potencial, temperatura y potencia eléctrica, así como producción y descarga del hidrógeno. Respecto a las temperaturas de carga y descarga del tanque de hidruros se obtuvo un promedio global de cada temperatura medida por cada termopar y un promedio general de cada fila unificando los 4 termopares. Paso siguiente, se graficaron los datos obtenidos comparando el comportamiento de la presión, producción de hidrógeno, corriente de la celda, potencial de la celda y potencia eléctrica con respecto al paso del tiempo, hasta finalizar la respectiva carga. Igualmente se graficó la comparación de la producción del hidrógeno, corriente, potencial, temperatura de las celdas con respecto

a la presión, producción de hidrógeno y potencial respecto a la corriente de la celda y producción respecto al potencial y potencia eléctrica.

Posteriormente se unificó cada grafica de acuerdo al parámetro medido, en comparación con cada ciclo experimental de cada PC de presión trabajada. Paso seguido se utilizó la función de Excel para determinar una o varias ecuaciones polinómicas de grado 6 dividiendo convenientemente la gráfica final para aproximar y describir su comportamiento, caracterizando el funcionamiento de las celdas internas del electrolizador. Finalmente para conocer el total de hidrógeno producido por las celdas, la energía que se requirió para generarlo y el hidrógeno que se expulsó del tanque, las gráficas de potencia eléctrica, producción y descarga de hidrógeno con respecto al tiempo, fueron tratadas con un cálculo de área bajo la curva por el método de trapecios. Todos los resultados de los cálculos y mediciones de los experimentos, se muestran en el Capítulo 4.

Capítulo IV

Resultados experimentales

4.1 Punto de control de 0.5 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión en el transcurso, se establece esta medición. En la figura 34, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforma la gráfica, donde en el eje X se representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 3 minutos, donde se requirió 1 min para alcanzar la presión de 0.5 bares, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y se dejara de ingresar hidrógeno al tanque. Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 1 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (1)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = 0.0022$, $b = -0.0346$, $c = 0.2091$, $d = -0.5729$, $e = 0.6213$, $f = 0.03466$ y $g = 0.1652$

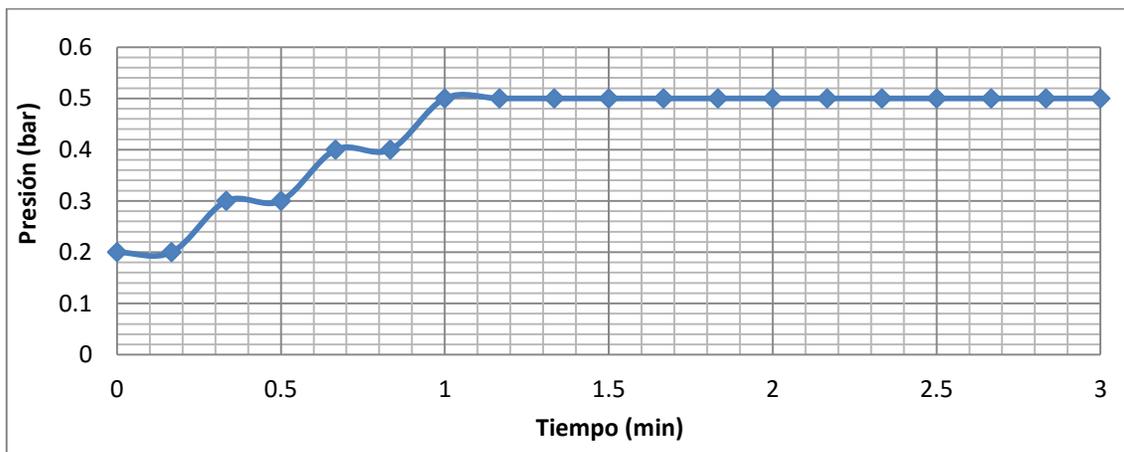


Figura 34. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad real de hidrógeno producido por el electrolizador por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 35, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la producción de hidrógeno medido en unidades de mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 3 minutos, a partir de los 50 segundos se obtuvo una producción máxima de 588 ml/min y los posteriores 2 min con 10 seg se presentó una disminución hasta alcanzar un mínimo de 0 ml/min. En total se generaron 0.27 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 0.81 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 8.65 kJ de energía. Para conocer y replicar los resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 2 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{prod}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (2)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = 22.19$, $b = -241.44$, $c = 926.58$, $d = -1340.1$, $e = 119.65$, $f = 746.15$ y $g = 303.8$

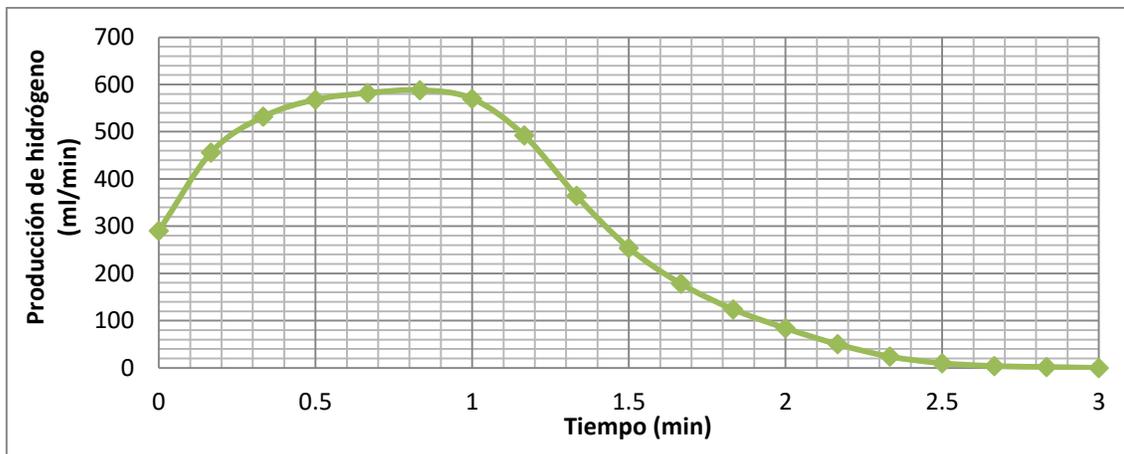


Figura 35. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas PEM de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 36, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforman

la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la corriente de celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 3 minutos donde hasta los 50 segundos se mantuvo una corriente máxima promedio en la parte estática de la curva de 39.68 A y los consecuentes 2 min con 10 seg restantes, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 3 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (3)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = 6.3917$, $b = -61.053$, $c = 216.16$, $d = -337.53$, $e = 206.68$, $f = -39.778$ y $g = 40.38$

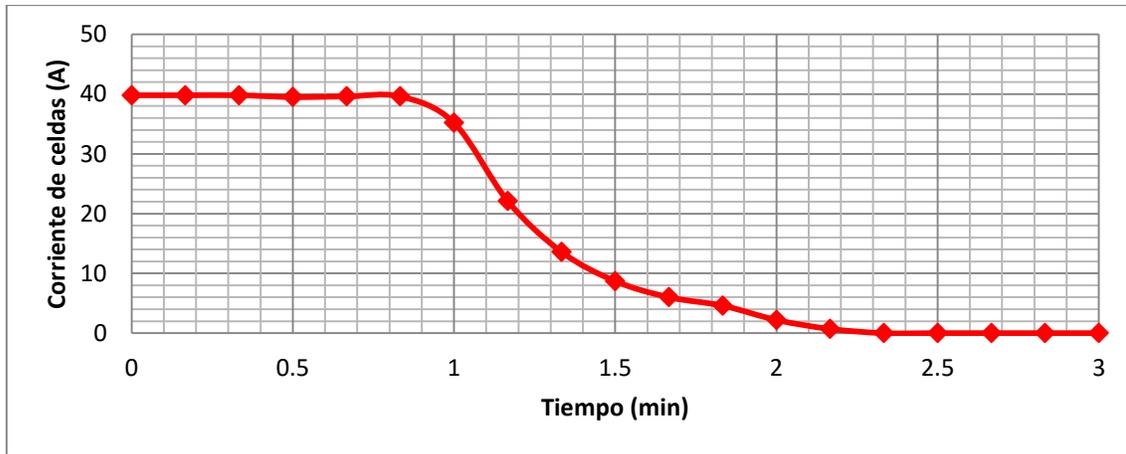


Figura 36. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 37, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 3 minutos donde hasta los 50 segundos se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V y los posteriores 2 min con 10 seg, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada

instante del tiempo, la ecuación 4 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (4)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = 0.1543$, $b = -1.4587$, $c = 5.1335$, $d = -8.0122$, $e = 4.2196$, $f = -0.9371$ y $g = 4.113$

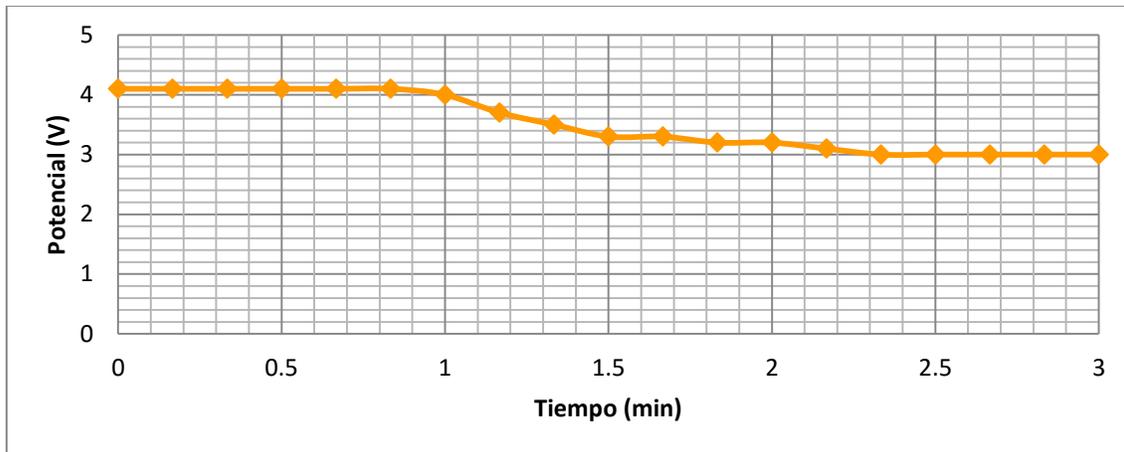


Figura 37. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs temperatura de celdas

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 38, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las mediciones tomaron 3 minutos donde hasta los 50 segundos, la temperatura de la celda descendió de una temperatura inicial de 44°C a 42°C , posteriormente en los siguientes 30 seg se registra un incremento de la temperatura de 42°C a 44°C , manteniéndose estable por 1 minuto. Finalmente los segundos restantes decae la temperatura nuevamente a 43°C , en promedio las celdas se mantuvieron a 43.42°C . Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 5 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (5)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = -0.3552$, $b = 3.6982$, $c = -14.054$, $d = 23.014$, $e = -13.863$, $f = 0.3394$ y $g = 44.045$

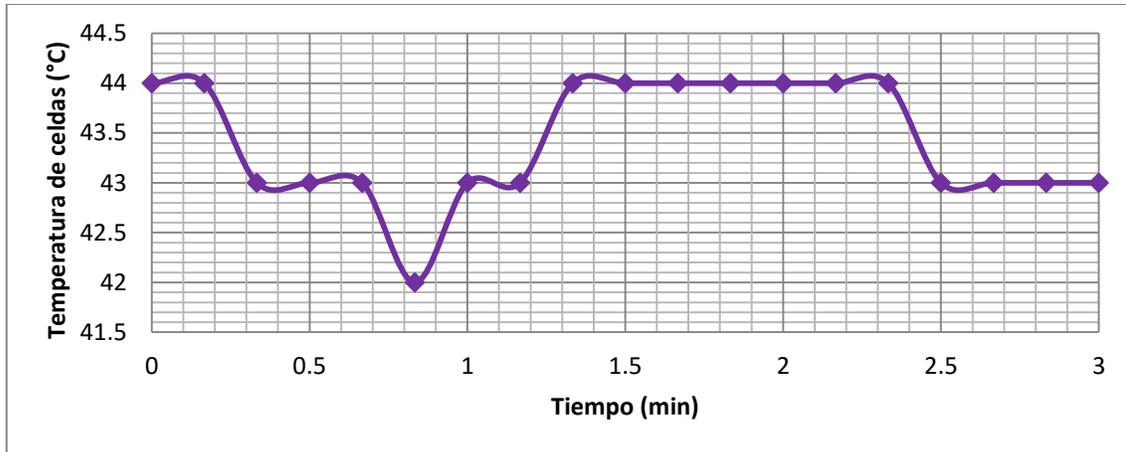


Figura 38. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que demandan las 2 celdas tipo PEM del electrolizador se establece esta medición. En la figura 39, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 19 puntos conforman la gráfica, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica de las celdas medida en Watts (W). Las mediciones tomaron 3 minutos donde hasta los 50 seg se mantuvo una potencia máxima de 163.18 W, mientras que en los siguientes 2 min con 10 seg, por la saturación de hidrógeno en el tanque de almacenamiento la potencia decae hasta un mínimo de 0 W. Finalmente por la integración de la curva, se utilizaron 12.37 kJ de energía para producir el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 6 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (6)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = 29.717$, $b = -280.65$, $c = 980.18$, $d = -1505.9$, $e = 905.04$, $f = -169.93$ y $g = 165.45$

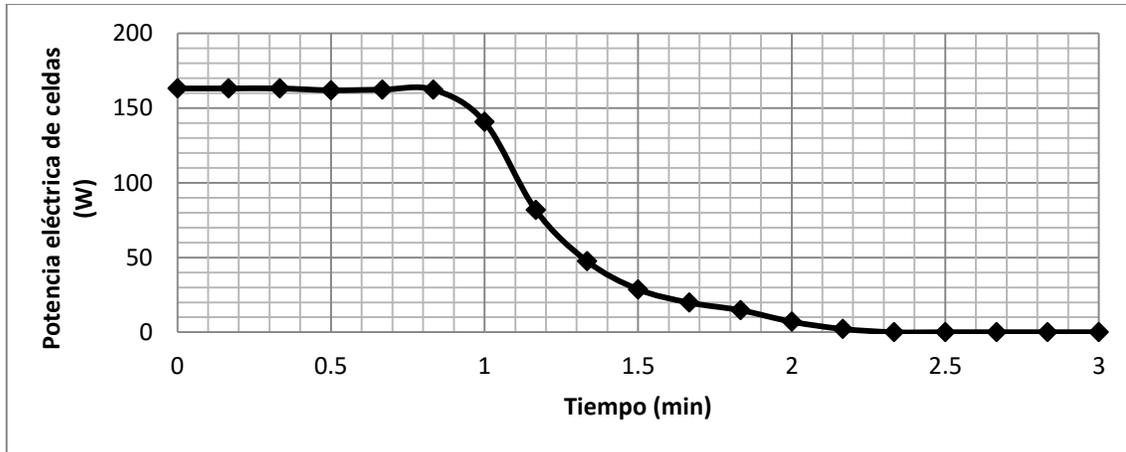


Figura 39. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs descarga de hidrógeno

Para determinar la descarga de hidrógeno por unidad de tiempo que expulsa a caudal abierto el tanque de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 40, se muestran los cambios de la descarga de hidrógeno con respecto al tiempo hasta que el flujómetro registre un caudal nulo. Un total de 20 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa la descarga de hidrógeno medido en mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 3 min con 10 seg donde los primeros 10 seg la descarga es de 270.3 ml/min, a los 20 seg se presenta un ligero decremento a 242.1 ml/min, seguidamente se incrementa a su máxima descarga de hidrógeno a los 30 seg con 291.4 ml/min y el tiempo restante la descarga disminuye hasta 0 ml/min por la caída de presión en el tanque. En total, de acuerdo a la integral de la curva, se descargaron 0.33 L de hidrógeno en tres minutos, con esto podemos generalizar una velocidad de descarga de 110 mL/min. Para conocer y replicar resultados de la descarga de hidrógeno en cualquier instante del tiempo, la ecuación 7 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de descarga de hidrógeno (\dot{Q}_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (7)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.2$: $a = -9.752$, $b = 107.85$, $c = -472.26$, $d = 1015.5$, $e = -1032.6$, $f = 261.65$ y $g = 258.97$

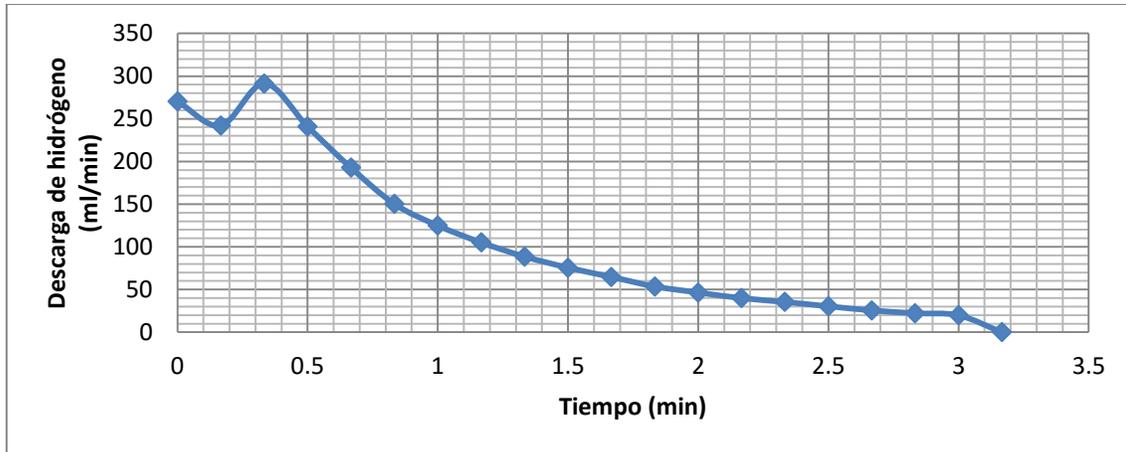


Figura 40. Comportamiento de la descarga de hidrógeno vs tiempo a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 41, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 0.5 bar. Un total de 76 puntos conforman la gráfica, cada línea de 19 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius (°C). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 23.90 °C en el termopar 1 (Tpar 1) mientras que en el termopar 2 (Tpar 2) es de 23.98 °C, en el termopar 3 (Tpar 3) es de 23.98 °C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 24.24 °C, en promedio se obtuvo una temperatura inicial de 24.03 °C y al finalizar los de 3 min de carga, se tiene una temperatura promedio de 24.73 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.24 °C/min y una ganancia máxima de 0.71 °C en el tanque. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 14 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (14)$$

Cuando $0 \leq t \leq 3.0$: $a = -0.0046$, $b = 0.0491$, $c = -0.1832$, $d = 0.241$, $e = 0.0035$, $f = 0.1496$ y $g = 24$

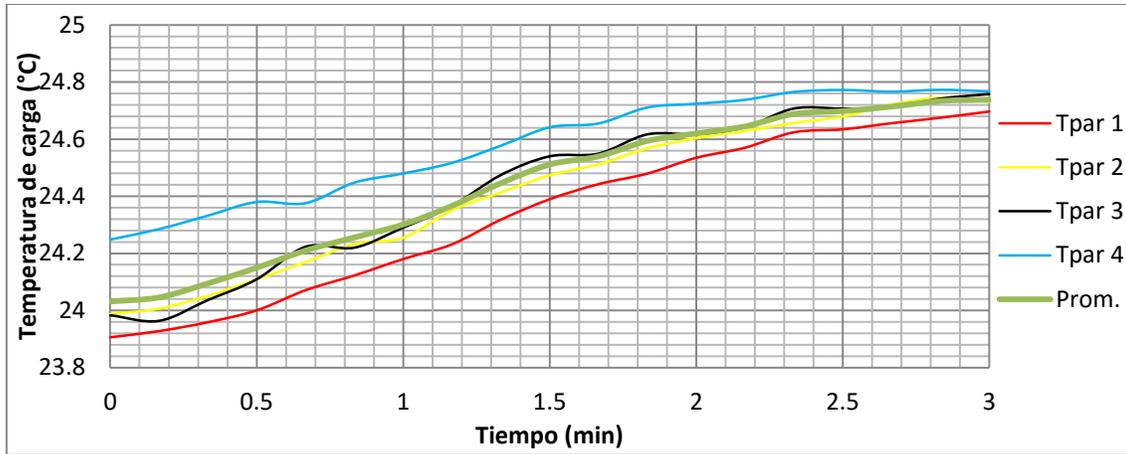


Figura 41. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 0.5 bar.

Tiempo vs temperatura de descarga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de descarga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 42, se muestra la temperatura de descarga del tanque de hidruros metálicos a la presión de 0.5 bar en los 4 puntos equidistantes ya antes mencionados con respecto al tiempo. Un total de 80 puntos conforman las gráficas, cada línea de 20 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura de descarga de hidrógeno. La menor temperatura registrada al inicio de la descarga es de 25.17 °C en el termopar 3 (Tpar 3), mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 235.39 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 25.20 °C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 25.41 °C, en promedio se obtuvo una temperatura inicial de 25.29 °C. En el transcurso de 3 min con 10 segundos de descarga, por la caída de presión en el interior del tanque, la temperatura promedio es de 24.99 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.10°C/min y un decremento máximo de 0.31 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 15 con sus contantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de descarga (T_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (15)$$

Cuando $0 \leq t \leq 95/30$: $a = -0.002$, $b = 0.0349$, $c = -0.2014$, $d = 0.5153$, $e = -0.5757$, $f = 0.0944$ y $g = 25.296$

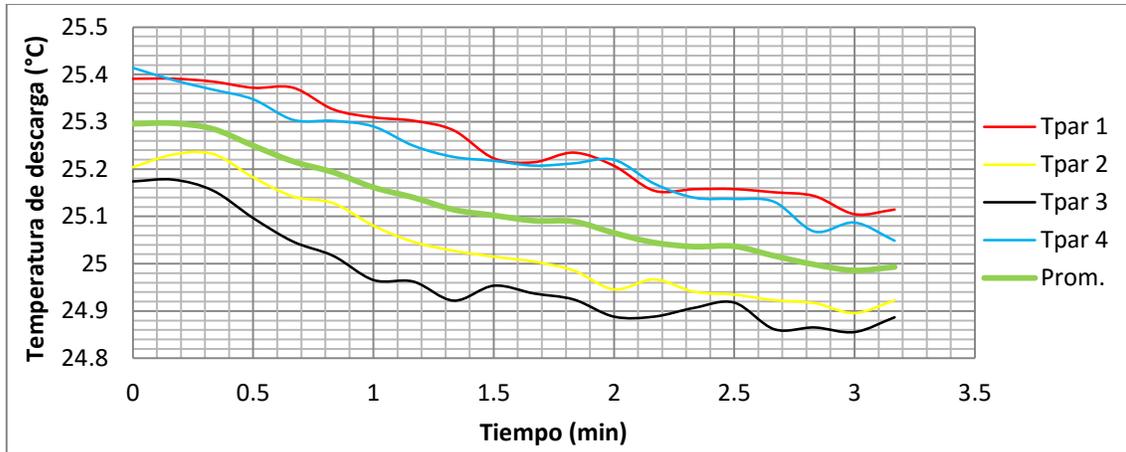


Figura 42. Comportamiento de la temperatura de descarga vs tiempo a un PC de 0.5 bar.

4.2 Punto de control de 1.5 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el PC y su variación de presión en el transcurso, se establece esta medición. En la figura 43, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC = 1.5 bar. El eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 9 minutos con 50 seg, donde se requirieron 3 min para alcanzar la presión de 1.5 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.5 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 16 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (16)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 3$: $a = 0.0231$, $b = -0.2065$, $c = 0.0.7001$, $d = -1.1511$, $e = 1.001$, $f = -0.0404$ y $g = 0.1706$.

2.- $3 < t \leq 59/6$: la presión se mantiene constante en 1.5 bar.

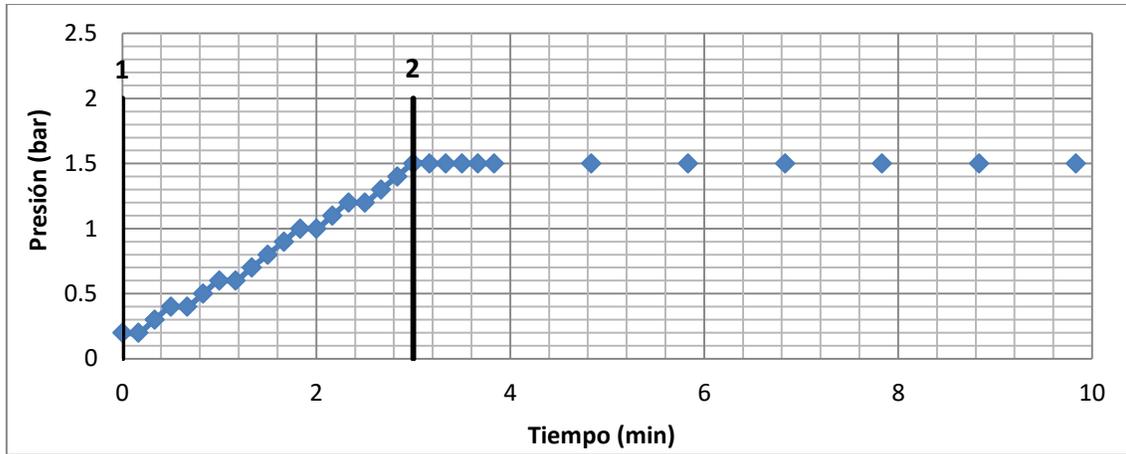


Figura 43. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad real de hidrógeno producido por el electrolizador por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 44, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC = 1.5 bar. El eje X corresponde al tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la producción de hidrógeno medido en unidades de mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 9 minutos con 50 seg, a partir de los 2 min se obtuvo una producción máxima de 596 ml/min y los posteriores 7 min con 50 seg se presentó una disminución hasta alcanzar un mínimo de 0 ml/min. En total se generaron 0.22 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 2.13 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 22.75 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 17 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno ($\dot{Q}_{prod}(t)$) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (17)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 3$: $a = -14.983$, $b = 177.54$, $c = -842.16$, $d = 2037.7$, $e = -2647.4$, $f = 1759.8$ y $g = 117.26$

2.- $3 < t \leq 59/6$: $a = -0.3861$, $b = 14.759$, $c = -225.09$, $d = 1731.1$, $e = -6925.4$, $f = 13039$ y $g = -7864$

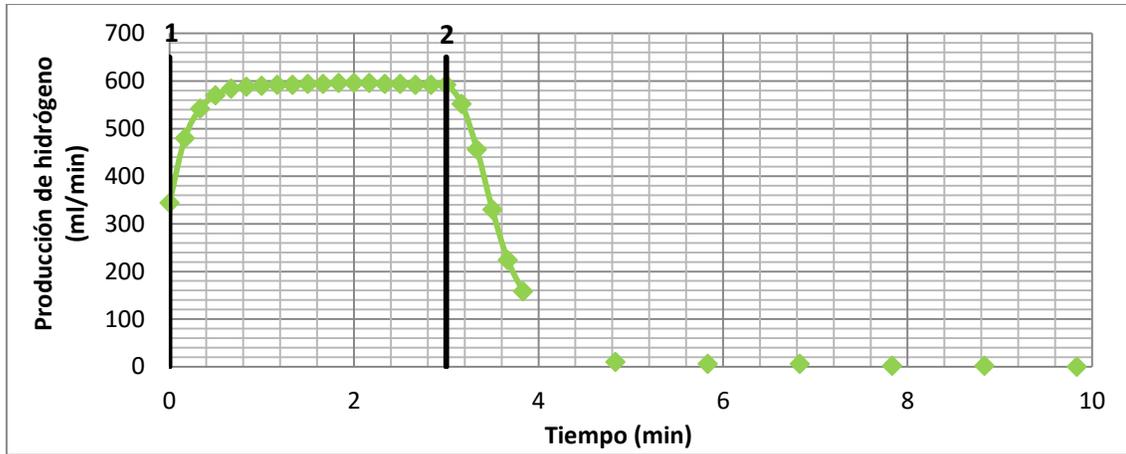


Figura 44. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 45, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 1.5 bar. Un total de 30 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y se presenta la corriente de celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 9 minutos con 50 seg donde hasta los 3 min con 10 seg se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte estática de la gráfica de 39.58 A y los posteriores 6 min con 40 seg, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A, en promedio se consumieron 9.55 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 18 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (18)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 3$: $a = -0.2467$, $b = 2.4614$, $c = -9.5391$, $d = 017.871$, $e = -16.348$, $f = 6.5026$ y $g = 38.835$

2.- $3 < t \leq \frac{59}{6}$: $a = 0.0198$, $b = -0.8623$, $c = 15.4$, $d = -144.44$, $e = 749.91$, $f = -2042.8$ y $g = 2281$

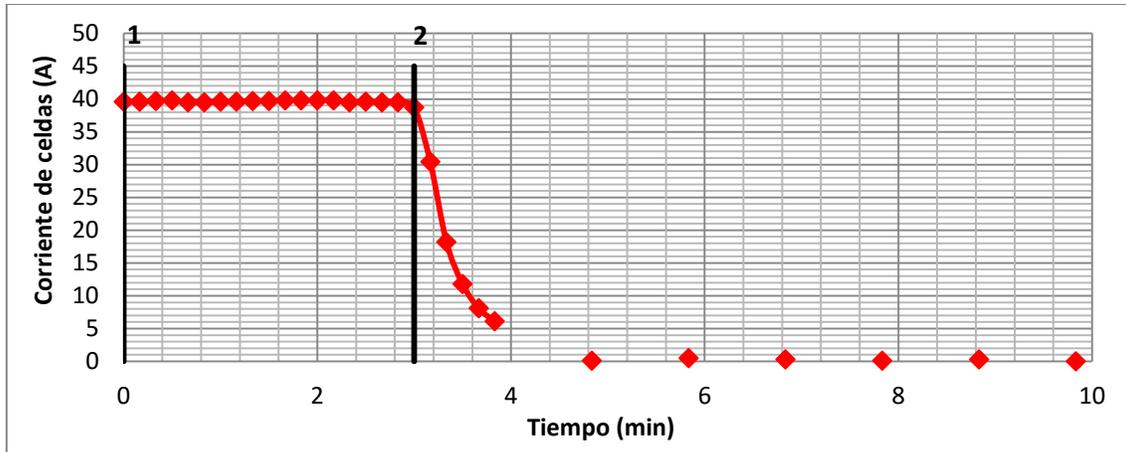


Figura 45. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 46, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 1.5 bar. Un total de 30 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 9 minutos con 50 seg, donde hasta los 3 min se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V y los posteriores 6 min con 50 seg, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V, en promedio se trabajó con 3.34 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada instante del tiempo, la ecuación 19 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (19)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 3$: el potencial se mantiene en 4.1 V.

2.- $3 < t \leq 59/6$: $a = -0.0006$, $b = 0.0222$, $c = -0.3111$, $d = 2.1121$, $e = 6.8433$, $f = 5.8151$ y $g = 5.8151$

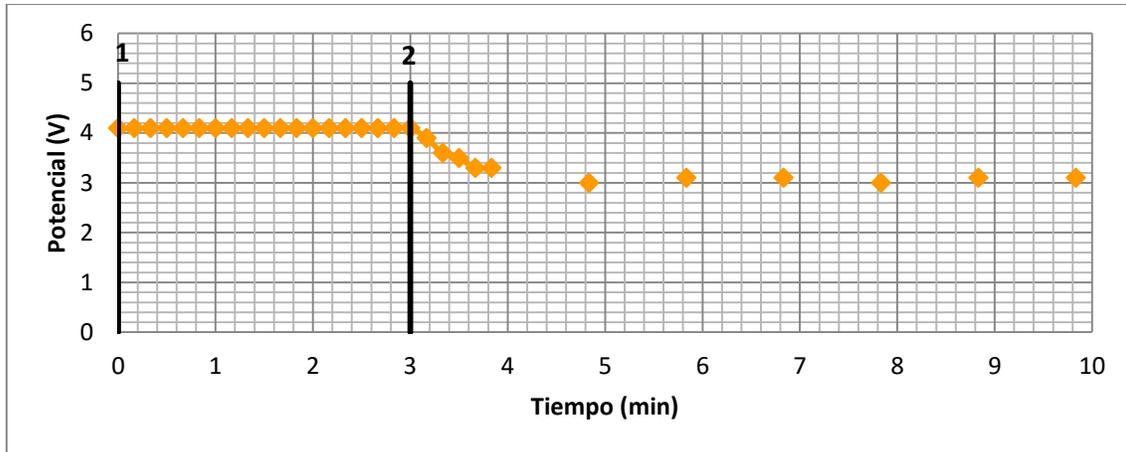


Figura 46. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs temperatura de celda

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 47, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 1.5 bar. Un total de 30 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius (°C). Las mediciones tomaron 9 minutos con 50 seg, donde la primera medición son 42 °C de temperatura, posteriormente a los 10 segundos la temperatura baja a 41 °C manteniéndose 2 min con 40 seg, seguidamente toma 30 seg elevarse a su máxima temperatura, finalmente el tiempo restante se reduce hasta 41 °C, en promedio las celdas se mantuvieron a una temperatura de 41.40 °C. Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 20 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (20)$$

Cuando $0 \leq t \leq 59/6$: $a = -0.0006$, $b = 0.0168$, $c = -0.1726$, $d = 0.7126$, $e = -0.8232$, $f = -0.524$ y $g = 41.62$

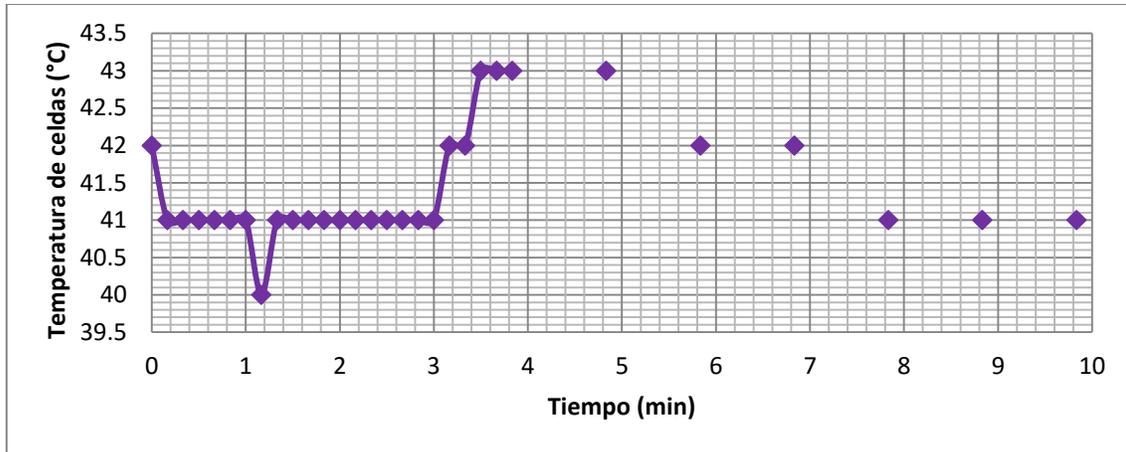


Figura 47. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que demandan las 2 celdas tipo PEM del electrolizador se establece esta medición. En la figura 48, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 1.5 bar. Un total de 30 puntos conforman la gráfica, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica de las celdas medida en Watts (W). Las mediciones tomaron 9 minutos con 50 seg, donde hasta los 3 min con 10 seg se mantuvo una potencia máxima de 162.33 W, mientras que en los siguientes 6 min con 40 seg, por la saturación de hidrógeno en el tanque de almacenamiento la potencia decae hasta un mínimo de 0 W. Finalmente por la integración de la curva, se utilizó un total de 32.79 kJ de energía para producir el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 21 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (21)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 3$: $a = -1.0115$, $b = 10.092$, $c = -39.11$, $d = 73.27$, $e = -67.026$, $f = 26.661$ y $g = 159.22$

2.- $3 < t \leq 59/6$: $a = 0.1209$, $b = -5.1388$, $c = 89.495$, $d = -817.05$, $e = 4121.9$, $f = -10892$ y $g = 11777$

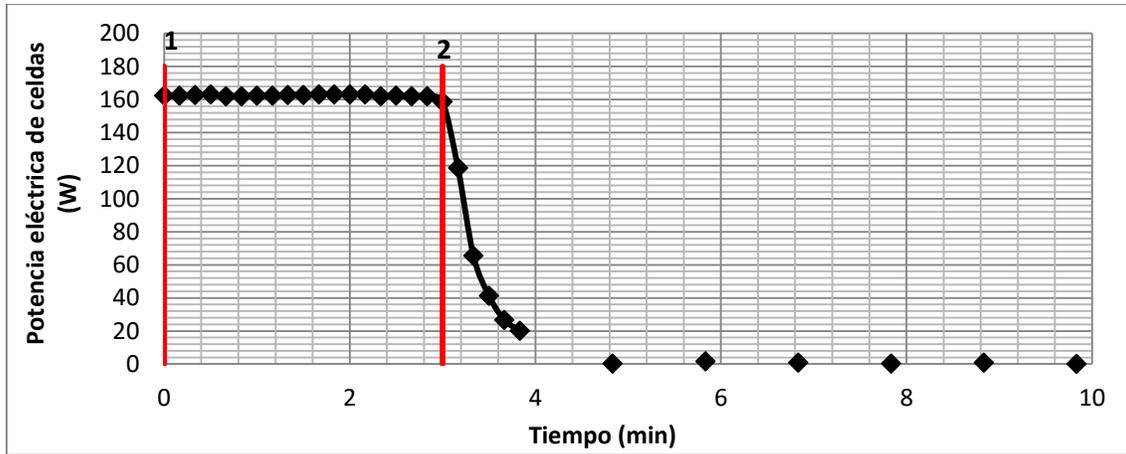


Figura 48. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs descarga de hidrógeno

Para determinar la descarga de hidrógeno por unidad de tiempo que expulsa a caudal abierto el tanque de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 49, se muestran los cambios de la descarga de hidrógeno con respecto al tiempo hasta que el flujometro registre un caudal nulo. Un total de 24 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa la descarga de hidrógeno medido en mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 3 min con 50 seg, donde el primer dato registrado fue de 675.5 ml/min, posteriormente 10 seg después se tiene una la descarga máxima de 1805 ml/min y el tiempo restante la descarga disminuye hasta 0 ml/min por la caída de presión en el tanque. La velocidad de descarga del tanque de hidruros metálicos es de 292.43 ml/min, finalmente se descargaron 1.12 L de hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la descarga de hidrógeno en cualquier instante del tiempo, la ecuación 22 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de descarga de hidrógeno (\dot{Q}_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{des}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (22)$$

Cuando $0 \leq t \leq 115/30$: a = 13.593, b = -212.34, c = 1344.3, d = -4432.6, e = 8131.6, f = -8139.3 y g = 3759.4

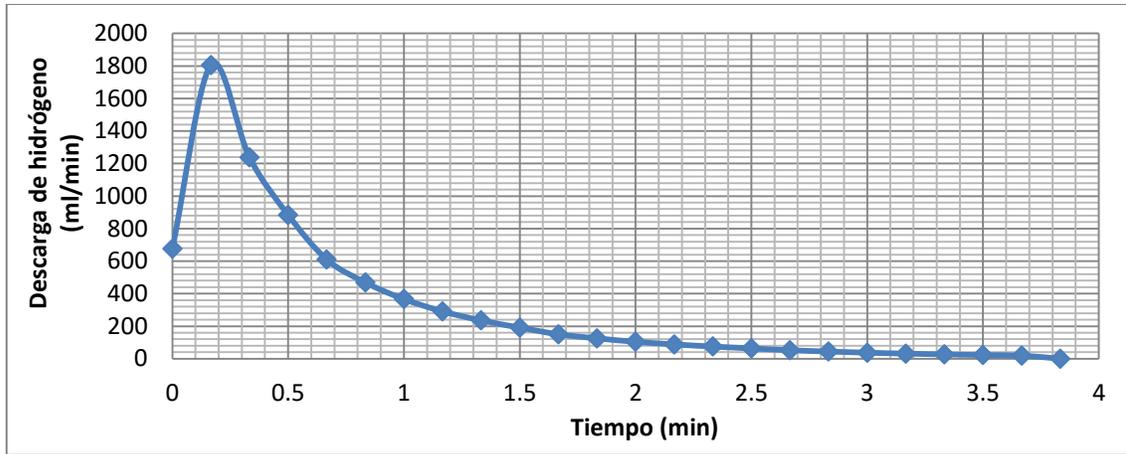


Figura 49. Comportamiento de la descarga de hidrógeno vs tiempo a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 50, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 1.5 bar. Un total de 240 puntos conforman la gráfica, cada línea de 60 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 25.603°C en el termopar 2 (Tpar 2) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 25.606°C , en el termopar 3 (Tpar 3) es de 25.61°C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 25.65°C , en promedio una temperatura inicial de 25.62°C , esta temperatura al paso de los 9 min con 50 seg que toma la carga del tanque al PC de 1.5 bar termina elevándose a una temperatura promedio de 27.20°C . Al final se tuvo una tasa de cambio de $0.23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y una ganancia máxima de 1.65°C de temperatura en el tanque. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 23 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (23)$$

Cuando $0 \leq t \leq 59/6$: $a = 0.000001$, $b = -0.0005$, $c = 0.0105$, $d = -0.0917$, $e = 0.3264$, $f = -0.0365$ y $g = 25.628$

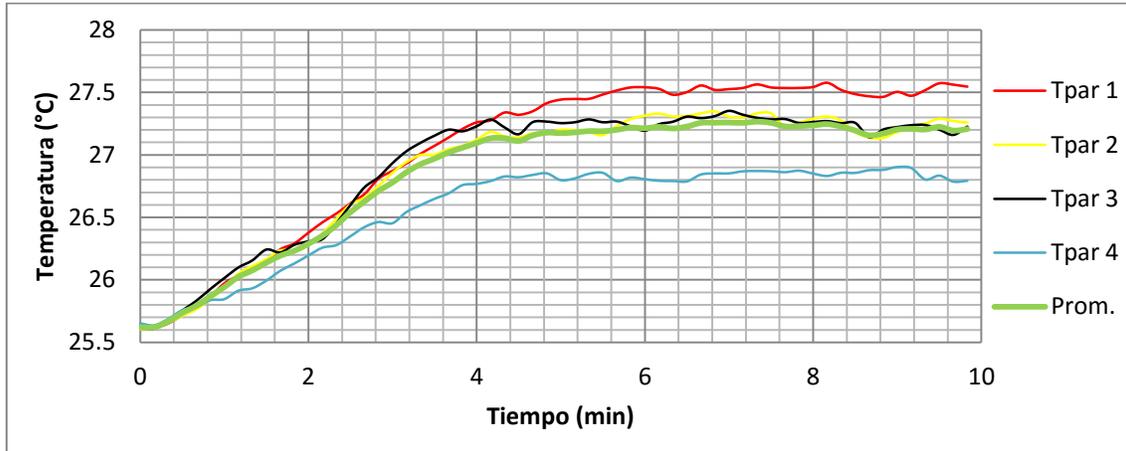


Figura 50. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 1.5 bar.

Tiempo vs temperatura de descarga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de descarga se establece esta medición. En la figura 51, se muestra la temperatura de descarga del tanque de hidruros metálicos a la presión de 1.5 bar en los 4 puntos equidistantes ya antes mencionados con respecto al tiempo. Un total de 96 puntos conforman las gráficas, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura de descarga de hidrógeno. La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 26.69 °C en el termopar 4 (Tpar 4) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 27.05 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 26.90 °C y en el termopar 3 (Tpar 3) es de 26.81 °C, en promedio se mantuvo una temperatura inicial de 26.86 °C, esta temperatura al paso de los 3 min con 50 seg que toma la descarga del tanque, termina disminuyendo a una temperatura promedio de 25.65 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.32 °C/min y un decremento máximo de 1.22 °C de temperatura en el tanque. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 24 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de descarga (T_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (24)$$

Cuando $0 \leq t \leq 23/6$: $a = -0.0142$, $b = 0.2019$, $c = -1.1293$, $d = 3.1131$, $e = -4.1587$, $f = 1.7568$ y $g = 26.67$

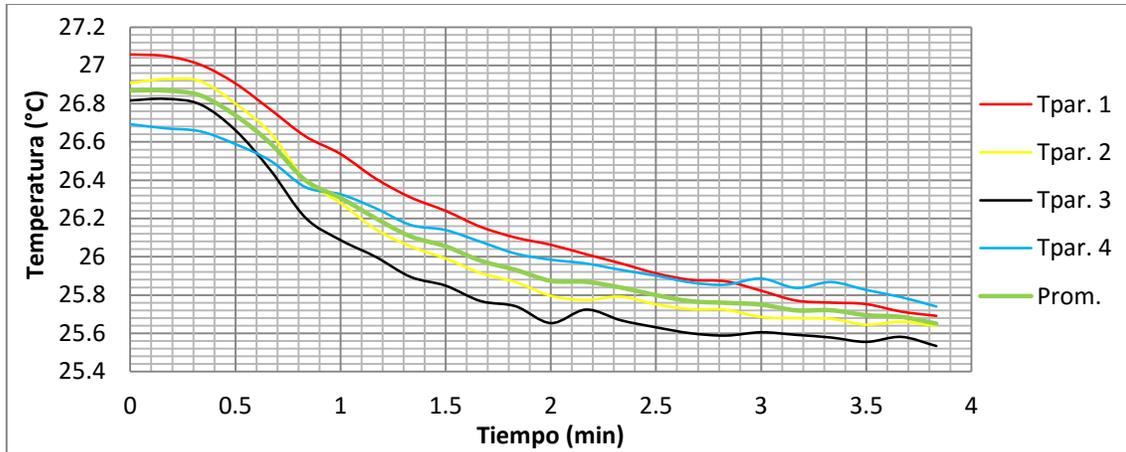


Figura 51. Comportamiento de la temperatura de descarga vs tiempo a un PC de 1.5 bar.

4.3 Punto de control de 2.5 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión mientras se suministra hidrógeno, se establece esta medición. En la figura 52, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, donde el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 29 minutos con 50 seg, donde se requirieron 5 min con 10 seg para alcanzar la presión de 2.5 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.48 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 25 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (25)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 155/30$: $a = 0.0002$, $b = -0.0016$, $c = 0.0025$, $d = 0.025$, $e = -0.094$, $f = 0.5075$ y $g = 0.131$

2.- en $80/15 < t \leq 179/6$, la presión se mantiene constante en 2.5 bar.

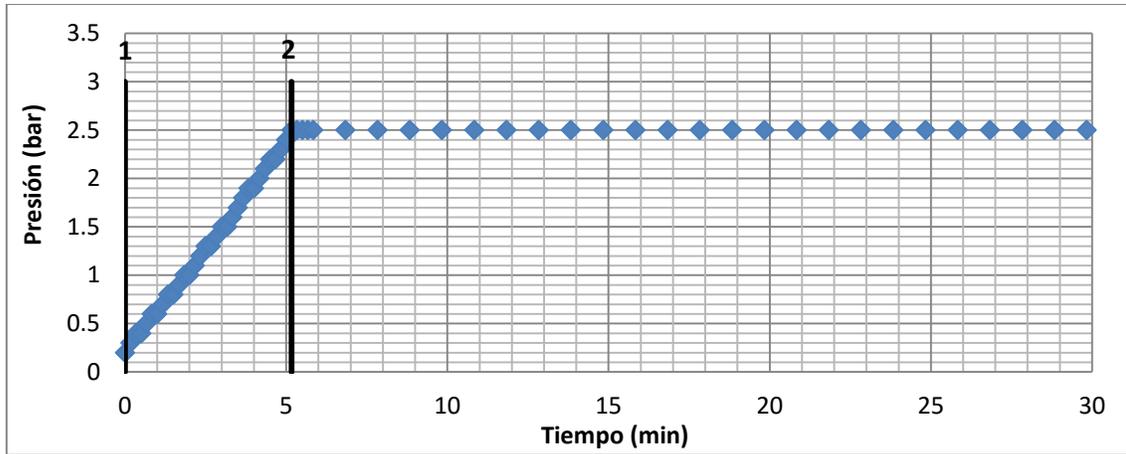


Figura 52. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad real de hidrógeno producido por el electrolizador por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 53, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la producción de hidrógeno medido en unidades de mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 29 minutos con 50 seg, a partir de 5 min con 10 seg se obtuvo una producción promedio máxima de 579.56 ml/min (sección 1), los posteriores 24 min con 40 seg, la producción se mantiene estable (sección 2) y luego tiende a disminuir contantemente hasta alcanzar un mínimo de 0 ml/min (sección 3). En total se generaron 0.12 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 3.54 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 37.80 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 26 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{prod}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (26)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 35/30$: $a = -64.8$, $b = 456.09$, $c = -1579.8$, $d = 3129.5$, $e = -3512.8$, $f = 2087.9$ y $g = 74.25$

2.- $35/30 < t \leq 155/30$: $a = -0.6164$, $b = 11.888$, $c = -92.278$, $d = 367.05$, $e = -783.55$, $f = 843.75$ y $g = 238.57$

3.- $155/30 < t \leq 179/6$: a = 587.79713, b = -1.295, c = -850.403 d = 1.341, e = 262.656, f = 0.73 y g = 26.211

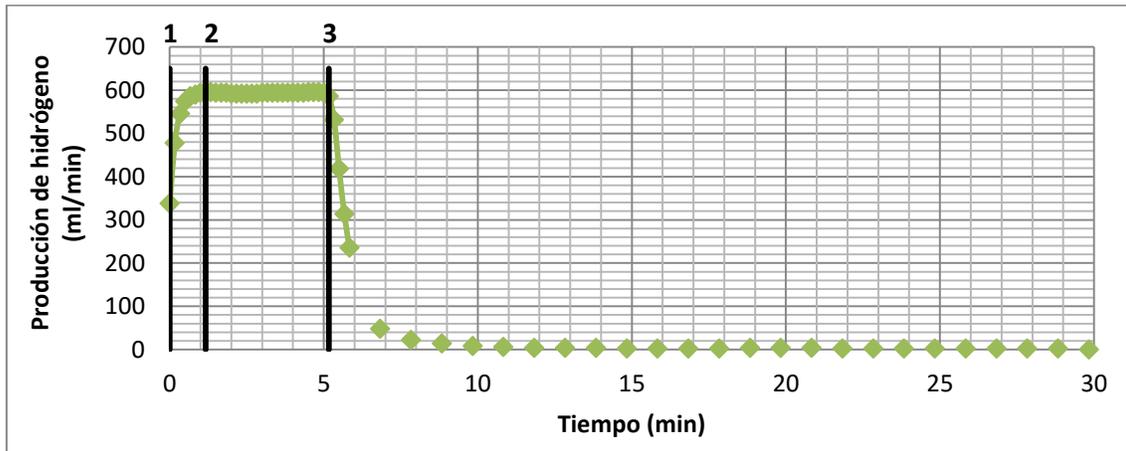


Figura 53. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 54, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la corriente de las celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 29 minutos con 50 seg donde hasta los 5 min con 10 seg se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte estática de la grafica de 39.59 A (sección 1) y los posteriores 24 min con 40 seg, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A (sección 2), en promedio se consumieron 4.02 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 27 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (27)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 155/30$: a = -0.0287, b = 0.4278, c = -2.4276, d = 6.5663, e = -8.6119, f = 4.8074 y g = 38.991

2.- $155/30 < t \leq 179/6$: a = 0.000002, b = -0.0027, c = 0.1247, d = -2.9047, e = 36.322, f = -229.98 y g = 573.71

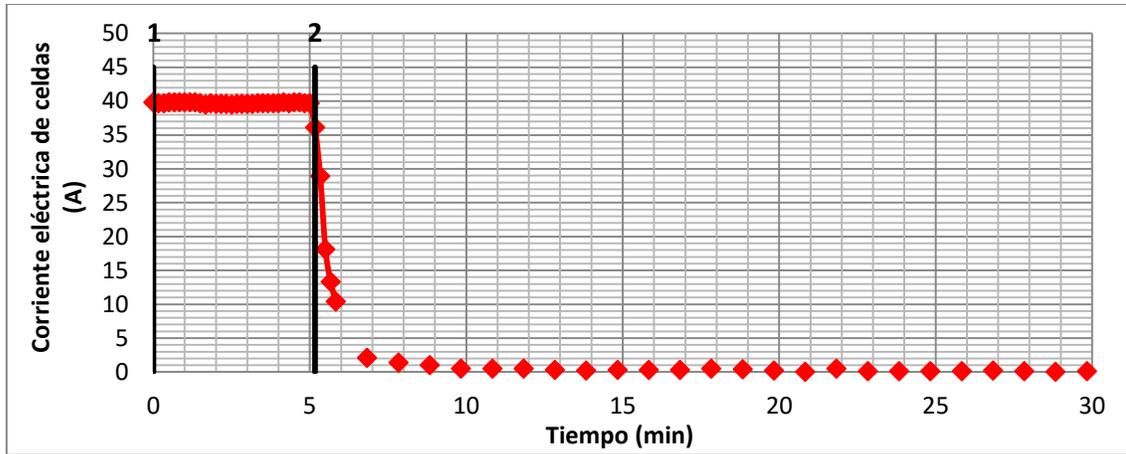


Figura 54. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 55, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 29 minutos con 50 segundos, donde hasta los 5 minutos con 10 segundos se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V (sección 1) y los posteriores 24 minutos con 40 segundos, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V (sección 2), en promedio se trabajó con 3.2 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada instante del tiempo, la ecuación 28 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (28)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 5$: el potencial se queda establecido en 4.1 V.

2.- $5 < t \leq 29.5$: $a = 0.0000006$, $b = -0.00007$, $c = 0.003$, $d = -0.0711$, $e = 0.8974$, $f = -5.7443$ y $g = 17.604$.

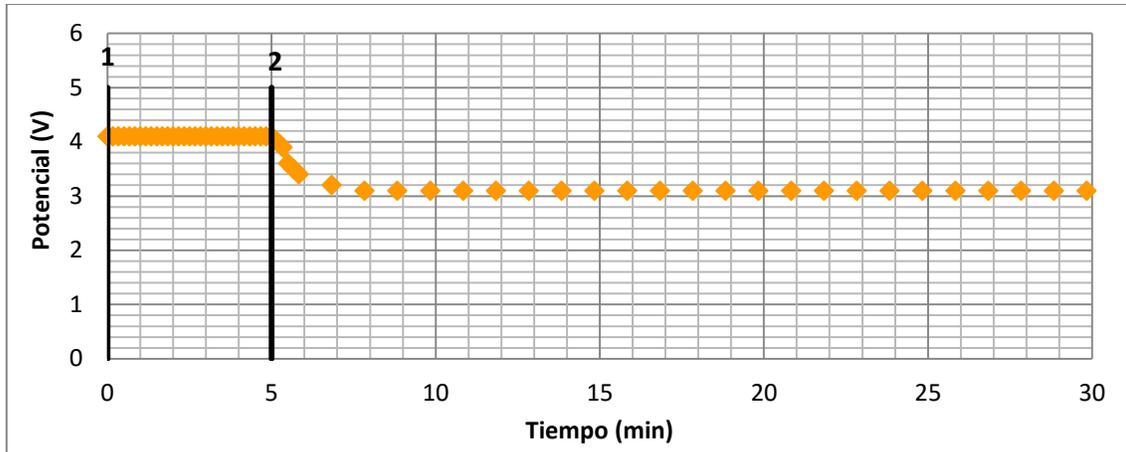


Figura 55. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs temperatura de celda

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 56, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius (°C). Las mediciones tomaron 29 minutos con 50 seg, donde la primera medición registró 40 °C de temperatura, posteriormente debido a los procesos de regulación y control de potencia en las celdas PEM internas del sistema, se presenta un comportamiento poco lineal de la temperatura, a los 3 min con 10 seg la temperatura se incrementa a 42 °C y se mantiene por 2 min, posteriormente requiere 10 seg para elevarse a su máxima temperatura y finalmente el tiempo restante se reduce hasta 41 °C, en promedio las celdas se mantuvieron a una temperatura de 40.78 °C. Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 29 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (29)$$

Cuando $0 < t \leq 179/6$: $a = 9E-07$, $b = -8E-05$, $c = 0.0024$, $d = -0.304$, $e = 0.1005$, $f = 0.5094$, $g = 39.738$

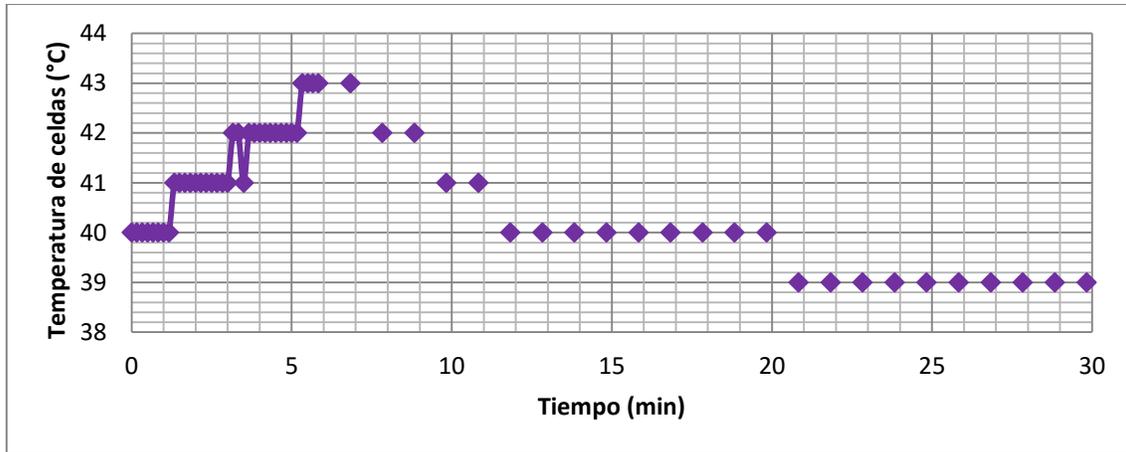


Figura 56. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que demandan las 2 celdas tipo PEM del electrolizador se establece esta medición. En la figura 57, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 60 puntos conforman la gráfica, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica de las celdas medida en Watts (W). Las mediciones tomaron 29 minutos con 50 seg, donde hasta los 5 min se mantuvo una potencia máxima promedio de 162.76 W (sección 1), mientras que en los siguientes 24 min con 40 seg, por la saturación de hidrógeno en el tanque de almacenamiento la potencia decae hasta un mínimo de 0 W (sección 2). Finalmente por la integración de la curva se utilizaron 56.15 kJ de energía para producir el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 30 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (30)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 5$: $a = -0.1495$, $b = 2.2322$, $c = -12.682$, $d = 34.272$, $e = -44.751$, $f = 24.811$ y $g = 159.07$

2.- $5 < t \leq 179/6$: $a = 0.0001$, $b = -0.0114$, $c = 0.5161$, $d = 11.981$, $e = 149.23$, $f = -940.07$ y $g = 2328.7$

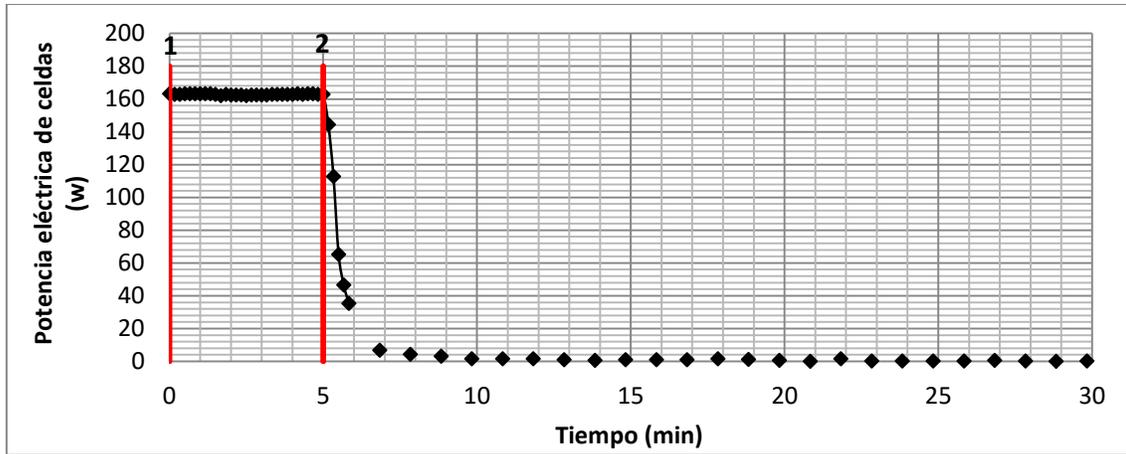


Figura 57. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs descarga de hidrógeno

Para determinar la descarga de hidrógeno por unidad de tiempo que expulsa a caudal abierto el tanque de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 58, se muestran los cambios de la descarga de hidrógeno con respecto al tiempo hasta que el flujómetro registre un caudal nulo. Un total de 34 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa la descarga de hidrógeno medido en mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 5 min con 30 seg, donde el primer dato registrado fue de 6540 ml/min, posteriormente 10 seg después se tiene una descarga 2.48 veces menor con 2635 ml/min y el tiempo restante la descarga disminuye hasta 0 ml/min por la caída de presión en el tanque. La velocidad de descarga del tanque de hidruros metálicos es de 472.73 ml/min, finalmente se descargaron 2.60 L de hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la descarga de hidrógeno en cualquier instante del tiempo, la ecuación 31 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de descarga de hidrógeno (\dot{Q}_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (31)$$

Cuando $0 \leq t \leq \frac{55}{10}$: $a = 21.306$, $b = -411.9$, $c = 3129.6$, $d = -11838$, $e = 23288$, $f = -22638$ y $g = 9016$

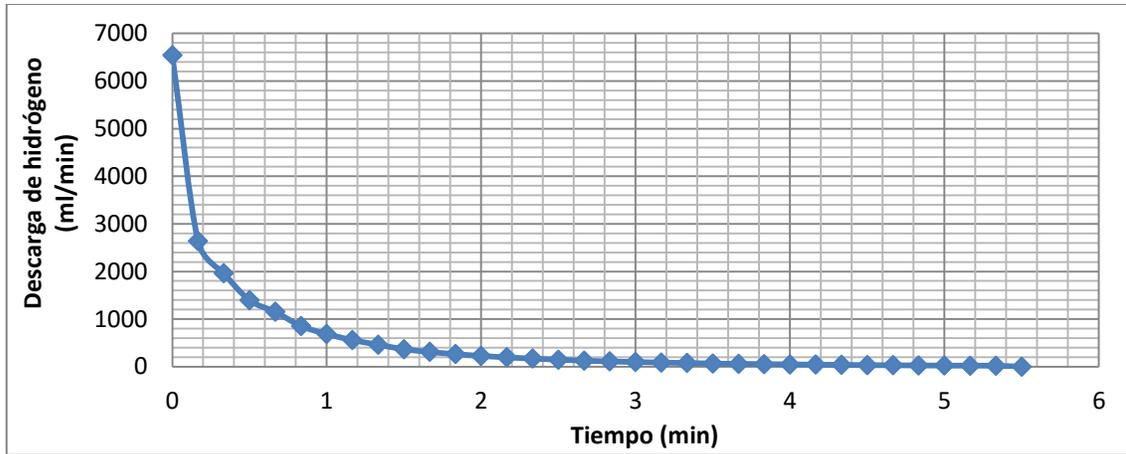


Figura 58. Comportamiento de la descarga de hidrógeno vs tiempo a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 59, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 2.5 bar. Un total de 840 puntos conforman la gráfica, cada línea de 210 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius (°C). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 25.48 °C en el termopar 2 (Tpar 2) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 25.63 °C, en el termopar 3 (Tpar 3) es de 25.50 °C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 25.52 °C, en promedio se tiene una temperatura inicial de 25.53 °C, esta temperatura al paso de los 29 min con 50 seg que toma la carga del tanque al PC de 2.5 bar termina elevándose a una temperatura promedio de 26.78 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.32 °C/min y una ganancia máxima de 2.15 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 32 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (32)$$

Cuando $0 \leq t \leq 179/6$: $a = 1E-07$, $b = -1E-05$, $c = 0.0004$, $d = -0.0044$, $e = 0.0073$, $f = 0.485$ y $g = 25.321$

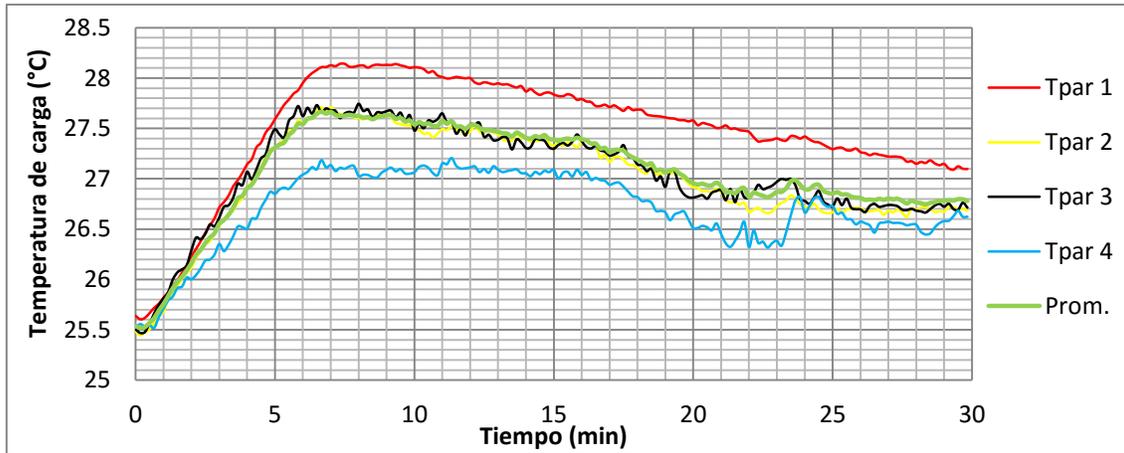


Figura 59. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 2.5 bar.

Tiempo vs temperatura de descarga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de descarga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 60, se muestra la temperatura de descarga del tanque de hidruros metálicos a la presión de 2.5 bar en los 4 puntos equidistantes ya antes mencionados con respecto al tiempo. Un total de 136 puntos conforman las gráficas, cada línea de 34 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura de descarga de hidrógeno. La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 26.0 °C en el termopar 4 (Tpar 4) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 26.64 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 26.29 °C y en el termopar 3 (Tpar 3) es de 26.37 °C, en promedio se mantuvo una temperatura inicial de 26.32 °C, esta temperatura al paso de los 5 min con 30 seg que toma la descarga del tanque, termina disminuyendo a una temperatura promedio de 24.34 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.36 °C/min y un decremento de 1.98 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 33 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de descarga (T_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (33)$$

Cuando $0 \leq t \leq 55/10$ donde $a = -0.0022$, $b = 0.0376$, $c = -0.2412$, $d = 0.6887$, $e = -0.6407$, $f = 0.8846$ y $g = 23.364$

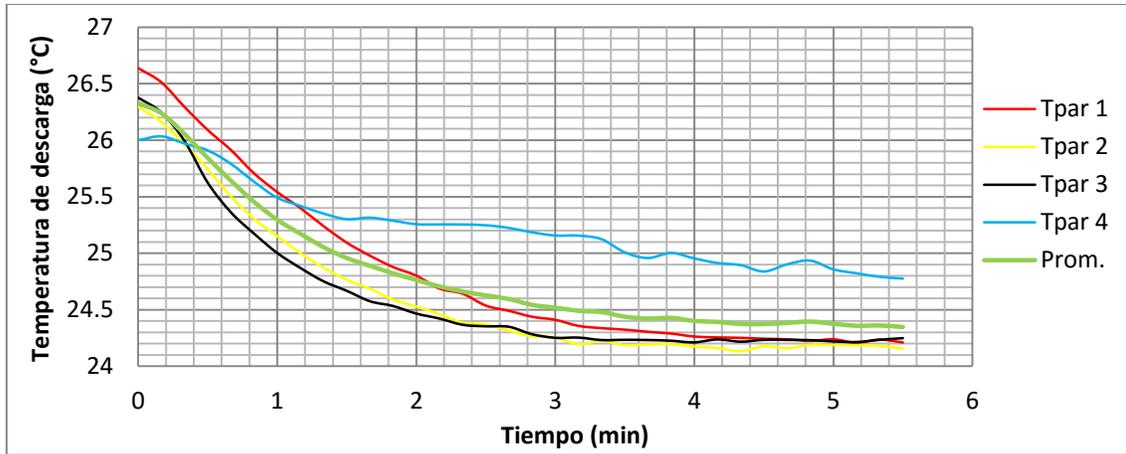


Figura 60. Comportamiento de la temperatura de descarga vs tiempo a un PC de 2.5 bar.

4.4 Punto de control de 4.0 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión mientras se suministra hidrógeno, se establece esta medición. En la figura 61, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 289 puntos conforman la gráfica, donde el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 238 minutos con 50 seg, donde se requirieron 7 min con 50 seg para alcanzar la presión de 4.0 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.51 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 34 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} + \frac{d}{t^3} + \frac{e}{t^4} + \frac{f}{t^5} + \frac{g}{t^6} \quad (34)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq \frac{235}{30}$: $a = 0.00003$, $b = -0.0008$, $c = 0.0067$, $d = -0.0298$, $e = 0.0795$, $f = 0.3289$ y $g = 0.2137$.

2.- $\frac{80}{15} < t \leq \frac{1433}{6}$: la presión se mantiene constante 4.0 bar.

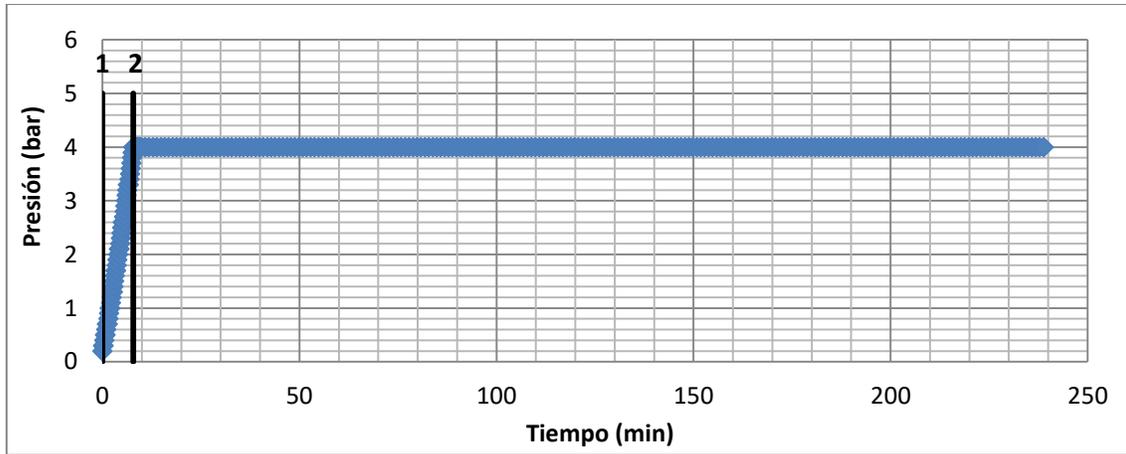


Figura 61. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad real de hidrógeno producido por el electrolizador por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 62, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 4.0 bar. Un total de 289 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la producción de hidrógeno medido en unidades de mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 238 minutos con 50 seg, a partir de 7 min con 50 seg se obtuvo una producción promedio máxima de 584.25 ml/min (sección 1), los posteriores 231 min restantes, la producción se mantiene constante (sección 2) y luego se presenta una disminución contante hasta alcanzar un mínimo de 0 ml/min (sección 3). En total se generaron 0.04 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 8.71 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 93.01 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 35 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{pro}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{pro}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (35)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 145/30$: $a = -64.8$, $b = 456.09$, $c = -1579.8$, $d = 3129.5$, $e = -3512.8$, $f = 2087.9$ y $g = 74.25$,

2.- $145/30 < t \leq 235/30$: $a = -0.6164$, $b = 11.888$, $c = -92.278$, $d = 367.05$, $e = -783.55$, $f = 843.75$ y $g = 238.57$

3.- $235/30 < t \leq 1433/6$: $a = 4E-10$, $b = -3E-07$, $c = 0.00008$, $d = 0.0108$, $e = -0.7499$, $f = -23.221$ y $g = 233.64$.

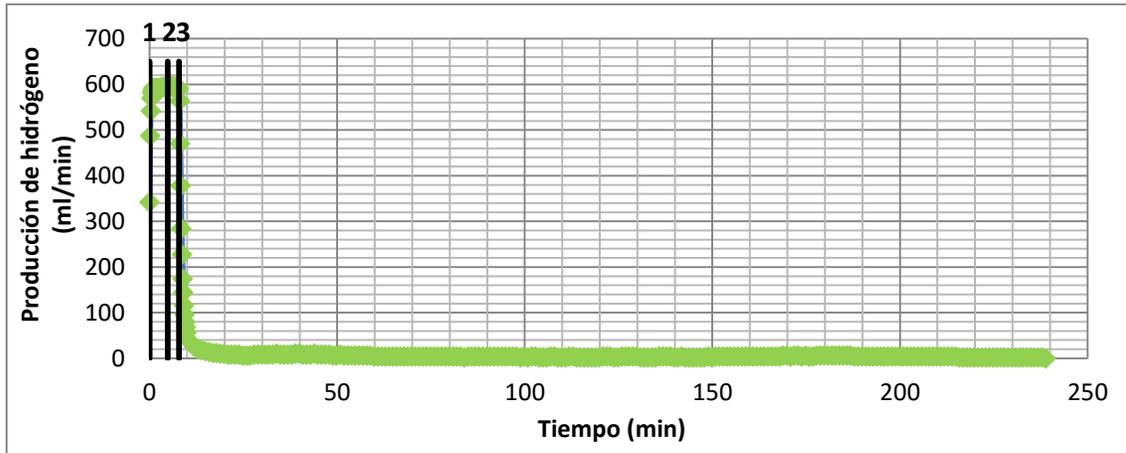


Figura 62. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 63, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 289 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la corriente de las celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 238 minutos con 50 seg donde hasta los 7 min con 50 seg se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte estática de la gráfica de 39.65 A (sección 1) y los posteriores 231 min con 40 seg, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A (sección 2), en promedio se consumieron 1.1 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 36 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (36)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 235/30$: $a = -0.0247$, $b = 0.5297$, $c = -4.2506$, $d = 15.751$, $e = -26.62$, $f = 16.94$ y $g = 37.637$

2.- $235/30 < t \leq 1433/6$: $a = 1E-11$, $b = -1E-08$, $c = 3E-06$, $d = -0.0004$, $e = 0.0286$, $f = -0.897$ y $g = 9.5143$.

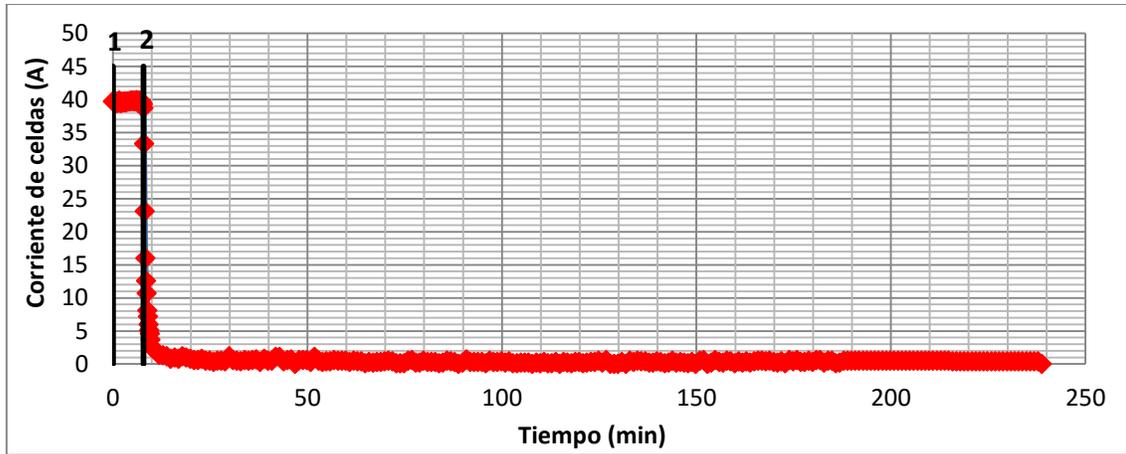


Figura 63. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 64, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 289 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 238 minutos con 50 seg, donde hasta los 7 min con 50 seg se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V (sección 1) y los posteriores 231 min, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V (sección 2), en promedio se trabajó con 3.12 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada instante del tiempo, la ecuación 37 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (37)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 235/30$: el potencial se queda establecido en 4.1 V.

2.- $235/30 < t \leq 1433/6$: $a = 6E-13$, $b = -5E-10$, $c = 1E-07$, $d = -0.00002$, $e = 0.0016$, $f = -0.056$ y $g = 3.7868$.

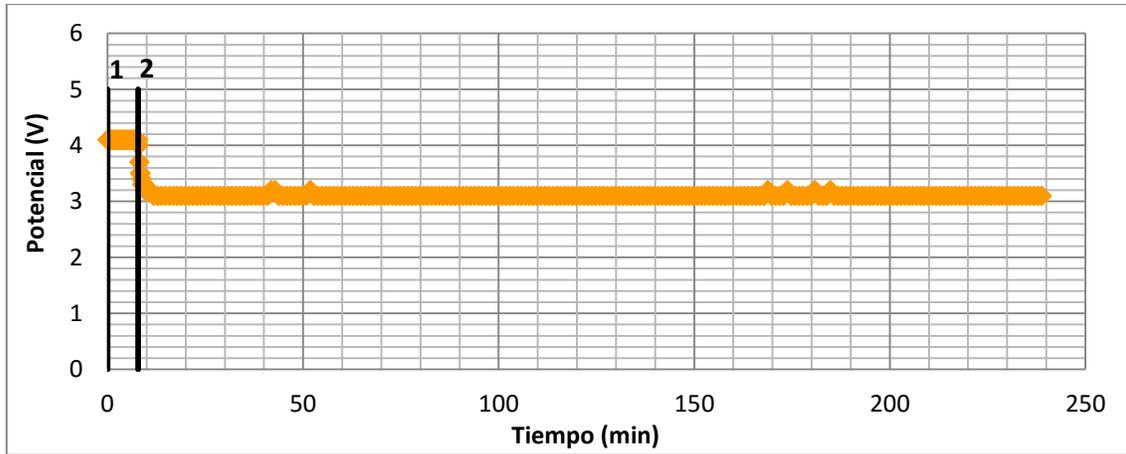


Figura 64. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs temperatura de celda

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 65, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 238 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius (°C). Las mediciones tomaron 238 minutos con 50 seg, donde la primera medición son 40 °C de temperatura, posteriormente debido a los procesos de regulación y control de potencia en las celdas PEM internas del sistema, se presenta un comportamiento poco lineal de la temperatura, a los 8 min con 10 seg la temperatura se incrementa a un máximo de 45 °C y se mantiene por 1 min, finalmente el tiempo restante se reduce hasta 36 °C, en promedio las celdas se mantuvieron a una temperatura de 39.40 °C. Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 38 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (38)$$

Cuando $0 \leq t \leq 1433/6$: $a = -1E-11$, $b = 7E-09$, $c = -2E-06$, $d = 0.0002$, $e = -0.0135$, $f = 0.2179$ y $g = 42.045$

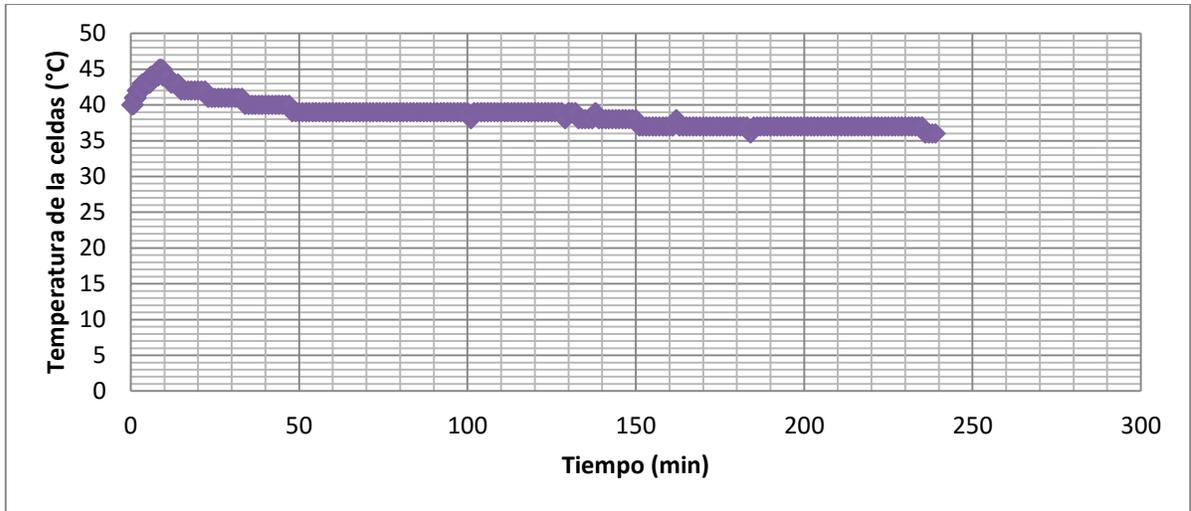


Figura 65. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que demandan las 2 celdas tipo PEM del electrolizador se establece esta medición. En la figura 66, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 289 puntos conforman la gráfica, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica de las celdas medida en Watts (W). Las mediciones tomaron 238 minutos con 50 seg, donde hasta los 7 min con 50 seg se mantuvo una potencia máxima promedio de 163.59 W (sección 1), mientras que en los siguientes 231 min, por la saturación de hidrógeno en el tanque de almacenamiento la potencia decae hasta un mínimo de 0 W (sección 2). Finalmente por la integración de la curva se utilizaron 105.16 kJ de energía para generar el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 39 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (39)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 235/30$: $a = -0.0018$, $b = 0.0375$, $c = -0.304$, $d = 1.133$, $e = -1.7885$, $f = 0.7051$ y $g = 162.7$

2.- $235/30 < t \leq 1433/6$: $a = 7E-11$, $b = -5E-08$, $c = 2E-05$, $d = 0.0021$, $e = 0.1482$, $f = -4.5777$ y $g = 46.05$

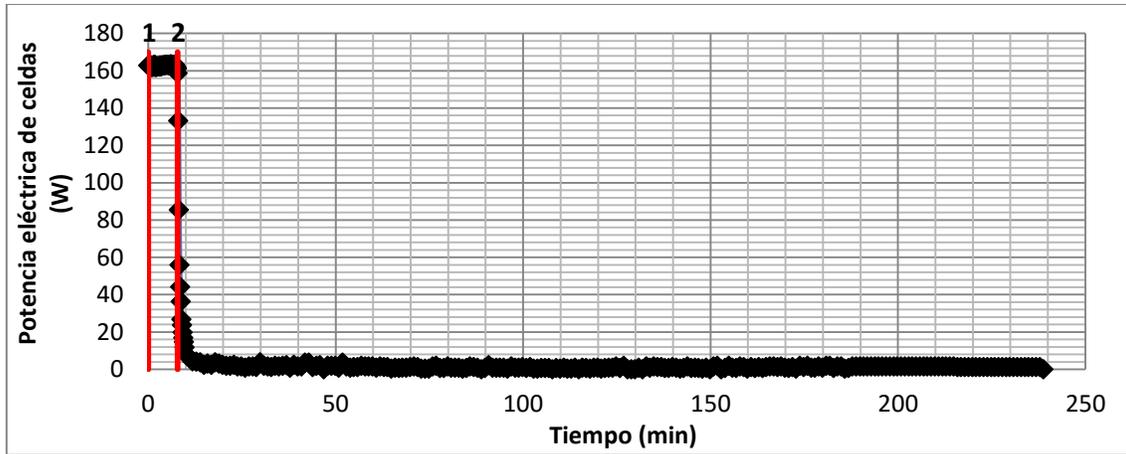


Figura 66. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs descarga de hidrógeno

Para determinar la descarga de hidrógeno por unidad de tiempo que expulsa a caudal abierto el tanque de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 67, se muestran los cambios de la descarga de hidrógeno con respecto al tiempo hasta que el flujómetro registre un caudal nulo. Un total de 154 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa la descarga de hidrógeno medido en mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 30 min, donde el primer dato registrado fue de 7994 ml/min, posteriormente 10 seg después se tiene una descarga 2.3 veces menor con 3478 ml/min y el tiempo restante la descarga disminuye hasta 0 ml/min por la caída de presión en el tanque. La velocidad de descarga del tanque de hidruros metálicos es de 201.33 ml/min, finalmente se descargaron 8.04 L de hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la descarga de hidrógeno en cualquier instante del tiempo, la ecuación 40 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de descarga de hidrógeno (\dot{Q}_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{des}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (40)$$

Cuando $0 \leq t \leq 30$: $a = 0.0008$, $b = -0.079$, $c = 3.1445$, $d = -61.7$, $e = 614.21$, $f = -2823$ y $g = 4430.5$

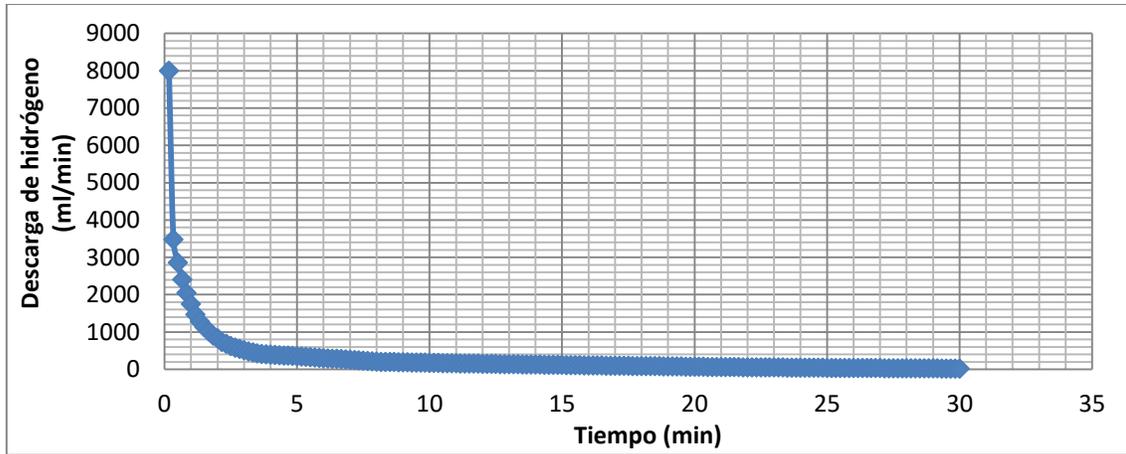


Figura 67. Comportamiento de la descarga de hidrógeno vs tiempo a un PC de 4.0 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 68, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 4.0 bar. Un total de 1156 puntos conforman la gráfica, cada línea de 289 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius (°C). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 25659 °C en el termopar 2 (Tpar 2) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 26.61 °C, en el termopar 3 (Tpar 3) es de 26.66 °C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 26.80 °C, en promedio se tiene una temperatura inicial de 26.67 °C, esta temperatura al paso de los 238 min con 50 seg que toma la carga del tanque al PC de 4.0 bar termina elevándose a una temperatura promedio de 25.78 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.41 °C/min y un incremento máximo de 4.26 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 41 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (41)$$

Cuando $0 \leq t \leq 1433/6$: $a = -3E-12$, $b = 2E-09$, $c = -7E-07$, $d = 0.0001$, $e = -0.0078$, $f = 0.2066$ y $g = 27.717$.

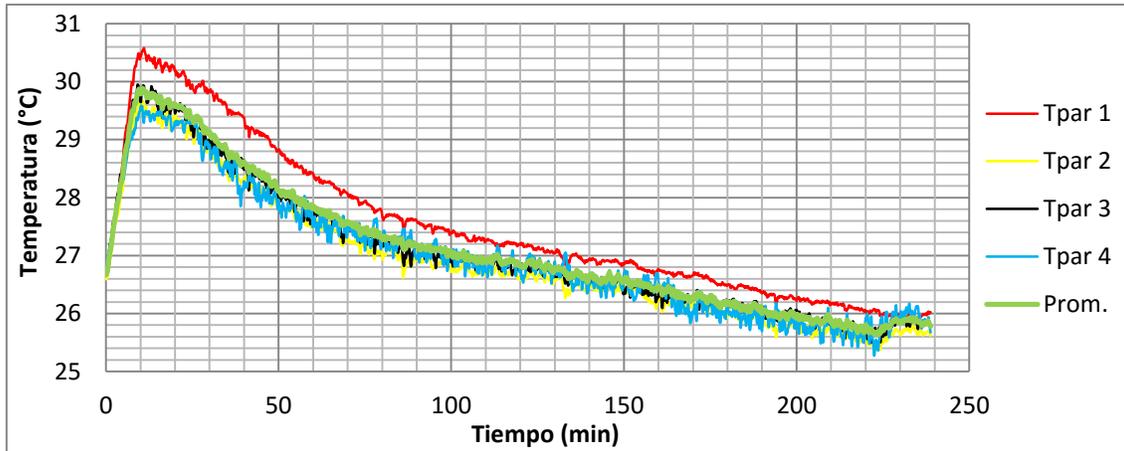


Figura 68. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 4 bar.

Tiempo vs temperatura de descarga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de descarga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 69, se muestra la temperatura de descarga del tanque de hidruros metálicos a la presión de 4.0 bar en los 4 puntos equidistantes ya antes mencionados con respecto al tiempo. Un total de 724 puntos conforman las gráficas, cada línea de 181 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura de descarga de hidrógeno. La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 25.22 °C en el termopar 4 (Tpar 4) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 25.72 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 25.26 °C y en el termopar 3 (Tpar 3) es de 25.40 °C, en promedio se mantuvo una temperatura inicial de 25.40 °C, esta temperatura al paso de los 30 min que toma la descarga del tanque, termina disminuyendo a una temperatura promedio de 21.21 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.35 °C/min y un decremento máximo de 5.13 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 42 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de descarga (T_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (42)$$

Cuando $0 \leq t \leq 30$ donde $a = 4E-07$, $b = -4E-05$, $c = 0.0017$, $d = -0.0339$, $e = 0.3661$, $f = -2.0656$ y $g = 25.46$

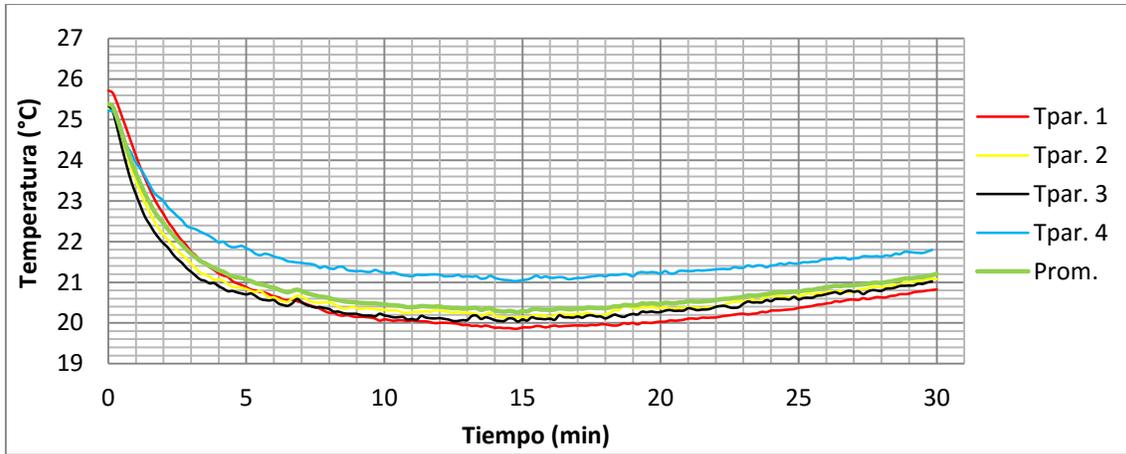


Figura 69. Comportamiento de la temperatura de descarga vs tiempo a un PC de 4.0 bar.

4.5 Punto de control de 6.5 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión mientras se suministra hidrógeno, se establece esta medición. En la figura 70, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, donde el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 813 minutos, donde se requirieron 7 min con 50 seg para alcanzar la presión de 6.5 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.34 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 43 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (43)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 575/30$: $a = 0.0000005$, $b = -0.00002$, $c = 0.0002$, $d = -0.0015$, $e = 0.0207$, $f = 0.3251$ y $g = 0.1902$.

2.- $575/30 < t \leq 813$: La presión se mantiene constante en 6.5 bar.

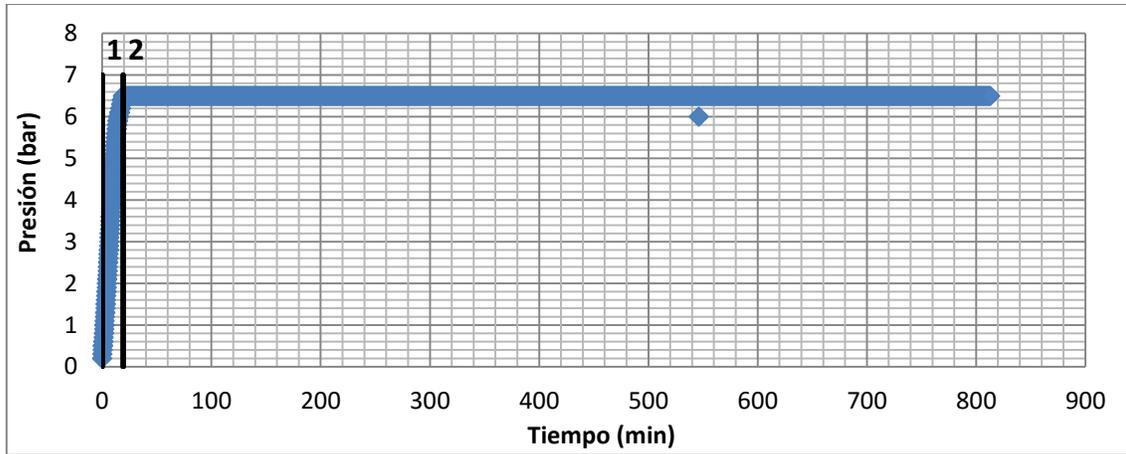


Figura 70. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad de hidrógeno producido por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 71, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la producción de hidrógeno medido en unidades de mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 813 minutos, a partir de 19 min con 10 seg se obtuvo una producción promedio máxima de 590.07 ml/min (sección 1), posteriormente la producción se mantiene constante (sección 2) y finalmente por la pausa y reoperación del sistema, se presenta un incremento instantáneo y descenso hasta alcanzar un mínimo de 0 ml/min (sección 3). En total se generaron 0.12 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 95.19 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 1016.49 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 44 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{pro}) con respecto al tiempo (t).

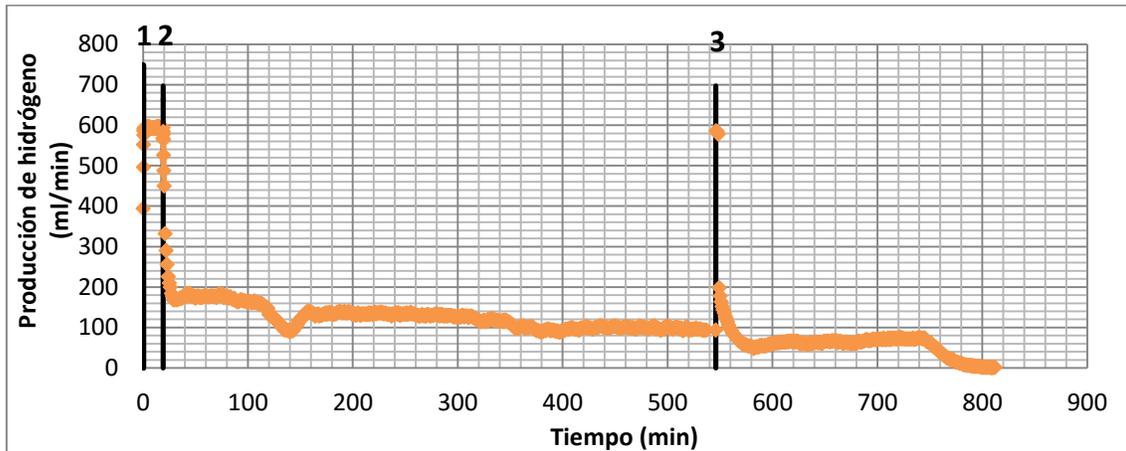
$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (44)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 575/30$: a = -0.005, b = 0.0301, c = -0.7394, d = 8.8936, e = -53.743, f = 148.07 y g = 459.11

2.- $575/30 < t \leq 3275/6$: a = 7E-13, b = -1E-09, c = 1E-06, d = -0.0005, e = 0.0938, f = -9.3167 y g = 481.01

3.- $3275/6 < t \leq 813$: $a = 2E-10$, $b = -7E-07$, $c = 0.0012$, $d = -1.0809$, $e = 552$, $f = -149907$ y $g = 2E+07$



Grafica 71. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 72, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la corriente de las celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 813 minutos, donde hasta los 19 min con 10 seg se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte estática de la grafica de 39.62 A (sección 1) y los posteriores 793 min con 50 seg, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A (sección 2), en promedio se consumieron 7.18 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 45 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (45)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 575/30$: $a = 3E-107$, $b = -2E-05$, $c = 0.0003$, $d = -0.0003$, $e = 0.0206$, $f = 0.1171$ y $g = 39.524$

2.- $575/30 < t \leq 813$: $a = 5E-15$, $b = -2E-11$, $c = 2E-08$, $d = -9E-06$, $e = 0.0025$, $f = -0.334$ y $g = 25.264$

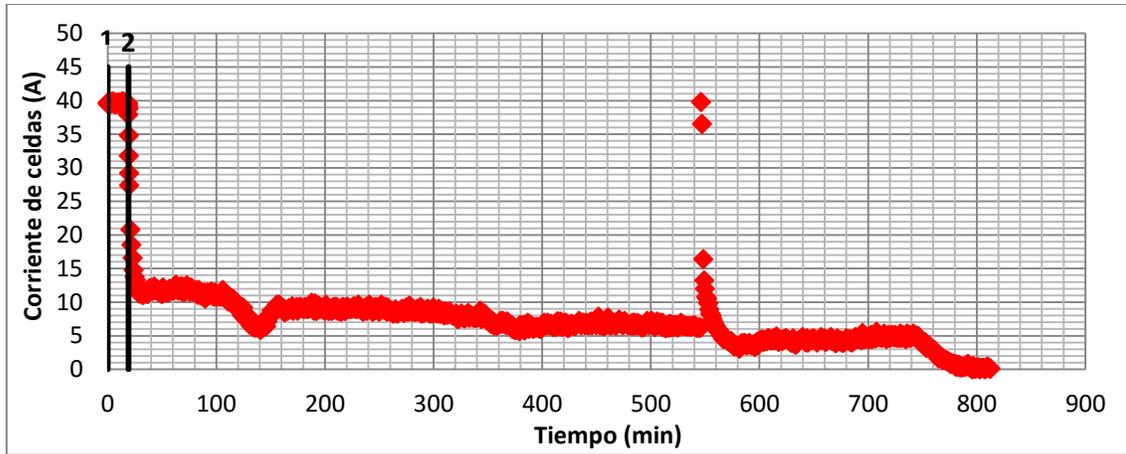


Figura 72. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 73, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 813 minutos, donde hasta los 19 min con 20 seg se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V (sección 1) y los posteriores 793 min con 40 seg, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V (sección 2), en promedio se trabajó con 3.38 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada instante del tiempo, la ecuación 46 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (46)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 290/15$, $L = 4.1 V$

2.- $290/15 < t \leq 813$: $a = -5E-17$, $b = 8E-14$, $c = -3E-11$, $d = -2E-08$, $e = 1E-05$, $f = -0.0033$ y $g = 3.6693$.

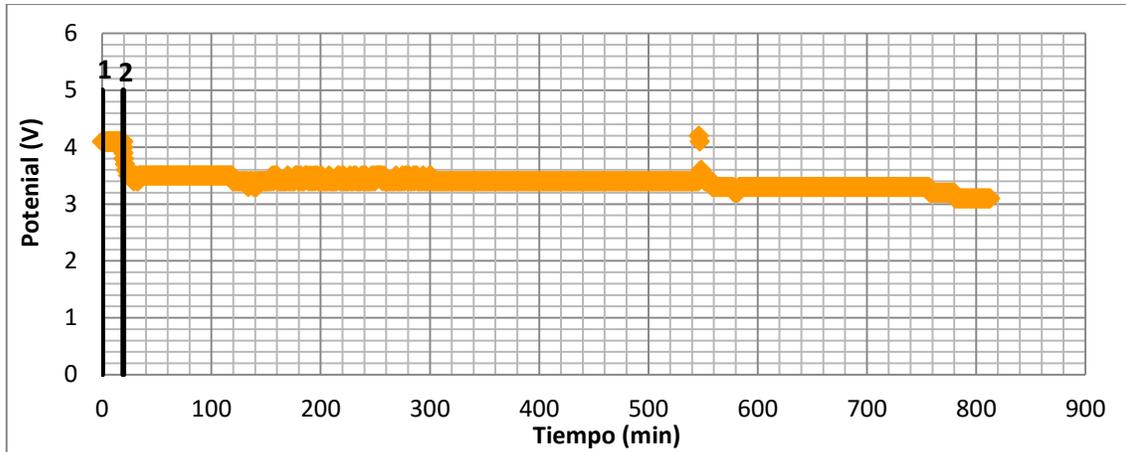


Figura 73. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs temperatura de celdas

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 74, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las mediciones tomaron 813 minutos, donde la primera medición son 39°C de temperatura, posteriormente debido a los procesos de regulación y control de potencia en las celdas PEM internas del sistema, se presenta un comportamiento poco lineal de la temperatura, a los 11 min con 10 seg la temperatura se incrementa a un máximo de 44°C y se mantiene por 9 min, finalmente el tiempo restante se reduce hasta 35°C , en promedio las celdas se mantuvieron a una temperatura de 37.66°C . Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 47 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (47)$$

Donde en $0 \leq t \leq 813$: $a = 2\text{E-}15$, $b = -4\text{E-}12$, $c = 3\text{E-}09$, $d = -1\text{E-}06$, $e = 0.003$, $f = -0.0678$ y $g = 43.247$

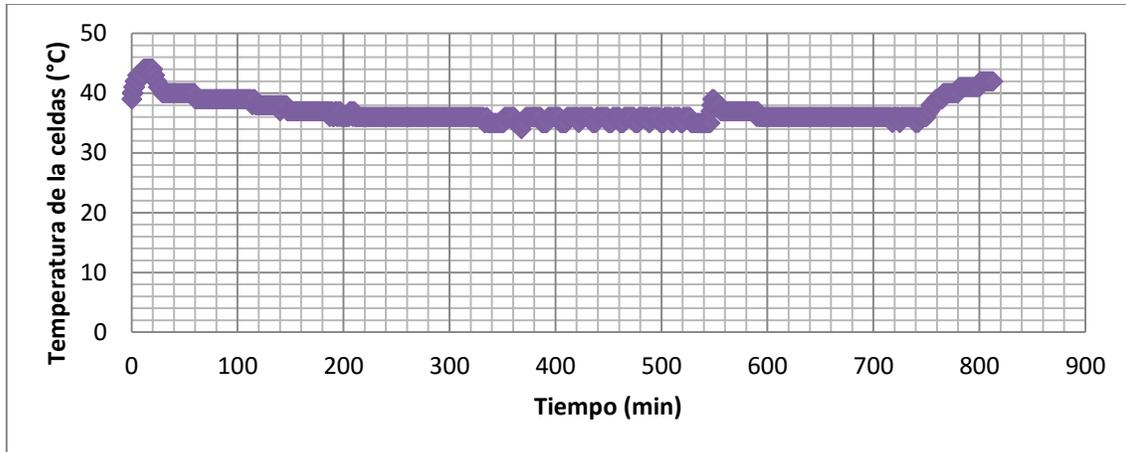


Figura 74. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que demandan las 2 celdas tipo PEM del electrolizador se establece esta medición. En la figura 75, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 914 puntos conforman la gráfica, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica de las celdas medida en Watts (W). Las mediciones tomaron 813 minutos, donde hasta los 19 min con 10 seg se mantuvo una potencia máxima promedio de 162.46 W (sección 1), mientras que en los siguientes 793 con 50 seg min, por la saturación de hidrógeno en el tanque de almacenamiento la potencia decae hasta un mínimo de 0 W (sección 2). Finalmente por la integración de la gráfica se utilizaron 1342.69 kJ de energía para generar el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 48 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (48)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 115/6$: $a = 1E-06$, $b = -7E-05$, $c = 0.0011$, $d = 0.0013$, $e = -0.0844$, $f = 0.4803$ y $g = 162.05$

2.- $115/6 < t \leq 813$: $a = 2E-14$, $b = -7E-11$, $c = 7E-08$, $d = -4E-05$, $e = 0.0105$, $f = -1.3752$ y $g = 96.622$.

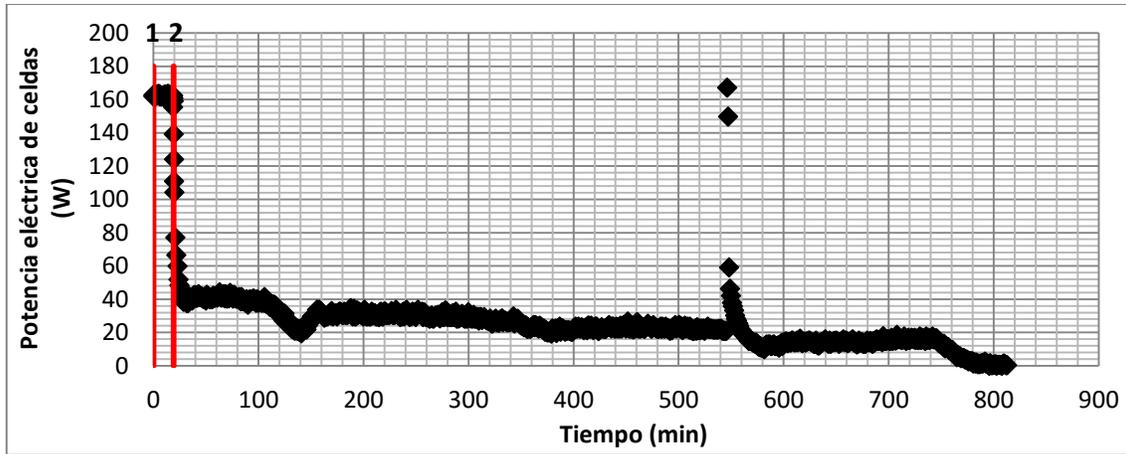


Figura 75. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 76, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 6.5 bar. Un total de 19512 puntos conforman la gráfica, cada línea de 4878 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius (°C). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 26.11 °C en el termopar 1 (Tpar 1) mientras que en el termopar 2 (Tpar 2) es de 26.20 °C, en el termopar 3 (Tpar 3) es de 26.50 °C y en el termopar 4 (Tpar 4) es de 26.73 °C, en promedio se tiene una temperatura inicial de 26.40 °C, esta temperatura al paso de los 813 min que toma la carga del tanque al SP de 6.5 bar termina elevándose a una temperatura promedio de 27.10 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.37 °C/min y una ganancia máxima de 8.74 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 49 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (49)$$

Cuando $0 \leq t \leq 813$: $a = -2E-15$, $b = 6E-09$, $c = -6E-09$, $d = 3E-06$, $e = -0.0008$, $f = 0.0667$ y $g = 30.341$

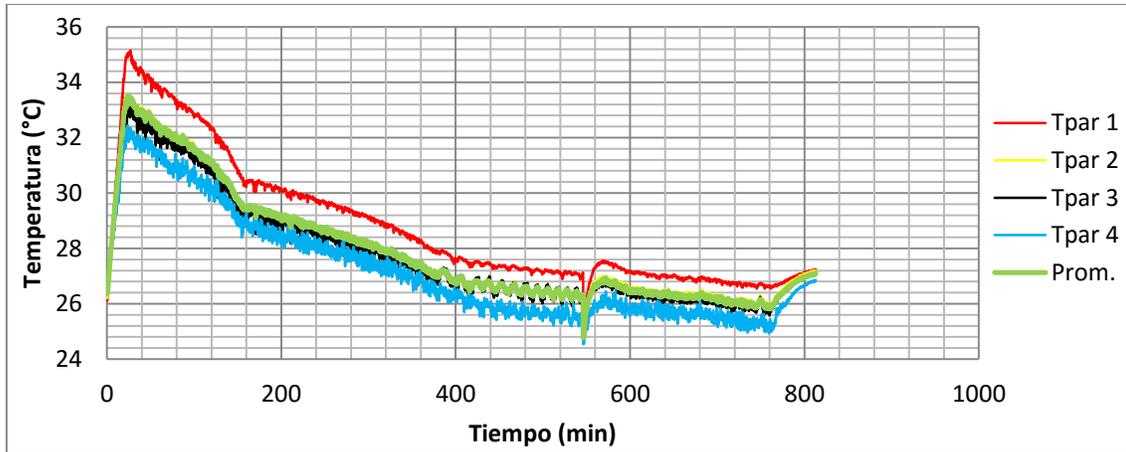


Figura 76. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 6.5 bar.

Tiempo vs temperatura de descarga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de descarga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 77, se muestra la temperatura de descarga del tanque de hidruros metálicos a la presión de 6.5 bar en los 4 puntos equidistantes ya antes mencionados con respecto al tiempo. Un total de 7176 puntos conforman las gráficas, cada línea de 1794 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura de descarga de hidrógeno. La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 26.31 °C en el termopar 4 (Tpar 4) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 26.74 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 26.38 °C y en el termopar 3 (Tpar 3) es de 26.32 °C, en promedio se mantuvo una temperatura inicial de 26.44 °C, esta temperatura al paso de los 299 min que toma la descarga del tanque, termina disminuyendo a una temperatura promedio de 21.76 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.70 °C/min y un decremento máximo de 12.09 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 50 con sus contantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de descarga (T_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (50)$$

Cuando $0 \leq t \leq 30$: $a = 1E-12$, $b = -1E-09$, $c = 5E-07$, $d = -1E-04$, $e = 0.0089$, $f = -35.89$ y $g = 19.275$

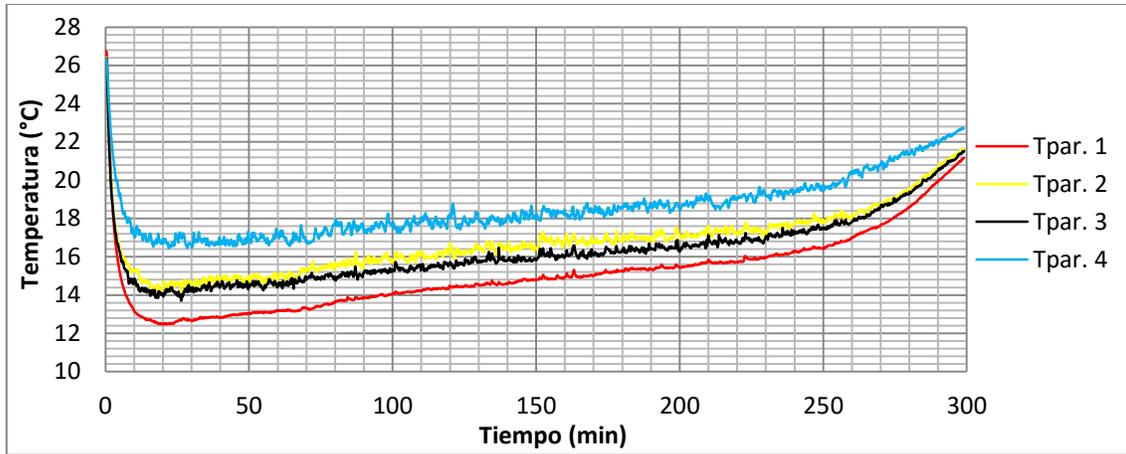


Figura 77. Comportamiento de la temperatura de descarga vs tiempo a un PC de 6.5 bar.

4.6 Punto de control de 9.0 bar

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión mientras se suministra hidrógeno, se establece esta medición. En la figura 78, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 1882 puntos conforman la gráfica, donde el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 881 minutos, donde se requirieron 35 min para alcanzar la presión de 9.0 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.26 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 51 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (51)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 35$: $a = -0.00000005$, $b = 0.000005$, $c = -0.0001$, $d = -0.0003$, $e = 0.0296$, $f = 0.2692$ y $g = 0.3787$.

2.- $35 < t \leq 881$: La presión se mantiene constante en 9.0 bar.

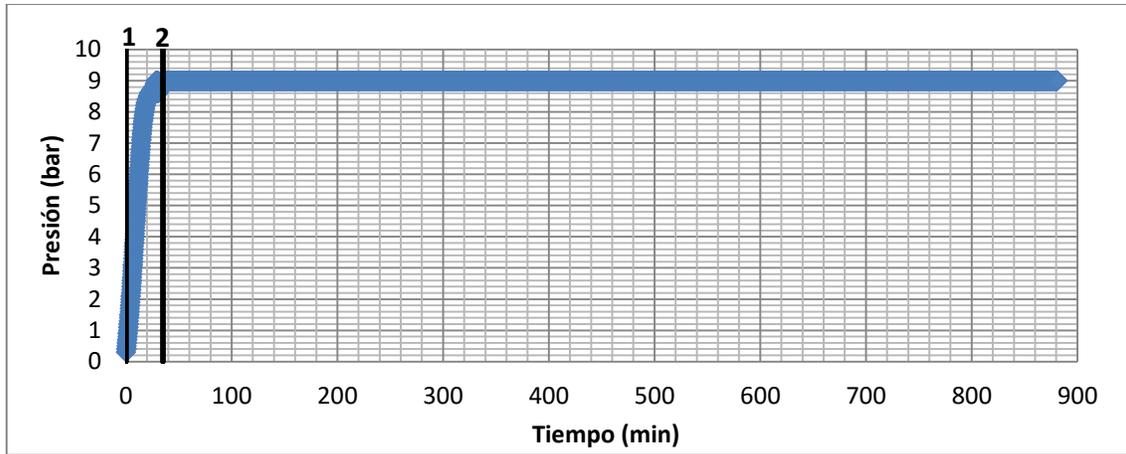


Figura 78. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad de hidrógeno producido por unidad de tiempo se establece esta medición. En la figura 79, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 9.0 bar. Las mediciones tomaron 881 minutos, a partir de 35 min se obtuvo una producción promedio máxima de 590 ml/min (sección 1), posteriormente la producción se reduce gradualmente (sección 2), seguidamente se completa los datos faltantes de forma lineal en la gráfica (sección 3) y finalmente termina la producción de hidrógeno (sección 4). En total se generaron 0.20 ml/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 172.73 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 1838.09 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 52 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{pro}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (52)$$

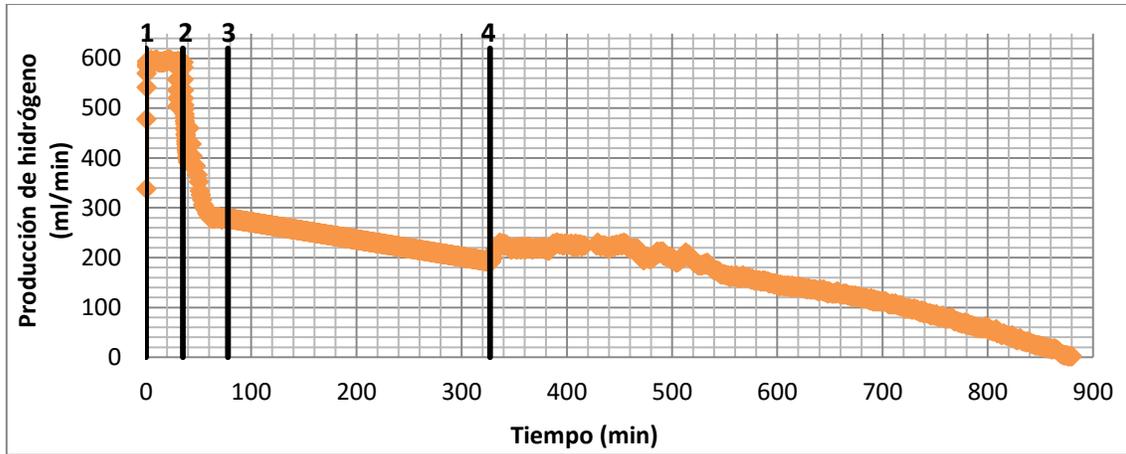
Los resultados se dividieron en 4 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 35$: $a = -0.00001$, $b = 0.0012$, $c = -0.0528$, $d = 1.1554$, $e = -12.466$, $f = 56.659$ y $g = 504.24$

2.- $35 < t \leq 74$: $a = 1E-05$, $b = -0.0038$, $c = 0.5277$, $d = -38671$, $e = 1574.5$, $f = -33772$ y $g = 298611$

3.- $74 < t \leq 327$: $a = 1E-20$, $b = -1E-17$, $c = 6E-15$, $d = -1E-12$, $e = 2E-10$, $f = -0.3478$ y $g = 305.68$

4.- $327 < t \leq 881$: $a = 2E-13$, $b = -9E-10$, $c = 1E-06$, $d = -0.0009$, $e = 0.3667$, $f = -74.765$ y $g = 6288.5$



Gráfica 79. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 80 W c/u alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 80, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 1882 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la corriente de las celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 881 minutos, donde hasta los 71 min se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte de la gráfica estática de 36.45 A (sección 1) y los posteriores 810 min, por la disminución de la producción de hidrógeno decae la corriente de las celdas hasta un mínimo de 0 A (sección 2), en promedio se consumieron 14.22 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 53 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (53)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 71$: $a = -1E-08$, $b = 2E-06$, $c = -0.0001$, $d = 0.00033$, $e = -0.0222$, $f = -0.0441$ y $g = 39.972$

2.- $71 < t \leq 881$: $a = -7E-15$, $b = 2E-11$, $c = -2E-08$, $d = 1E-05$, $e = -0.0037$, $f = 0.4642$ y $g = -1.8331$

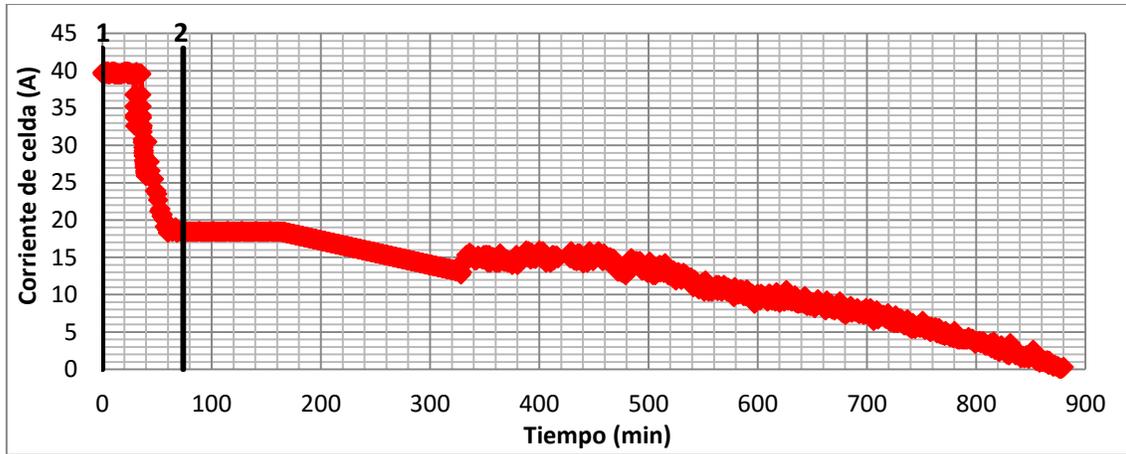


Figura 80. Comportamiento de tiempo vs corriente de celdas a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs potencial

Para determinar el potencial por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo PEM alojadas en el interior del electrolizador se establece esta medición. En la figura 81, se presentan los cambios del potencial de las celdas conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 1882 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el Y representa el potencial de las celdas medido en Volts (V). Las mediciones tomaron 881 minutos, donde hasta los 35 min con 20 seg se mantuvo un potencial máximo de 4.1 V (sección 1) y los posteriores 845 min con 40 seg, por la disminución de la demanda de producción de hidrógeno decae el potencial hasta un mínimo de 3 V (sección 2), en promedio se trabajó con 3.5 V. Para conocer y replicar resultados del potencial en cada instante del tiempo, la ecuación 54 con sus constantes, caracterizan el comportamiento del potencial (L) con respecto al tiempo (t).

$$L(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (54)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 106/3$, $L = 4.1 V$

2.- $106/3 < t \leq 881$: $a = -3E-17$, $b = 6E-14$, $c = -1E-11$, $d = -4E-08$, $e = 3E-05$, $f = -0.007$ y $g = 4.0487$.

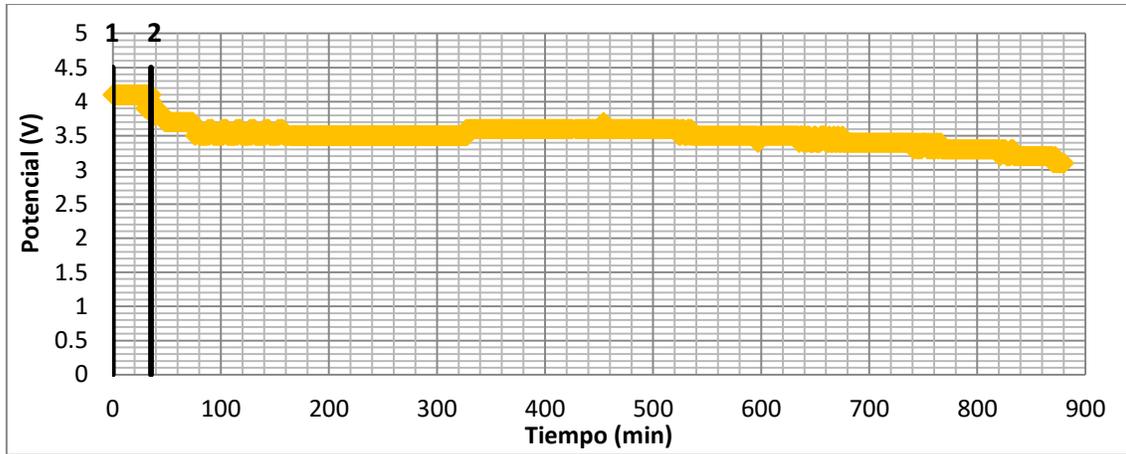


Figura 81. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs temperatura de celdas

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador se establece esta medición. En la figura 82, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 1882 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Las mediciones tomaron 881 minutos, donde la primera medición son 48°C de temperatura, posteriormente debido a los procesos de regulación y control de potencia en las celdas PEM internas del sistema, se presenta un comportamiento poco lineal de la temperatura, a los 74 min la temperatura disminuye hasta un máximo de 38°C , posteriormente la temperatura se incrementa casi instantáneamente y se mantiene por 90 min, finalmente la temperatura se reduce gradualmente, manteniéndose una temperatura menor a la inicial. Las celdas se mantuvieron a una temperatura de 40.05°C . Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 55 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (55)$$

Donde en $0 \leq t \leq 881$: $a = 4\text{E-}15$, $b = -1\text{E-}11$, $c = 9\text{E-}09$, $d = -3\text{E-}06$, $e = 0.0001$, $f = 0.0381$ y $g = 40.891$

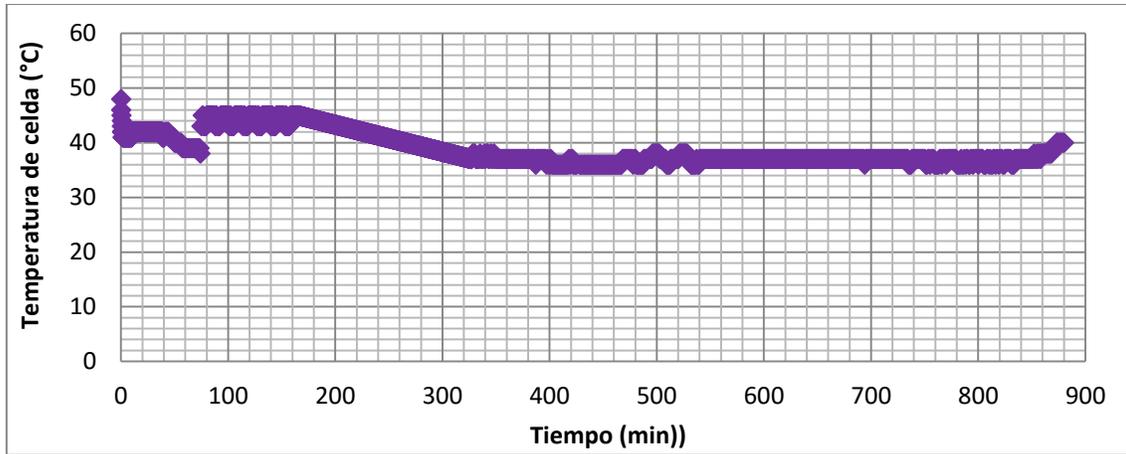


Figura 82. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que se demanda se establece esta medición. En la figura 83, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. En el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica medida en Watts (W). Los primeros 35 min se mantuvo una potencia máxima promedio de 162.46 W (sección 1), posteriormente la producción se reduce gradualmente (sección 2), seguidamente se completa los datos faltantes de forma lineal (sección 3), finalmente la potencia se reduce hasta 0 W (sección 4). Por la integración de la gráfica se utilizaron 2529.14 kJ de energía para genera el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celas en cada instante del tiempo, la ecuación 56 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (56)$$

Los resultados se dividieron en 4 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

- 1.- $0 \leq t \leq 35$: $a = 3E-07$, $b = -2E-05$, $c = 0.0003$, $d = 0.0035$, $e = -0.0995$, $f = 0.558$ y $g = 162.11$
- 2.- $35 < t \leq 74$: $a = 1E-05$, $b = -0.0038$, $c = 0.5277$, $d = -38.671$, $e = 1574.5$, $f = -33772$ y $g = 298611$
- 3.- $74 \leq t \leq 327$: $a = 1E-20$, $b = -1E-17$, $c = 6E-15$, $d = -1E-12$, $e = 2E-10$, $f = -0.3478$ y $g = 305.68$
- 4.- $327 < t \leq 881$: $a = 2E-13$, $b = -9E-10$, $c = 1E-06$, $d = -0.0009$, $e = 0.3667$, $f = -74.765$ y $g = 6288.5$

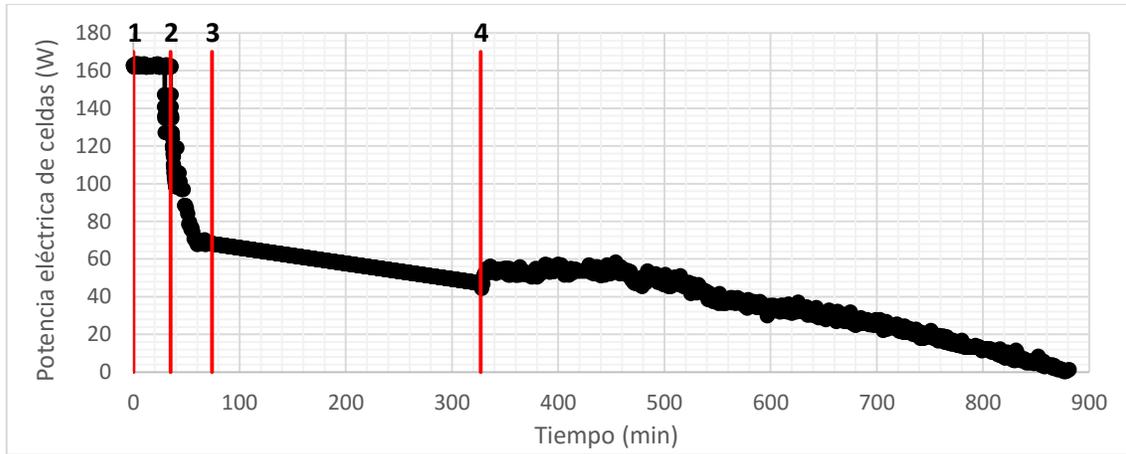


Figura 83. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs descarga de hidrógeno

Para determinar la descarga de hidrógeno por unidad de tiempo que expulsa a caudal abierto el tanque de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 84, se muestran los cambios de la descarga de hidrógeno con respecto al tiempo hasta que el flujómetro registre un caudal nulo. Un total de 454 puntos conforman la gráfica, el eje X corresponde al tiempo medido en minutos y el eje Y representa la descarga de hidrógeno medido en mililitros por minuto (ml/min). Las mediciones tomaron 404 min, donde el primer dato registrado fue de 6582 ml/min, posteriormente 10 seg después se tiene una descarga 2.02 veces menor con 3250 ml/min y el tiempo restante la descarga disminuye hasta 0 ml/min por la caída de presión en el tanque. La velocidad de descarga del tanque de hidruros metálicos es de 328 ml/min, finalmente se descargaron 132.51 L de hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la descarga de hidrógeno en cualquier instante del tiempo, la ecuación 57 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de descarga de hidrógeno (\dot{Q}_{desc}) con respecto al tiempo (t).

$$\dot{Q}_{desc}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (57)$$

Cuando $0 \leq t \leq 404$: $a = 6E-11$, $b = -9E-08$, $c = 5E-05$, $d = -0.0121$, $e = 1.5202$, $f = -83.1$ y $g = 1678.1$

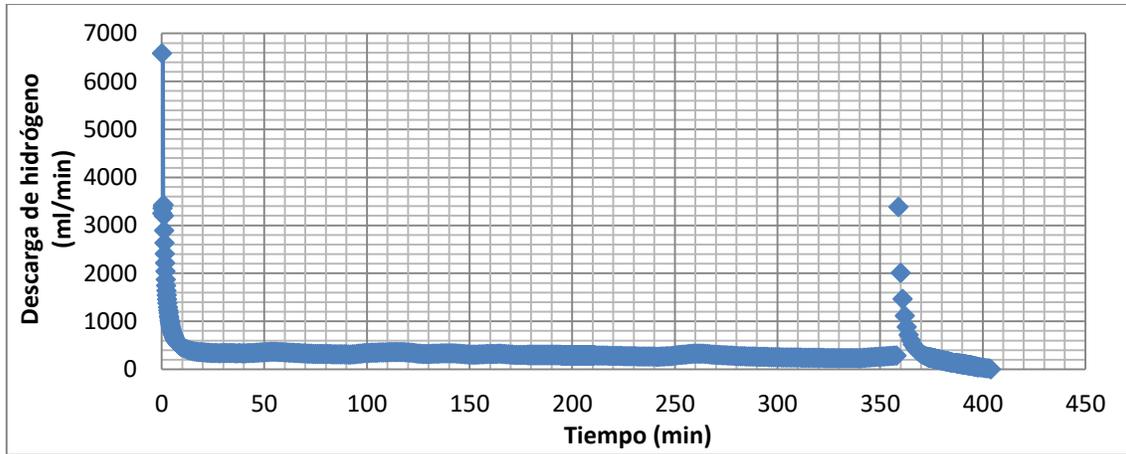


Figura 84. Comportamiento de la descarga de hidrógeno vs tiempo a un PC de 9.0 bar.

Tiempo vs temperatura de carga de tanque de hidruros metálicos

Para determinar la temperatura en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo cuando se encuentra en proceso de carga de hidrógeno se establece esta medición. En la figura 85, se muestra la temperatura de carga del tanque de almacenamiento en 4 puntos equidistantes ya antes mencionados, con respecto al tiempo de carga hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 21148 puntos conforman la gráfica, cada línea de 5287 puntos, en el eje X se muestra el tiempo medido en minutos (min) y en el eje Y se presenta la temperatura del tanque de hidruros metálicos medido en grados Celsius (°C). La menor temperatura registrada al inicio la adquisición de datos es de 27.57 °C en el termopar 4 (Tpar 4) mientras que en el termopar 1 (Tpar 1) es de 28.76 °C, en el termopar 2 (Tpar 2) es de 28.41 °C y en el termopar 3 (Tpar 3) es de 28.35 °C, en promedio se tiene una temperatura inicial de 28.27 °C, esta temperatura al paso de los 881 min que toma la carga del tanque al SP de 9.0 bar termina disminuyendo a una temperatura promedio de 25.86 °C. Al final se tuvo una tasa de cambio de 0.32 °C/min y una ganancia máxima de 12.38 °C de temperatura. Para conocer y replicar resultados de la temperatura promedio en cualquier instante del tiempo, la ecuación 58 con sus constantes, caracterizan el comportamiento promedio de la temperatura de carga (T_{carg}) con respecto al tiempo (t).

$$T_{carg}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (58)$$

Cuando $0 \leq t \leq 881$: $a = -2E-15$, $b = 6E-12$, $c = -7E-09$, $d = 4E-06$, $e = -0.0012$, $f = 0.1335$ y $g = 31.602$

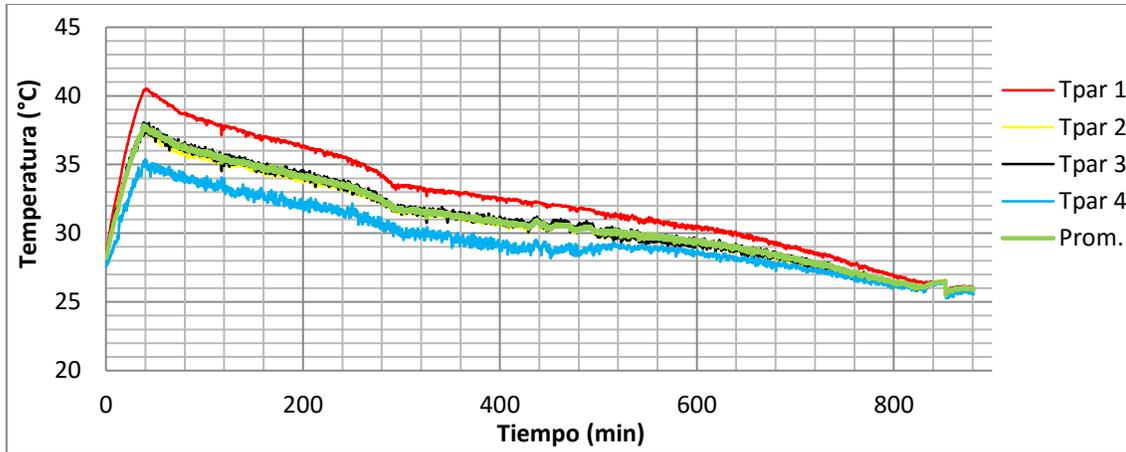


Figura 85. Comportamiento de la temperatura de carga vs tiempo a un PC de 9.0 bar.

4.7 Punto de control de 9.0 bar (2 tanques)

Tiempo vs presión

Para determinar el tiempo necesario en alcanzar el punto de control (PC) y su variación de presión mientras se suministra hidrógeno a 2 tanques de almacenamiento, se establece esta medición. En la figura 86, se presenta la evolución de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 591 puntos conforman la gráfica, donde el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación fue de 400 minutos, donde se requirieron 217 min para alcanzar la presión de 9.0 bar (sección 1) con una tasa de cambio de 0.04 bar/min, el tiempo restante se empleó en estabilizar la presión hasta que fuera constante y dejara de ingresar hidrógeno al tanque (sección 2). Para conocer y replicar resultados de la presión por unidad de tiempo, la ecuación 59 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

$$p(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (59)$$

Los resultados se dividieron en 2 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 217$: $a = 2E-12$, $b = -5E-10$, $c = 7E-09$, $d = 1E-05$, $e = -0.002$, $f = 0.151$ y $g = 0.3651$

2.- $217 < t \leq 400$: La presión se mantiene constante en 9.0 bar.

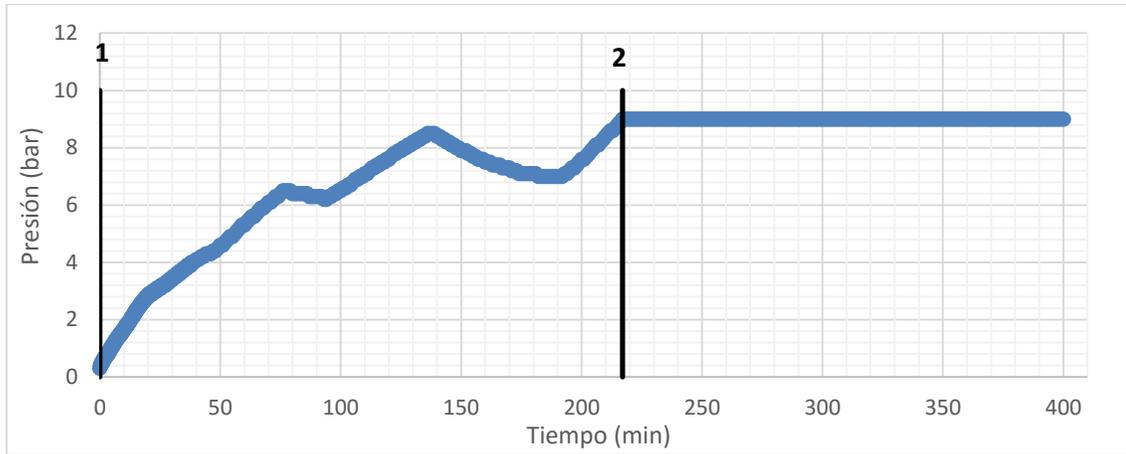


Figura 86. Comportamiento de tiempo vs presión a un PC de 9.0 bar (2 tanques).

Tiempo vs producción de hidrógeno

Para determinar la cantidad de hidrógeno producido por unidad de tiempo para 2 tanques de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 87, se muestra la evolución de la producción de hidrógeno con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC de 9.0 bar. Las mediciones tomaron 400 minutos, a partir de 217 min se obtuvo una producción promedio máxima de 591.33 ml/min (sección 1), posteriormente la producción se reduce gradualmente (sección 2), finalmente por una irregularidad del segundo tanque de almacenamiento utilizado, se presenta un comportamiento inusual hasta finalizar la producción de hidrógeno (sección 3). En total se generaron 0.37 L/min, mientras que por la integración de la curva se produjeron 149.49 L de hidrógeno equivalentes a un potencial termodinámico de 1596.33 kJ de energía. Para conocer y replicar resultados de la producción de hidrógeno en cada instante del tiempo, la ecuación 60 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la producción de hidrógeno (\dot{Q}_{prod}) con respecto al tiempo (t).

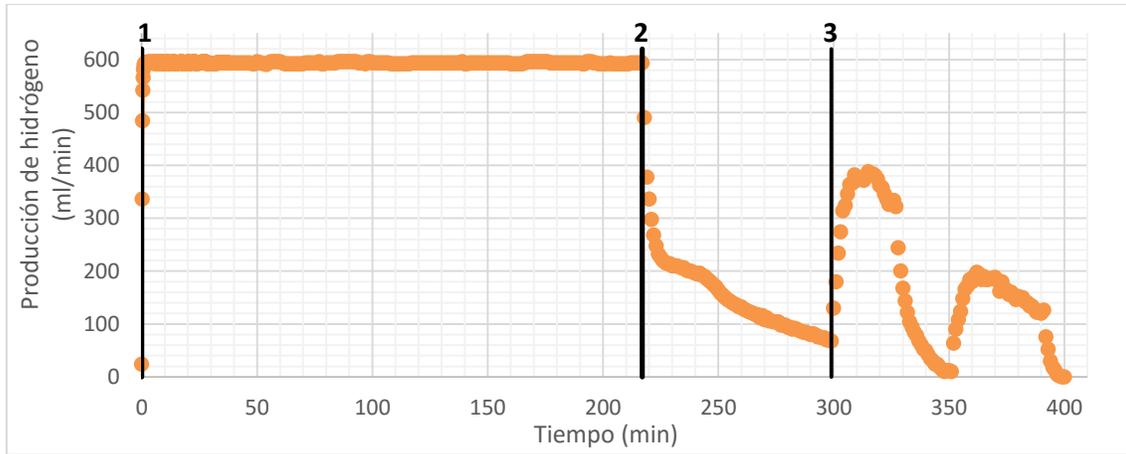
$$\dot{Q}_{prod}(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (60)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 217$: $a = -2E-10$, $b = 1E-07$, $c = -3E-05$, $d = 0.0038$, $e = -0.2266$, $f = 5.6887$ y $g = 550.19$

2.- $217 < t \leq 299$: $a = 2E-07$, $b = -0.0003$, $c = 0.1685$, $d = -58.727$, $e = 11486$, $f = -1E06$ y $g = 5E07$

3.- $299 < t \leq 400$: $a = 2E-07$, $b = -0.0003$, $c = 0.296$, $d = -137.72$, $e = 35955$, $f = -5E06$ y $g = 3E08$



Gráfica 87. Comportamiento de tiempo vs producción de hidrógeno a un PC de 9.0 bar (2 tanques).

Tiempo vs corriente eléctrica

Para determinar la corriente eléctrica por unidad de tiempo que utilizan las 2 celdas de tipo membrana de intercambio protónico (PEM) de 85 W c/u alojadas en el interior del electrolizador para cargar 2 tanques de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 88, se presenta el comportamiento de la corriente eléctrica con respecto al tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. El eje X representa el tiempo medido en minutos y en el eje Y se presenta la corriente de las celdas medida en Amperes (A). Las mediciones tomaron 400 minutos, donde hasta los 217 min se mantuvo una corriente promedio máxima en la parte de la gráfica estática de 39.61 A (sección 1), posteriormente la corriente se reduce gradualmente (sección 2), finalmente la corriente llega a 0 A con un comportamiento inusual (sección 3) debido a la irregularidad del segundo tanque de almacenamiento, en promedio se consumieron 39.61 A. Para conocer y replicar resultados de la corriente eléctrica en cada instante del tiempo, la ecuación 61 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la corriente eléctrica (I) con respecto al tiempo (t).

$$I(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (61)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

1.- $0 \leq t \leq 217$: $a = -3E-12$, $b = 2E-09$, $c = -6E-09$, $d = 7E-05$, $e = -0.0039$, $f = 0.0967$ y $g = 38.932$

2.- $217 < t \leq 299$: $a = 1E-08$, $b = -2E-05$, $c = 0.0112$, $d = -3.8853$, $e = 759.23$, $f = -78960$ y $g = 3E06$

3.- $299 < t \leq 400$: $a = 2E-09$, $b = -4E-06$, $c = 0.0029$, $d = -1.2494$, $e = 297.89$, $f = -37324$ y $g = 2E06$

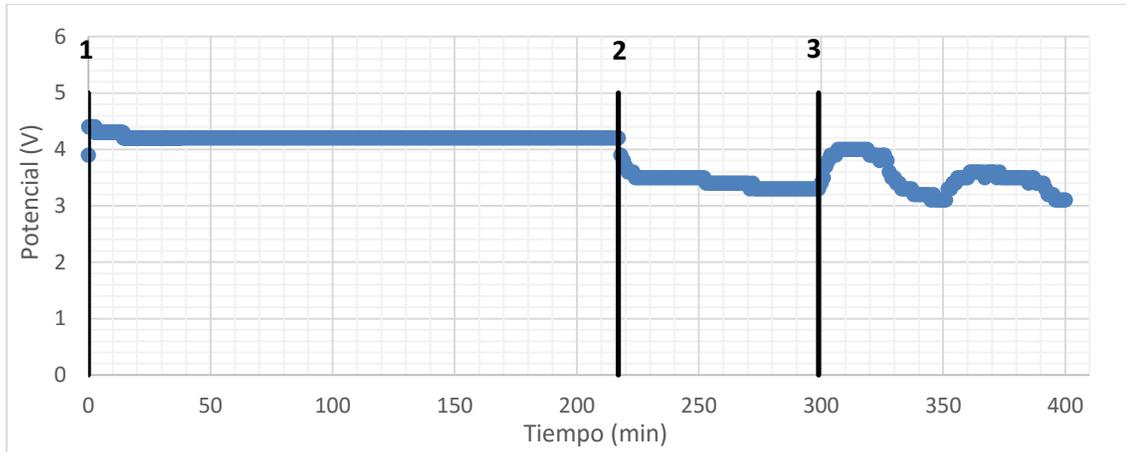


Figura 89. Comportamiento de tiempo vs potencial a un PC de 9.0 bar (2 tanques).

Tiempo vs temperatura de celdas

Para determinar la temperatura de las celdas por unidad de tiempo que se adquiere en operación del electrolizador para cargar 2 tanques de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 90, se presentan los cambios de la temperatura en las celdas con forme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. Un total de 591 puntos conforman la gráfica, el eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y. representa la temperatura de las celdas medida en grados Celsius (°C). Las mediciones tomaron 400 minutos, donde la primera medición son 40 °C de temperatura, posteriormente debido a los procesos de regulación y control de potencia en las celdas PEM internas del sistema, se presenta un comportamiento poco lineal de la temperatura, esta presenta incrementos y decrementos de forma senoidal, a los 124 min la temperatura presenta un máximo de 48 °C, y se mantiene por 15 min, finalmente la temperatura se reduce gradualmente hasta finalizar la carga de los tanques. Las celdas se mantuvieron a una temperatura de 41.97 °C. Para conocer y replicar resultados de la temperatura de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 63 con sus constantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de temperatura (T) con respecto al tiempo (t).

$$T(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (63)$$

Donde en $0 \leq t \leq 400$: $a = 5E-13$, $b = -6E-10$, $c = 3E-07$, $d = -6E-05$, $e = 0.0053$, $f = -0.1574$ y $g = 43.083$

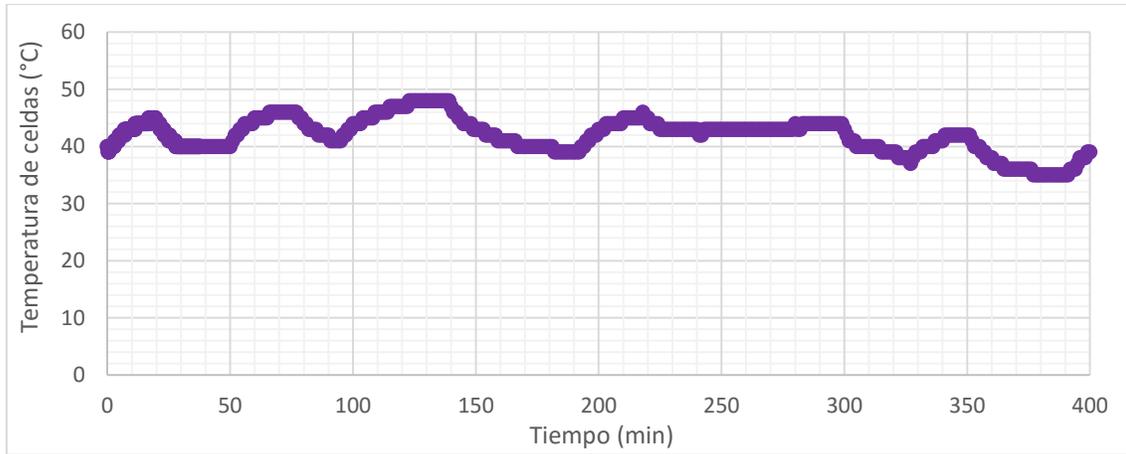


Figura 90. Comportamiento de tiempo vs temperatura de celda a un PC de 9.0 bar (2 tanques).

Tiempo vs potencia eléctrica de celdas

Para determinar la potencia eléctrica total por unidad de tiempo que se demanda para cargar los 2 tanques de almacenamiento se establece esta medición. En la figura 91, se presentan los consecuentes cambios de la potencia eléctrica conforme al paso de tiempo hasta alcanzar el PC establecido de 9.0 bar. En el eje X se muestra el tiempo medido en minutos y el eje Y representa la potencia eléctrica medida en Watts (W). Los primeros 217 min se mantuvo una potencia máxima promedio de 167.32 W (sección 1), posteriormente la producción se reduce gradualmente (sección 2), finalmente por la irregularidad del segundo tanque de almacenamiento se presenta un comportamiento inusual hasta que la potencia se reduce hasta 0 W (sección 3). Por la integración de la gráfica, se utilizaron 2178.5 kJ de energía para producir el hidrógeno. Para conocer y replicar resultados de la potencia total de las celdas en cada instante del tiempo, la ecuación 64 con sus contantes, caracterizan el comportamiento de la gráfica de potencia eléctrica (P) con respecto al tiempo (t).

$$P(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g \quad (64)$$

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

- 1.- $0 \leq t \leq 217$: $a = -6E-12$, $b = 4E-09$, $c = -8E-07$, $d = 6E-05$, $e = -1E-05$, $f = -0.1732$ y $g = 170.76$
- 2.- $217 < t \leq 299$: $a = 5E-08$, $b = -8E-05$, $c = 0.0503$, $d = -17.525$, $e = 3424.7$, $f = -356189$ y $g = 2E+07$
- 3.- $299 \leq t \leq 400$: $a = 4E-08$, $b = -9E-05$, $c = 0.0792$, $d = -36.81$, $e = 9604$, $f = -1E+06$ y $g = 8E+07$

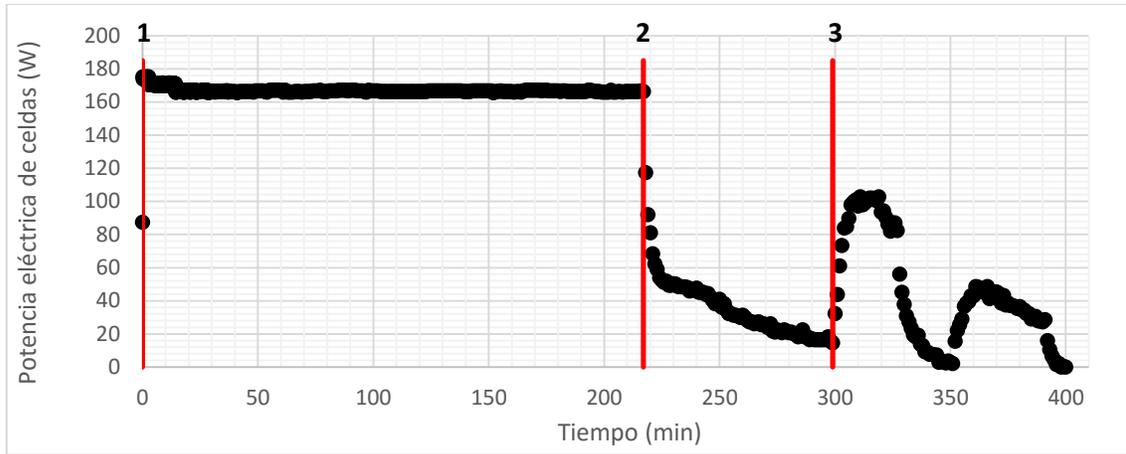


Figura 91. Comportamiento de tiempo vs potencia eléctrica de celdas a un PC de 9.0 bar (2 tanques)

4.8 Operación del sistema

Tiempo vs punto de control

Para determinar el comportamiento de operación con cualquier PC de presión en el electrolizador y su variación con el tiempo hasta finalizar el suministro de hidrógeno, se establece esta relación. En la figura 92, se presenta el comportamiento de la presión manométrica con respecto al tiempo hasta alcanzar los PC de presión. El eje X representa el tiempo medido en minutos y el eje Y la presión medida en bares. El tiempo de operación máximo fue de 881 minutos, donde se requirieron 29.83 min para finalizar la carga a 2.5 bar (sección 1), posteriormente se requieren 783.17 min para finalizar la carga a 6.5 bar (sección 2), finalmente se requirieron 68 min para finalizar la carga a 9.0 bar (sección 3). Para conocer y replicar resultados de los PC de presión por unidad de tiempo, las ecuaciones 65, caracterizan el comportamiento de la presión (p) con respecto al tiempo (t).

Los resultados se dividieron en 3 secciones, de acuerdo a su comportamiento:

$$\begin{aligned}
 1. - 0 \leq t \leq 29.83: p(t) &= 0.87041 \ln(t) - 0.46701 \\
 2. - 29.83 < t \leq 813: p(t) &= -0.00000360(t)^2 + 0.00814541(t) + 2.26022968 \\
 3.- 813 < t \leq 881: p(t) &= 0.13280017e^{0.00478562(t)}
 \end{aligned}
 \tag{65}$$

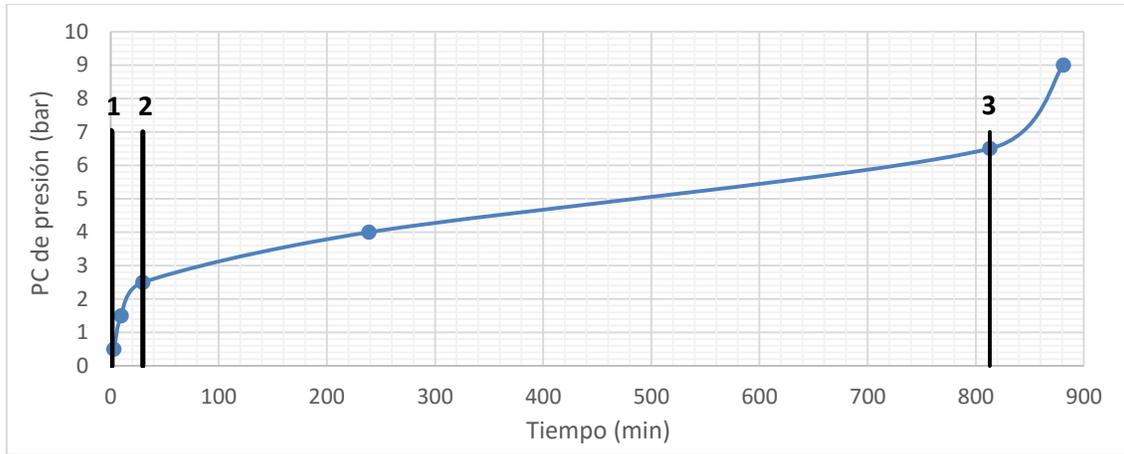


Figura 92. Comportamiento de tiempo vs PC de presión del electrolizador tipo PEM.

Punto de control vs hidrógeno producido y energía

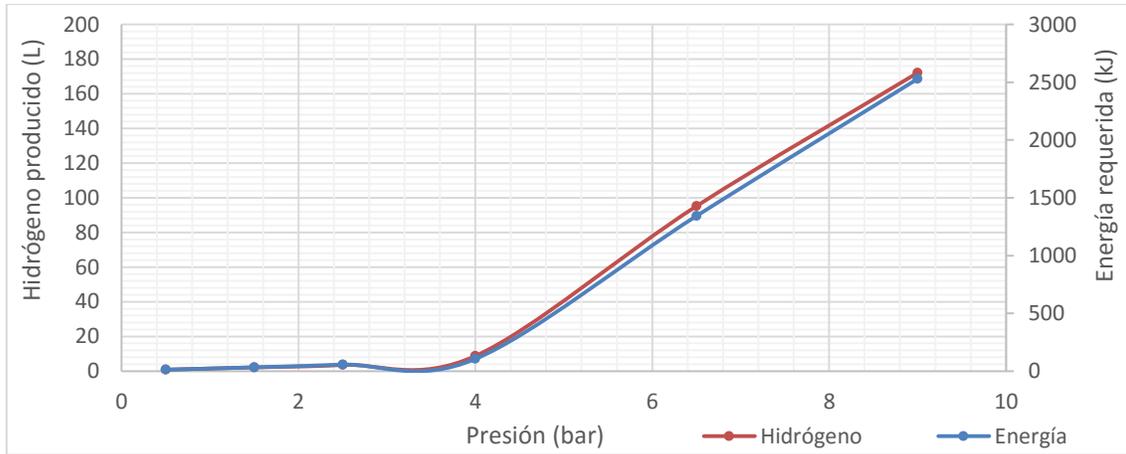
Para determinar la cantidad de hidrógeno producido en cada PC de presión y la energía utilizada en el proceso por el electrolizador tipo PEM se establece esta medición. En la figura 93, se muestra la evolución de la cantidad de hidrógeno producido y la energía requerida para generarlo respecto al PC establecido. El eje X representa el PC medido en (bar), el eje Y izquierdo el hidrógeno producido medido en litros (L) y el eje Y derecho representa la energía utilizada medida en kilojoules (kJ). La grafica presentada de hidrógeno con respecto al PC de presión y energía respecto al PC, muestran un comportamiento similar, demostrando una linealidad energética entre el hidrógeno producido y su consistencia con el PC. Debido al incremento de tiempo de operación por el electrolizador y el consumo energía requerido para comprimir el hidrógeno, a partir del PC de 4 bar, la de energía requerida y el hidrógeno producido se ve incrementado en mayor cantidad de forma lineal. Para conocer y replicar resultados del hidrógeno producido con respecto al PC y la energía requerida con en cada PC de presión, la ecuación 66 caracteriza el comportamiento del hidrógeno producido (V_{prod}) con respecto al PC (pce), y la ecuación 67 caracteriza el comportamiento de la energía requerida (Er) con respecto al PC (pce).

$$0.5 \leq pce \leq 9.0:$$

$$V_{prod}(pce) = -0.2436(pce)^4 + 4.1872(pce)^3 - 18.991(pce)^2 - 29.628(pce) - 10.33 \quad (66)$$

$$0.5 \leq pce \leq 9.0:$$

$$Er(pce) = -3.524(pce)^4 + 61.442(pce)^3 - 284.52(pce)^2 + 451.57(pce) - 158.9 \quad (67)$$



Grafica 93. Comportamiento de cantidad de hidrógeno total vs presión vs energía requerida.

Punto de control vs tasa de cambio de energía y producción

Para determinar la tasa de cambio de energía requerida para producir hidrógeno y la tasa de cambio de producción con respecto al PC de presión, se establece esta medición. En la figura 94, se presenta el comportamiento de la tasa de cambio de energía requerida para producir un mililitro de hidrógeno y la tasa de cambio de producción de hidrógeno por mililitro con respecto al PC de presión establecido. El eje X representa el PC medido en bares (bar), en el eje Y izquierdo se presenta la energía por mililitro (J/ml) y en el eje Y derecho la producción de hidrógeno por minuto (ml/min). La tendencia de energía por mililitro se encuentra entre el rango de 12 J/ml y 14 J/ml, con respecto a la velocidad de producción se tiene un rango más amplio con 0.05 ml/min hasta 0.27 ml/min. Posterior al PC de 4.0 bar, la tasa de energía por mililitro e hidrógeno por minuto, se incrementan por el tiempo de operación requerido. Para conocer y replicar resultados de la energía requerida por mililitro en cada PC y el hidrógeno producido por minuto, la ecuación 68 caracterizan el comportamiento de la energía por mililitro (Em) con respecto al PC de presión (pce) y la ecuación 69 caracteriza el comportamiento de la producción de hidrógeno por minuto (phm) con respecto al PC establecido (pce).

$$\begin{aligned}
 0.5 \leq pce \leq 4.0: Em(pce) &= -0.3912(pce)^3 + 1.9327(pce)^2 - 2.4712(pce) + 16.073 \\
 4.0 < pce \leq 9.0: Em(pce) &= -0.1155(pce)^2 + 2.0258(pce) + 5.8188 \\
 0.5 \leq pce \leq 9.0: Phm(pce) &= 0.0001(pce)^5 - 0.0038(pce)^4 + 0.037(pce)^3 - 0.1392(pce)^2 + 0.123(pce) + 0.239
 \end{aligned}
 \tag{68}$$

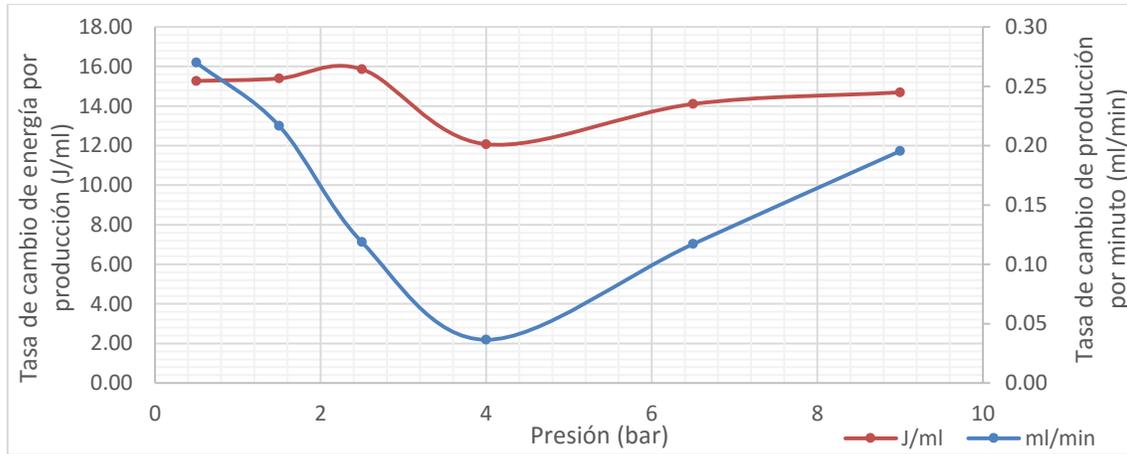


Figura 94. Comportamiento de tasa de cambio de energía por producción y producción por minuto vs PC de presión.

Hidrógeno vs energía de producción vs energía potencial

Para determinar la relación entre la energía utilizada para producir una cantidad de hidrógeno en electrolizador tipo PEM y el potencial energético que puede proporcionar el gas, se establece esta medición. En la figura 95, se presentan los cambios de la energía requerida para producir una cantidad de hidrógeno y la cantidad de energía que se pudiera extraer de ese hidrógeno almacenado. El eje X corresponde al hidrógeno producido y almacenado, el eje Y izquierdo representa la cantidad de energía utilizada para generarlo y el eje Y derecho muestra el potencial termodinámico que pudiera extraerse del hidrógeno. El comportamiento energético de ambas graficas es similar y crecen linealmente de acuerdo a la cantidad de hidrógeno con el que se cuenta. Se observa que a partir de 8.71 L (PC de 4.0 bar), en el transcurso de tener una mayor cantidad de hidrógeno, el requerimiento de energía se incrementa y a la vez la energía que se puede extraer del gas se ve disminuido, reduciendo al eficiencia energética debido al tiempo de operación y control del electrolizador. Para conocer y replicar resultados de la energía requerida para producir hidrógeno y la energía que se le pudiera extraer, la ecuación 70 caracterizan el comportamiento de la energía requerida (E_r) con respecto al hidrógeno producido (hp) y la ecuación 71 caracteriza el comportamiento del potencial energético (E_{ex}) con respecto al hidrógeno que se produjo (hp).

$$0.81 \leq hp \leq 172.13: E_r(hp) = -0.0001(hp)^3 + 0.0436(hp)^2 + 11.063(hp) + 8.6152 \quad (70)$$

$$0.81 \leq hp \leq 172.13: E_{ex}(hp) = 10.679(hp) \quad (71)$$

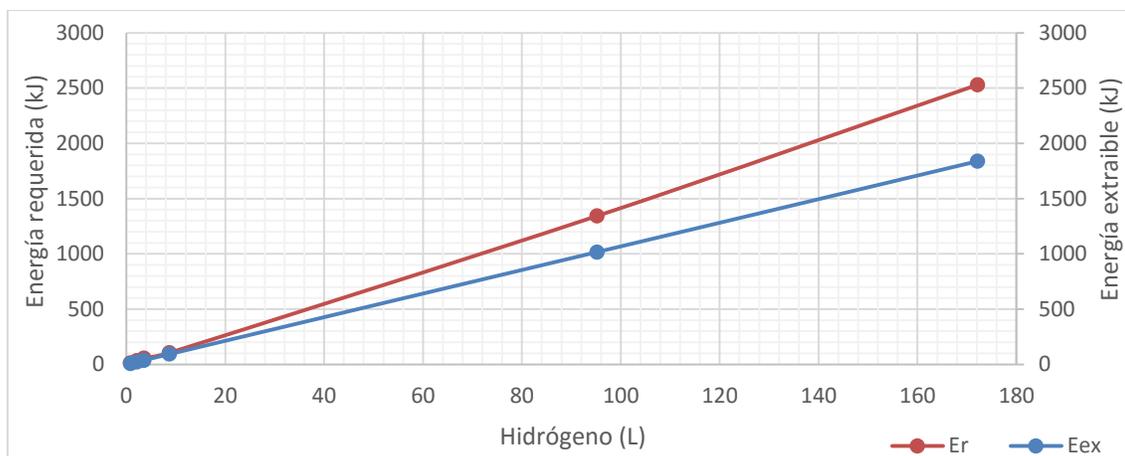


Figura 95. Comportamiento energético para producción y aprovechamiento del hidrógeno.

Tiempo vs temperatura promedio de carga y descarga de tanque

Para determinar la relación entre la temperatura promedio de carga y descarga de hidrógeno en el tanque de hidruros metálicos por unidad de tiempo en un PC de presión establecido, se establecen las siguientes mediciones. En la tabla 2 se muestra la tasa principal de incremento y decremento de temperatura en el transcurso del tiempo en cada PC establecido. Se observa que debido a un mayor PC de presión, la tasa de incremento de temperatura no tiene un comportamiento lineal mientras que la tasa de decremento si presenta una linealidad.

Tabla 2. Tasa de cambio de temperatura promedio de carga y descarga del tanque de almacenamiento

	Punto de control de presión (bar)					
	0.5	1.5	2.5	4	6.5	9
Tiempo en alcanzar la temperatura máxima (min)	3	7.33	6.66	10.5	23.83	38.33
Tasa de cambio de temperatura de carga (°C/min)	0.24	0.23	0.32	0.41	0.37	0.32
Máximo cambio de temperatura de carga (°C)	0.71	1.65	2.15	4.26	8.74	12.38
Tiempo en alcanzar la temperatura mínima (min)	3.16	3.83	5.5	14.83	17.33	N/A
Tasa de cambio de temperatura de descarga (°C/min)	0.10	0.32	0.36	0.35	0.70	N/A
Máximo cambio de temperatura de descarga (°C)	0.31	1.22	1.98	5.13	12.09	N/A

La figura 96 presenta los cambios principales de la temperatura promedio de carga (bar C) y descarga (bar D) en el tiempo de operación del tanque bajo el PC. En el eje

X se muestra al tiempo y en el eje Y la temperatura promedio del tanque. Se observa que debido al esfuerzo de operación bajo un PC establecido, el gradiente térmico se incrementa de forma lineal cuando se carga y descarga el hidrógeno.

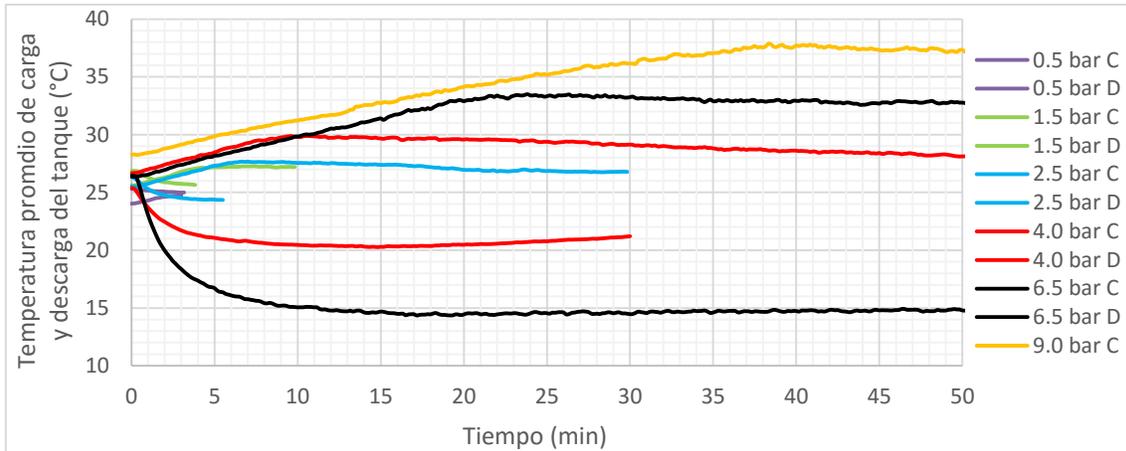


Figura 96. Temperatura promedio de carga y descarga del tanque de hidruros metálicos.

Resumen de resultados

Para simplificar los resultados esenciales de las mediciones realizadas al electrolizador tipo PEM en conexión con el tanque de hidruros metálicos y visualizar su comportamiento principal, se realizó este análisis. En la tabla 3 se muestra los comportamientos promedio de operación del sistema, descartando la variación dinámica causada en la carrera de alcanzar el PC establecido. Igualmente se dan a conocer el resultado total del área bajo la curva experimental de los datos de interés y la relación de cambio total que hay entre la energía, el tiempo y el hidrógeno.

Tabla 3. Concentrado de datos experimentales de los PC establecidos

	Punto de control de presión (bar)						
	0.5	1.5	2.5	4	6.5	9	9 (2 tanques)
	Comportamiento promedio (sin alta variación dinámica)						
Producción de hidrógeno (ml/min)	165.85	194.83	79.67	17.98	107.41	216.23	591.33
Corriente de las celdas (A)	7.16	9.55	4.02	1.1	7.18	14.22	39.61
Potencial de las celdas (V)	3.25	3.34	3.2	3.12	3.38	3.5	4.22
Temperatura de las celdas (°C)	43.42	41.4	40.78	39.4	37.66	40.05	41.97

Potencia eléctrica de las celdas (W)	26.35	36.24	14.99	3.85	24.72	52.36	167.32
Tiempo en alcanzar el PC (min)	1	3	5.16	7.83	19	35	217
-	Comportamiento total (área baja la curva, limites)						
Tiempo total de carga (min)	3	9.83	29.83	238.83	813	881	400
Hidrógeno total almacenado (L)	0.81	2.13	3.54	8.71	95.19	172.13	149.49
Energía total de producción (kJ)	12.37	32.79	56.15	105.16	1342.69	2529.14	2178.5
Hidrógeno total descargado (L)	0.33	1.12	2.6	6.04	N/A	132.51	N/A
Energía total del hidrógeno (kJ)	8.65	22.75	37.80	93.01	1016.49	1838.09	1596.33
Tiempo total de descarga (min)	3.16	3.83	5.50	30.00	300.00	404.00	N/A
-	Tasa de cambio (relación total de resultados)						
Incremento de presión por minuto (bar/min)	0.50	0.50	0.48	0.51	0.34	0.26	0.04
Energía por mililitro (J/ml)	15.27	15.39	15.86	12.07	14.11	14.69	14.57
Velocidad de carga (L/min)	0.27	0.22	0.12	0.04	0.12	0.20	0.37
Velocidad de descarga (L/min)	104.43	292.43	472.73	201.33	N/A	328.00	N/A
Eficiencia energética (%)	69.92	69.37	67.32	88.45	75.71	72.68	73.28

Conclusiones

Al comparar los resultados de los datos experimentales del sistema compuesto por un electrolizador tipo PEM y un tanque de hidruros metálicos, se obtuvieron siguientes conclusiones:

- ⦿ El tiempo de operación no se comporta linealmente a mayor PC de presión.
- ⦿ A un mayor PC de operación, la cantidad de hidrógeno total, la energía requerida para producirlo y el potencial energético del mismo, se incrementa linealmente a partir del PC de 4.0 bar de presión.
- ⦿ A un menor PC de 4.0 bar, se requiere una mayor cantidad de energía para producir cada mililitro de hidrógeno, pero se tiene linealmente una mayor producción de hidrógeno por minuto.
- ⦿ Al incrementar la presión de operación en el proceso de carga, la temperatura del tanque se incrementa en mayor proporción y en la descarga la temperatura se reduce proporcionalmente, esta variación de temperatura puede ser aprovechada para mejorar el ciclo de carga y descarga de los tanques.
- ⦿ Con 2 tanques de hidruros metálicos a un PC de 9.0 bar, lo observado fue que el tiempo de carga se redujo a la mitad, el hidrógeno generado y la energía requerida fue equivalente a lo de un tanque, y la velocidad de carga y eficiencia energética presentó un incremento sustancial.
- ⦿ La eficiencia de conversión de la energía de las celdas internas del electrolizador se mejora a un PC de 4.0 bar con 88.45%, a mayor PC, la eficiencia disminuye linealmente hasta 72.68% en un PC de 9.0 bar.

Para implementar eficientemente un sistema de almacenamiento de energía renovable en forma de hidrógeno es importante conocer el recurso energético disponible y la viabilidad tecno-económica del mismo. Se recomienda utilizar un punto de control donde la operación del sistema sea la más óptima según sea el requerimiento de hidrógeno, velocidad de carga y eficiencia energética, así como aprovechar la variación de temperatura de los tanques de almacenamiento.

Referencias

- [1] J. C. Ries, «Introduction to environmental control in the petroleum industry,» de *Environmental control in petroleum engineering*, Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1996, pp. 1-15.
- [2] P. Chefurka, «World Energy and Populations,» Pctober 2007. [En línea]. Available: <http://www.paulchefurka.ca/WEAP/WEAP.html>.
- [3] J. Conti, «International Energy Outlook 2014,» U.S Energy Informations Administration, 2014.
- [4] B. Johansson, «Security aspects of future renewable energy systemseA short,» *ELSEVIER*, pp. 1-8, 20 Agosto 2013.
- [5] J. A. Botas, J. A. Calles, J. Dufour y G. San Miguel, «Producción y almacenamiento de hidrógeno,» de *La economía del hidrógeno – Una visión flobal*, Grupo de Ingeniería Química y Ambiental. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y, 2004, pp. 1-12.
- [6] G. Nicoletti, N. Arcuri, G. Nicoletti y R. Bruno, «A technical and environmental comparison between hydrogen and some,» *ELSEVIER*, pp. 1-9, 19 Septiembre 2014.
- [7] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos y L. Meyer, «La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono,» Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, 2005.
- [8] T. N. Veziroglu y F. Barbir, «Hydrogen: The wonderful fuel,» *Pergamon*, vol. 17, nº 6, pp. 1-14, 1992.
- [9] D. Sperling y J. S. Cannon, «Introduction and overview,» de *The hydrogen energy transition*, ELSEVIER, 2004, pp. 1-21.
- [10] P. Corbo, F. Migliardini y O. Veneri, «Possible Routes Towards Carbon-Free Vehicles.,» de *Hydrogen fuel: Cells for road vehicles*, Italia, Springer, 2011, pp. 1-30.
- [11] B. Sorensen, «The current relevance of fuel cells and hydrogen,» de *Hydrogen and fuel cells*, Dinamarca, ELSEVIER, 2004, pp. 1-4.
- [12] S. Srinivasan, «ELECTRODE/ELECTROLYTE INTERFACES: STRUCTURE AND KINETICS OF CHARGE TRANSFER,» de *Fuel Cells: From fundamentals to applications*, Nueva York, Springer, 2006, pp. 27-31.
- [13] J. Larminie y A. Dicks, «Hydrogen Fuel Cells – Basic Principles,» de *Fuell Cell; Systems Explained*, Inglaterra, WILEY, 2003, pp. 1-5.

- [14] R. B. Pool, «Breve análisis ¿Por qué el hidrógeno es el combustible del futuro?,» Universidad de Quintana Roo, Chetumal, 2010.
- [15] D. Grossman, «airships,» [En línea]. Available: <http://www.airships.net/hindenburg/disaster>. [Último acceso: Octubre 2015].
- [16] M. E. G. Sánchez, «Resumen de la historia del hidrógeno,» 2003.
- [17] S. G. Karshenboim, F. S. Pavone, G. F. Bassani, M. Inguscio y T. W. Hansch, «Introduction to Simple Atoms,» de *The hydrogen atom: Precision physics of simple atomic systems*, Massachusetts, Springer, 2000, pp. 1-16.
- [18] N. Alonso-Vante, «Generalidades sobre electrocatálisis,» de *Electroquímica y electrocatálisis: Aspectos fundamentales y aplicaciones*, Buenos Aires, e_libro.net, 2002, pp. 18-25.
- [19] R. G. AGUILAR, «Conceptos básicos de las celdas de combustible,» de *Modelado y pruebas simuladas del proceso y control de la celdas de combustible*, Temixco, Instituto de Investigaciones eléctricas, 2002, pp. 16-20.
- [20] Á. Varga, «Introduction to fuel cell technology,» de *Fuel Cell Electronic Packaging*, Nueva York, Springer, 2007, pp. 1-10.
- [21] J. A. Carta González, R. Calero Perez, A. Colmenar Santos y M.-A. Castro Gil, «Aspectos básicos generales sobre los recursos energéticos,» de *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*, España, PEARSON: PRENTICE HALL, 2009, pp. 21-56.
- [22] European comission, «Hydrogen energy and fuel cells: A vision of our future,» European comission, Belgica, 2003.
- [23] Energy Technology Training Center, «Hydrogen properties,» de *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*, USA, College of the Desert, 2001, pp. 1-10.
- [24] L. G. JODRA, «El hidrógeno: Combustible del futuro,» *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 99, nº 1, pp. 1-19, 2005.
- [25] S. Rawson, «Quora,» 6 Febrero 2008. [En línea]. Available: <https://www.quora.com/If-a-cows-flatulence-is-ignited-can-it-cause-the-cow-to-explode-What-about-humans-If-theres-a-discrepancy-why#!n=12>. [Último acceso: Noviembre 2015].
- [26] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales • UPM, «energiasostenible,» 2003. [En línea]. Available: http://www.energiasostenible.net/fundamentos_hidrogeno.htm. [Último acceso: Noviembre 2015].

- [27] C. Fernandez y B. Baldia, «Propiedades del hidrógeno,» de *Energética del hidrógeno. Contexto, estado actual y perspectivas de futuro*, España, 2003, pp. 73-81.
- [28] L. G. Jodra, «El hidrógeno. combustible del futuro,» *Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 99, nº 1, pp. 50-59, 2005.
- [29] Universal Industrial Gases, INC, «UIGI,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.uigi.com/hydrogen.html>. [Último acceso: Diciembre 2015].
- [30] B. Sorensen, «Hydrogen,» *Hydrogen and fuel cells*, nº ELSEVIER, p. 5, 2004.
- [31] M. G. Zebetakis y D. S. Burguess, «Research of hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen,» *Bureau of mines report of investigation*, vol. Washington DC, 1961.
- [32] I. M. Figueroa, «Aplicaciones del hidrógeno,» de *Hidrógeno como recurso energético alternativo*, Cuatitlán, UNAM, 2014, pp. 117-169.
- [33] S. Al-Hallaj y K. Kiszynski, *Hybrid Hydrogen Systems*, Chicago, USA: Springer, 2011, pp. 1-13.
- [34] V. Khare, S. Nema y P. Baredar, «Solar-Wind hybrid renewable energy system: A review,» *ELSEVIER*, pp. 1-11, 2016.
- [35] S. Kumar, *Clean hydrogen production methods*, Miami, USA: Springer, 2015.
- [36] J. D. Velasquez Piedrahita y J. F. Quiceno Castañeda, «Obtención de hidrógeno,» de *Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis*, Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira, 2013, pp. 17-21.
- [37] C. A. Grimes, O. K. Varghese y S. Ranjan, «Hydrogen generation by Water Splitting,» de *Light, Water, Hydrogen*, Pennsylvania, Springer, 2008, pp. 35-91.
- [38] G. Chisholm, P. J. Kitson, N. D. Kirkaldy, L. G. Bloor y L. Cronin, «3D printed flow plates for the electrolysis of water: and economic and adaptable approach to device manufacture,» *Royal Society of Chemistry*, pp. 1-7, 2014.
- [39] A. Brisse, J. Schefold y M. Zahid, «High temperature water electrolysis in solid oxide cells,» *ELSEVIER*, vol. 33, nº 20, pp. 1-2, 2008.
- [40] «Possibilities for Hydrogen production by Combination of a Solar Thermal Central Receiver System and High Temperature Electrolysis of Steam,» *Proceedings of the Third International Workshop Vol. 2 High Temperature Technology and its Applications*, vol. 2, pp. 727-736, 1986.

- [41] R. v. de Krol y M. Gratzel, «Basic principles,» de *Pothoelectro-chemical Hydrogen Production*, Massachusetts, Springer, 2012, pp. 1-20.
- [42] S.-Y. Liu, J. K. Sheu, C.-K. Tseng, J.-C. Ye, K. H. C. M. L. L. y W. C. L. , «Direct photoelectrolysis of hydrogen gas generation form aqueous water using n-GaN photoelectrode,» *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 157, nº 2, pp. 1-3, 2010.
- [43] I. Akkerman, M. Janssen, J. Rocha y R. H. Wijffels, «Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design,» *ELSEVIER*, vol. 27, nº 11-12, pp. 1-2, 2002.
- [44] International Energy Agency, «Hydrogen production and storage,» *Hydrogen Implementing Agreement: Priorities and Gaps*, vol. 9, nº 1, p. 13, 2006.
- [45] J. Plou, P. Duran y J. A. Peña, «Perspectiva sobre la producción de hidrógeno por métodos emergentes,» Bol. Grupo Español Carbón, España, 2014.
- [46] hysafe, «hysafe,» [En línea]. Available: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/OFD-Chapter2>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [47] Department of Energy Hydrogen Program , «Technical Assessment: Cryo-Compressed Hydrogen Storage for Vehicular Applications,» U.S. Department of Energy Hydrogen Program , USA, 2006.
- [48] B. Granath, «NASA,» 29 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.nasa.gov/content/liquid-hydrogen-the-fuel-of-choice-for-space-exploration>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [49] B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrim y M. Hirscher, «Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review,» *ELSEVIER*, vol. 32, nº 9, pp. 1-7, 2007.
- [50] V. Gutter y A. Otto, «Recent developments in hydrogen storage applications based on metal hydrides,» *ELSEVIER*, Vols. %1 de %2293-295, pp. 1-5, 1999.
- [51] A. Goncharov, A. Guglya y E. Melnikova, «On the feasibility of developing hydrogen storages capable of adsorption hydrogen in its molecular and atomic states,» *ELSEVIER*, vol. 37, pp. 1-2, 2012.
- [52] Department of energy, «FUEL CELL TECHNOLOGIES PROGRAM: Hydrogen Storage,» *Energy efficiency and renewable energy*, vol. 1, nº 1, pp. 1-2, 2011.
- [53] L. L. Jewell y B. H. Davis, «Review of absorption and adsorption in the hydrogen–palladium system,» *ELSEVIER*, vol. 310, pp. 1-3, 2006.

- [54] EG&G Technical Services, Inc., «Technology overview,» de *Fuel Cell Handbook*, Morgantown, U.S. Department of Energy, 2004, pp. 1-36.
- [55] University of Rochester: Department of Chemical Engineering, «optics-rochester,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/cml/opt307/spr09/keith/index.htm>. [Último acceso: Enero 2016].
- [56] S. Basu, «Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell,» de *Recent trends in Fuel Cell Science and Technology*, India, Springer, 2007, pp. 40-50.
- [57] R. Nicolas, «car-engineer,» 27 11 2013. [En línea]. Available: <http://www.car-engineer.com/new-proton-exchange-membrane-fuel-cell-developed-cea-symbio-fcell/>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [58] K.-D. Kreuer, «Alkaline membrane fuel cells,» de *Fuel Cells: Selected entries from the encyclopedia of sustainability science and technology*, Nueva York, Springer, 2013, pp. 9-15.
- [59] Fuel cell Norway ANS, «fuelcell,» 2000. [En línea]. Available: http://www.fuelcell.no/principle_history_eng.htm. [Último acceso: Febrero 2016].
- [60] L. Quinfeng, H. A. Hjuler y N. J. Bejerrum, «Phosphoric acid doped polybenzimidazole membranes: Physiochemical characterization and fuel cell applications,» *Springer: Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 31, nº 7, pp. 1-5, 2001.
- [61] kawngroup renewable energy reaserachers, «kawngroup,» 2016. [En línea]. Available: <http://kawngroup.com/phosphoric-acid-fuelcell/>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [62] C. Spiegel, «Molten-Carbonate Fuel Cells (MCFCs),» de *Designing and Building Fuel Cells*, Nueva York, Mc Graw Hill, 2007, pp. 43-44.
- [63] V. P. McConnell, «renewableenergyfocus,» 13 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/41092/the-economics-of-waste-to-energy-part-i/>. [Último acceso: Febrero 2016].
- [64] C. Spiegel, «Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs),» de *Designing and*, Nueva York, Mc Graw Hill, 2007, pp. 42-43.
- [65] U. S. Department of Energy, «Fuel Cells and Renewable Hydrogen,» 12 01 2014. [En línea]. Available: <https://www.wbdg.org/resources/fuelcell.php>. [Último acceso: Febrero 2016].

- [66] S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij y L. Vasiliev, «Some introductory Technical Remarks: NATO school,» de *Mini-Micro Fuel Cells: Fundamentals and Applications*, Izmir, Turkey, Springer, 2007, pp. 1-12.
- [67] F. Urbani, G. Squadrito, O. Barbera, G. Giacoppo, E. Passalacqua y O. Zerbinati, «Polymer electrolyte fuel cell mini power unit for portable application,» *ELSEVIER*, vol. 169, nº 2, pp. 1-4, 2007.
- [68] G. R. Barbosa Pool y J. Quo, *Mini-fuel cell PEM*, Chetumal: Universidad de Quintana Roo, 2015.
- [69] A. U. Chávez-Ramírez, V. Vallejo-Becerra, J. C. Cruz, R. Ornelas, G. Orozco, R. Muñoz-Guerrero y L. G. Arriaga, «A hybrid powerplant (Solar-Wind-Hydrogen) model based in artificial intelligence for a remote-housing application in Mexico,» *ELSEVIER*, pp. 1-13, 2013.
- [70] S. E. Hosseini y M. A. Wahid, «Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,» *ELSEVIER*, pp. 1-15, 2016.
- [71] L. A. Torres, F. J. Rodríguez y P. J. Sebastian, «Simulation of a solar-hydrogen-fuel cell system: Results for different locations in Mexico,» *Pergamon*, vol. 23, nº 11, pp. 1-4, 1998.
- [72] A. U. Chávez Ramirez, J. C. Cruz, R. Espinosa-Lumbreras, J. Ledesma Garcia, S. M. Durón-Torres y L. G. Arriaga, «Design and set up of a hybrid power system (PV-WT-URFC) for a stand-alone application in Mexico,» *ELSEVIER*, pp. 1-10, 2012.
- [73] R. Barbosa, B. Escobar, V. M. Sanchez, J. Hernandez, R. Acosta y Y. Verde, «Sizing of a solar/hydrogen system for high altitude long endurance aircrafts,» *ELSEVIER*, pp. 1-8, 2014.
- [74] R. Barbosa, V. M. Sanchez, B. Escobar, J. C. Cruz y H. Toral Cruz, «Sizing of a solar-hydrogen power source for a portable emergency communication system: Case study hurricanes in Cancun, Mexico,» *ELSEVIER*, pp. 1-9, 2015.
- [75] B. Escobar, J. Hernandez, R. Barbosa y Y. Verde-Gómez, «Analytical model as a tool for the sizing of a hydrogen production system based on renewable energy: The Mexican Caribbean as a case of study,» *ELSEVIER*, pp. 1-7, 2012.
- [76] «Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone-wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico,» *ELSEVIER*, pp. 1-9, 2014.
- [77] V. M. Sanchez, R. G. Barbosa, L. G. Arriaga y J. M. Ramirez, «Real time control of air feed system in a PEM fuel cell by means of an adaptive neural-network,» *ELSEVIER*, pp. 1-12, 2014.

- [78] R. Sarrias-Mena, L. M. Fernández-Ramírez, C. A. García-Vázquez y F. Jurado, «Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems,» *ELSEVIER*, pp. 1-11, 2015.
- [79] G. R. Barbosa, Estudio teórico-experimental de la capa catalítica y su influencia en los fenómenos de transporte de una PEMFC, Cuernavaca: Instituto de Energías Renovables, 2012.
- [80] O. L. Danguillecourt, «Simulación de sistemas eólicos autónomos con almacenamiento de hidrógeno,» Instituto de Energías Renovables, Temixco, 2007.
- [81] G. H. Galvez, «Dimensionado de sistemas integrados de energía eólica/hidrógeno/celdas de combustible,» Instituto de Energías Renovables, Temixco, 2011.
- [82] National Renewable Energy Laboratory, Recommended best practices for the characterization of storage properties of hydrogen storage materials, USA: H2 Technology Consulting, 2012.
- [83] G. Gay, D. Chapelle, C. Lexcellent, D. Perreux y F. Thiebaud, «Hydrogen storage in FeTi hydrides for stationary applications: material characterization and tank thermomechanical modeling,» *IDHEA*, pp. 1-8, 14 Mayo 2014.
- [84] Horizon Fuel Cell Technologies, «User’s Manual and Operating Instructions: HydroStik Metal Hydride Cartridges,» Horizon Fuel Cell Technologies, Singapur, 2005.
- [85] S. Rahimi, M. Meratizaman, S. Monadizadeh y M. Amidpour, «Techno-economic analysis of wind turbine PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system standalone area,» *ELSEVIER*, pp. 1-15, 2014.