

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno

Trabajo de graduación presentado por:

María Regina García Méndez para optar el grado académico de Licenciada
en Ingeniería Química;

Luis Pedro Jordán García para optar al grado académico de Licenciado en
Ingeniería Química; y

José Alberto Morán Tobar para optar el grado académico de Licenciado en
Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2011

Fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno

Trabajo de graduación presentado por:

María Regina García Méndez para optar el grado académico de Licenciada en Ingeniería Química;

Luis Pedro Jordán García para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química; y

José Alberto Morán Tobar para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2011

Vo. Bo. :

(f) _____

M.Sc. Gamaliel Zambrano

Tribunal examinador:

(f) _____

M.Sc. Gamaliel Zambrano

(f) _____

Ingeniero Cristian Rossi Sosa

(f) _____

Ingeniero José Andrés Hernández Gaitán

Fecha de aprobación del examen de graduación aprobación: Guatemala 29 de noviembre de 2011.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE GRÁFICAS	ix
RESUMEN	xii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS	3
IV. ANTECEDENTES	4
V. DISEÑO.....	38
VI. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL MÓDULO DE ALMACENAMIENTO	58
VII. METODOLOGÍA	64
VIII.RESULTADOS.....	66
IX. DISCUSIÓN	83
X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
XI. BIBLIOGRAFÍA	93
XII. APÉNDICE.....	97
XIII. GLOSARIO	139

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla No. 1: Características de electrolizadores existentes.	15
Tabla No. 2: Ventajas y desventajas de los distintos tipos de electrolizadores.	17
Tabla No. 3: Propiedades termodinámicas de la electrolisis de agua a condiciones estándar.	18
Tabla No. 4: Comparación de las características entre los tanques compuestos y las micro-esferas de vidrio	19
Tabla No. 5: Características del almacenamiento de hidrógeno en forma líquida y en soluciones	20
Tabla No. 6: Materiales potenciales en consideración para el almacenamiento sólido	21
Tabla No. 7: Densidad de almacenamiento de los hidruros que reaccionan con agua	23
Tabla No. 8: Características clave de los hidruros termo-químicos.....	24
Tabla No. 9: Propiedades clave de alanatos y borohidruros seleccionados	24
Tabla No. 10: Seis métodos o fenómenos básicos de almacenamiento de hidrógeno	25
Tabla No. 11: Principales características de ciertos desecantes encontrados en el mercado	29
Tabla No. 12: Especificaciones de la celda electrolítica (stack)	45
Tabla No. 13: Especificaciones del equipo auxiliar.....	46
Tabla No. 14: Resultados de la medición de un inductor	49
Tabla No. 15: Características del transistor IGBT IRG4PH50UDPbF.....	54
Tabla No. 16: Estrategias para mantener al voltaje V_{GE} sobre el umbral	55
Tabla No. 17: Características de los componentes	57
Tabla No. 18: Cotizaciones más relevantes correspondientes al regulador de presión previo al deshumidificador.....	58
Tabla No. 19: Cotizaciones realizadas para la adquisición de los tanques de almacenamiento	60
Tabla No. 20: Cotizaciones más relevantes correspondientes al regulador de presión posterior a los tanques de almacenamiento.....	63
Tabla No. 21: Curvas de calibración de los diferentes parámetros de operación en función del amperaje del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie.....	67
Tabla No. 22: Curvas de desempeño de los diferentes parámetros de operación en función de la presión del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie.....	73
Tabla No. 23: Condiciones de operación de electrolizador PEM de cinco celdas electrolíticas correspondiente al modulo de generación.	77
Tabla No. 24: Contenido de humedad en el gas hidrógeno producido por electrólisis.....	77
Tabla No. 25: Parámetros de diseño del deshumidificador previo al almacenamiento	77
Tabla No. 26: Parámetros de operación de los tanques de hidruros metálicos	78
Tabla No. 27: Datos de curvas características del ensamblado de membrana y electrodos seleccionados, HYDRion™ N117, 25cm ² Water Electrolysis Membrane	97
Tabla No. 28: Datos de curvas características del electrolizador PEM de cinco celdas	

configuradas en serie, operando a presión atmosférica.....	97
Tabla No. 29: Datos de curvas de desempeño del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a diferentes presiones con un volumen libre de 128ml.	98
Tabla No. 30: Determinación del contenido de humedad en el hidrógeno generado por electrólisis	98
Tabla No. 31: Volumen de hidrógeno que circuló por el lecho de silica gel en 10 segundos	98
Tabla No. 32: Determinación de la densidad aparente de la silica gel utilizada como adsorbente.....	98
Tabla No. 33: Influencia de la tasa de almacenamiento en el incremento de la temperatura superficial de los tanques como consecuencia de la absorción de H ₂ en la aleación LaNi ₅	99
Tabla No. 34: Influencia de la presión de generación en la tasa de absorción de H ₂ en los tanques de almacenamiento	99
Tabla No. 35: Curvas características del ensamblado de membrana y electrodos seleccionados, HYDRion™ N117, 25cm ² Water Electrolysis Membrane.	114
Tabla No. 36: Curvas características del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica.....	115
Tabla No. 37: Continuación Tabla no. 36.....	116
Tabla No. 38: Curvas de desempeño del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a diferentes presiones con un volumen libre de 128mL.....	117
Tabla No. 39: Continuación Tabla no. 38.....	118
Tabla No. 40: Determinación de humedad del H ₂ producido a través de gravimetría.....	119
Tabla No. 41: Flujo de H ₂ circulado en el deshumidificador de silica gel.....	119
Tabla No. 42: Determinación de la densidad aparente de la silica gel utilizada como adsorbente en el deshumidificador.....	119
Tabla No. 43: Cambio de temperatura registrado en la superficie de los tanques de hidruro metálico al llevarse a cabo el almacenamiento.....	119
Tabla No. 44: Continuación de Tabla no. 43	119
Tabla No. 45: Efecto de la presión de generación en la tasa de almacenamiento de H ₂ en los tanques de hidruro metálico.....	120
Tabla No. 46: Continuación de la Tabla no. 45	120
Tabla No. 47: Métodos de control para un transistor en lado alto	138

LISTA DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica No. 1: Curva característica de voltaje vs. densidad de corriente de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°.....	68
Gráfica No. 2: Curva característica de flujo de generación de H ₂ vs. densidad de corriente de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°.....	69
Gráfica No. 3: Curva característica de flujo de generación de H ₂ vs. potencia de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°.....	70
Gráfica No. 4: Curva característica de flujo de generación de H ₂ vs. consumo energético de electrolizador PEM a 1 atm y 26°C.....	71
Gráfica No. 5: Curva característica de flujo de generación de H ₂ vs. eficiencia energética del electrolizador PEM a 1 atm y 26°C.....	72
Gráfica No. 6: Velocidad de aumento de presión de electrolizador PEM con un volumen libre de 130mL operando a 11V y 2.6A.....	74
Gráfica No. 7: Comportamiento del flujo de generación de H ₂ en función de la presión, operando a 11V y 2.6A.....	75
Gráfica No. 8: Efecto de la presión sobre la potencia del electrolizador PEM.....	76
Gráfica No. 9: Dependencia del cambio de temperatura en la superficie de los tanques con respecto a la tasa de almacenamiento de hidrógeno.....	79
Gráfica No. 10: Variación de la tasa de almacenamiento de hidrógeno con respecto a la presión del gas alimentado.....	80
Gráfica No. 11: Curva característica teórica de Voltaje vs. Densidad de corriente, proveída por el fabricante para el ensamblado de membrana y electrodos: HYDRion™ N117, 25cm ² Water Electrolysis Membrane:.....	121

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura No. 1: Principales métodos alternativos para la producción de hidrógeno.....	8
Figura No. 2: Representación esquemática de la electrólisis de agua utilizando un electrolito sólido polimérico (SPE).....	12
Figura No. 3: Representación esquemática de los tipos de electrolizadores más comunes.	16
Figura No. 4: Representación esquemática de la termodinámica de la electrólisis de agua a condiciones estándar.	17
Figura No. 5: Formación de un hidruro metálico para el almacenamiento de hidrógeno.....	22
Figura No. 6: Proceso de carga y descarga de hidrógeno molecular en hidruros metálicos	22
Figura No. 7: Árbol familiar de los hidruros metálicos	23
Figura No. 8: Densidad volumétrica y gravimétrica de almacenamiento de hidrógeno mediante distintos métodos	25
Figura No. 9: Celda de combustión	32
Figura No. 10: Detalle de reacciones dentro de una celda PEM.....	33
Figura No. 11: Caja negra de un convertidor DC/DC.....	34
Figura No. 12: Señal de entrada y salida de un convertidor DC/DC	35
Figura No. 13: Función de transferencia T(s). $ T $ vs ω (rad/s)	35
Figura No. 14: Función de transferencia T(s) de un filtro pasa baja tipo Butterworth. $ T $ vs ω (rad/s).....	36
Figura No. 15: Señal de entrada u(s), función de transferencia G(s).....	37
Figura No. 16: Vista general de algunos componentes del hardware del electrolizador PEM.....	42
Figura No. 17: Vista general de todos los componentes de cada celda electrolítica.....	43
Figura No. 18: Vista general de los separadores Gas- Líquido (Agua- Oxígeno y Agua- Hidrógeno).	44
Figura No. 19: Manómetro y válvula de aguja de sistemas de separación Gas-Líquido	44
Figura No. 20: Vista general de dispositivo generador de hidrógeno por electrólisis	45
Figura No. 21: El convertidor directo con periodo de conmutación T y ciclo de trabajo D.....	47
Figura No. 22: Nivel de distorsión máxima para la señal DC de salida	48
Figura No. 23: Sistema de filtrado en el conversor directo.....	48
Figura No. 24 y Ecuación No. 26: Circuito y función de transferencia del filtro	48
Figura No. 25 y Ecuación No. 27: Circuito RL y la solución a la ecuación diferencial correspondiente	49
Figura No. 26: Mediciones sobre el circuito RL.....	49
Figura No. 27: Gráfica de capacitancia C [μ F] vs. frecuencia de corte ω_c [rad/s].....	51
Figura No. 28: Resultados de la medición de ΔV	51
Figura No. 29: Diagrama de Bode, ganancia y fase del filtro.....	52
Figura No. 30: Conmutación con un ciclo de trabajo variado de forma sinusoidal	52

Figura No. 31: Puente H para generar la parte negativa de la señal y gráficas del voltaje en los puntos v_2 y v_{ac}	53
Figura No. 32: Circuito equivalente para un transistor IGBT canal N	54
Figura No. 33: Implementación del circuito de control tipo “capacitor flotante”	56
Figura No. 34: Esquema del prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno.....	66
Figura No. 35: Esquemático del convertidor DC/ACV	81
Figura No. 36: Esquemático de la fuente de poder de frecuencia variable	82
Figura No. 37: Hoja técnica para para ensamblado de membrana y electrodos (MEA) HYDRion™.....	122
Figura No. 38: Hoja técnica de los difusores PLATion™	123
Figura No. 39: Diagrama de dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	124
Figura No. 40 : Componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM)....	125
Figura No. 41 : Diagrama de espejos del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	126
Figura No. 42 : Diagrama de tanques separadores del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	127
Figura No. 43 : Diagrama de empaques de dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	128
Figura No. 44 : Diagrama de otros componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	129
Figura No. 45 : Arreglo de los componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).....	130
Figura No. 46: Módulo de almacenamiento confinado para el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno.....	131
Figura No. 47: Deshumidificador diseñado como etapa previa al almacenamiento del gas hidrógeno	132
Figura No. 48: Reguladores utilizados para el control de la presión de alimentación a los tanques de almacenamiento y de descarga hacia la celda de combustión.....	133
Figura No. 49: Tanques utilizados para el almacenamiento sólido del hidrógeno generado por electrólisis	134
Figura No. 50: Resto de partes que conforman el módulo de almacenamiento en el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno.....	135
Figura No. 51: Deshumidificador y tanques de almacenamiento de hidruro metálico $LaNi_5$	136
Figura No. 52: Regulador de presión que controla la presión de alimentación al tanque de almacenamiento	136
Figura No. 53: Regulador de presión que controla la presión de alimentación a la celda de combustión	137

RESUMEN

El presente megaproyecto consiste en desarrollar un prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS, por sus siglas en inglés) a base de hidrógeno desde su diseño, construcción hasta la integración de distintas tecnologías de generación, almacenamiento y consumo de hidrógeno.

El prototipo consta de un dispositivo generador de hidrógeno mediante electrólisis de agua desmineralizada, un deshumidificador, una estación de almacenamiento con tanques de hidruro metálico recargables, una celda de combustión y un inversor de corriente.

El electrolizador consiste en cinco celdas electrolíticas que utilizan membranas de intercambio de protones (PEM) como electrolito, electrodos ensamblados a la membrana (MEAs), difusores de titanio, empaques de neopreno y placas bipolares de acero inoxidable 304. Estas celdas se encuentran arregladas en una configuración en serie teniendo diferente polaridad en cada cara del plato bipolar.

El módulo de almacenamiento consta de distintos elementos, entre ellos: un regulador que controla la presión de carga del tanque de almacenamiento, un deshumidificador que utiliza silica gel como desecante, dos tanques de hidruros metálicos recargables y un último regulador de presión que controla la presión de entrada hacia la celda de combustión. La aleación tipo AB₅, de baja temperatura, LaNi₅ es adecuada para almacenar el hidrógeno producido mediante electrólisis de manera eficiente, segura y con un bajo costo de operación.

El módulo de conversión de energía consiste en un inversor de corriente que convierte la energía eléctrica de corriente directa generada en la celda de combustión a corriente alterna sinusoidal. Así como una fuente de alimentación eléctrica de frecuencia variable que no se utilizó en el prototipo final debido a que las MEAs únicamente trabajan con corriente directa.

Se recomienda utilizar el presente trabajo como base para el desarrollo de este tipo de sistemas.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudió las diferentes tecnologías disponibles en el mercado para la generación, almacenamiento y consumo de gas hidrógeno con el fin de diseñar, construir e integrar un prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS, por sus siglas en inglés) a base de hidrógeno.

El prototipo se construyó con el fin de suministrar energía eléctrica a un pequeño consumidor cuando exista un corte en la fuente principal de energía.

La metodología seguida consistió en definir los objetivos del proyecto y parámetros de operación del prototipo, una extensa revisión bibliográfica, planificación y diseño, construcción y evaluación del diseño y por último, retroalimentación.

El electrolizador PEM puede operar a una presión de hasta 1.31 MPa (190 psi), generando hidrógeno a un flujo de 101 mL/min con una humedad de 27% p/p, consumiendo 30 Watts de potencia. Su eficiencia energética promedio es de 62%.

La temperatura e intervalo de presión de carga de los tanques de almacenamiento es de $(26\pm 1)^{\circ}\text{C}$ y de 0.69 a 1.31MPa, respectivamente. Incluyendo, que el flujo de descarga máximo de hidrógeno es de 2 a 3 L/min, siendo 2.8L/min el flujo requerido por la celda de combustión para generar 200W.

La potencia máxima entregada por el inversor DC/AC sinusoidal es de 170W, y es capaz de alimentar dispositivos que utilicen 120 VAC a 60Hz.

II. JUSTIFICACIÓN

Dadas las fuertes demandas de energía, y la alta contaminación que las actuales fuentes producen; existe un fuerte grupo de investigadores en todas partes del mundo que buscan maneras de hacer más eficiente el ciclo energético. Este ciclo, que conlleva: producción, transporte y consumo de energía, debe mantener un equilibrio con el ambiente.

Hoy en día la Humanidad se encuentra en el apogeo de las energías alternativas, producto del alto impacto ambiental y de las altas demandas junto con la escasez de los hidrocarburos fósiles. Estos combustibles no sólo inciden de forma negativa en la economía mundial sino también son los responsables de las emisiones de gases efecto invernadero, desestabilizando los ecosistemas y atentando contra la vida de todas las especies en el planeta.

El hidrógeno ocupa la mayor parte del planeta a través del agua. En estos últimos años se ha logrado un avance científico y tecnológico, que lo hacen un fuerte candidato a ser el futuro “medio de transporte” de energía. Esta energía se utiliza mediante el intercambio de protones. No debe confundirse al hidrógeno con una “fuente de energía”, en cambio, el hidrógeno es un medio por el cual se almacena energía y luego se utiliza por medio del intercambio de protones.

Además, es importante recalcar que las tecnologías de acumuladores, baterías y sistemas de alimentación ininterrumpida se han estancado, por lo que el hidrógeno ha venido a jugar un papel muy importante como propuesta atractiva para el almacenamiento de grandes cantidades de energía, confinada en volúmenes pequeños de forma química

El almacenamiento gaseoso de hidrógeno requiere un gran volumen y/o peso de los cilindros, mientras que el almacenamiento en estado líquido requiere de un proceso costoso de licuefacción junto con la gran cantidad energía que éste conlleva. Al utilizar hidruros como método sólido de almacenamiento se puede almacenar una cantidad significativa de hidrógeno y liberarla conforme a la demanda de la celda de combustión. Los hidruros ofrecen una alta densidad volumétrica de almacenamiento (alrededor de $150\text{kg H}_2/\text{m}^3$) a temperatura ambiente y a una presión significativamente inferior (alrededor de 20 bar) a la utilizada en cilindros de gas comprimido (150 – 200 bar). Siendo una opción ejecutable y segura aunque costosa debido a que la tecnología aún no es masiva.

La importancia de este trabajo de graduación es que un UPS a base de hidrógeno utiliza reactivos mucho más amigables con el ambiente. El desecho es vapor de agua, y la alimentación es agua desmineralizada. Además, los componentes del dispositivo pueden reciclarse sin peligro.

III. OBJETIVOS

A. Generales

1. Estudiar las diferentes tecnologías disponibles en el mercado para la generación, almacenamiento y consumo de gas hidrógeno.
2. Comprobar la factibilidad técnica de desarrollar una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a partir de la integración de tecnologías en diferentes módulos de generación, almacenamiento y consumo de gas hidrógeno.
3. Diseñar, construir e integrar un prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno.

B. Específicos

1. Módulo de generación
 - a. Desarrollar, construir e integrar un dispositivo generador de hidrógeno mediante el principio de electrólisis para un sistema de alimentación ininterrumpida de energía eléctrica (UPS, por sus siglas en inglés) a base de hidrógeno.
2. Módulo de almacenamiento
 - a. Diseñar e integrar el sistema de almacenamiento de hidrógeno de una forma segura y eficiente en el sistema de alimentación ininterrumpido (UPS, por sus siglas en inglés) a base de hidrógeno.
3. Módulo de conversión de energía
 - a. Diseñar un sistema de conversión de energía eléctrica de corriente directa (DC) suministrada por una celda de combustión (CFC) a corriente alterna sinusoidal (AC).
 - b. Diseñar una fuente e alimentación eléctrica de frecuencia variable para una celda electrolítica.

IV. ANTECEDENTES

A. FUENTE ININTERRUMPIDA DE ENERGÍA

Los sistemas de alimentación ininterrumpida tienen como objetivo primordial aumentar la fiabilidad de otros sistemas más complejos. Esto no puede ser garantizado de manera absoluta. Interrupciones en la alimentación deben ser esperadas a veces.

Estas interrupciones pueden ser bastante desastrosas en el caso de cargas sensibles, como computadoras, las cuales son utilizadas en miles de procesos hoy en día. Además, este tipo de tecnología necesita una electricidad estable y libre de picos.

La necesidad de electricidad estable, libre de picos y continua es cada vez mayor en el mundo. En los últimos 100 años las entidades ya sea individuales u organizaciones se han ido acostumbrando a la idea que la electricidad siempre va a estar disponible.

En Inglaterra y la mayoría de los países industrializados, una falta completa de electricidad es un evento que ocurre muy rara vez. La fiabilidad de los sistemas es abrumadoramente buena, a excepción de condiciones climáticas muy adversas. Sin embargo, a través de un diseño cuidadoso y una buena planificación, estos eventos pueden ser minimizados considerablemente.

El balance entre los costos y los beneficios de un sistema con alta fiabilidad es un criterio que debe decidirse en base al análisis de cada caso.

No es un escenario realista esperar que el proveedor de electricidad, el que la transmite y el que la distribuye tengan sistemas ininterrumpidos de alimentación. Por eso se realizan sistemas más pequeños sólo para los procesos delicados de cada organización.

No todos los UPS tienen la misma tecnología, la gran mayoría utiliza baterías de níquel-cadmio, los de alto rendimiento litio y los más modernos utilizan hidrógeno.

1. Tipos de UPS por función

a. UPS de corriente continua: Las cargas conectadas a los UPS requieren una alimentación de corriente continua, por lo tanto estos transformarán la corriente alterna de la red comercial a corriente continua y la usarán para alimentar la carga y almacenarla en sus baterías. Por lo que no requieren convertidores entre las baterías y las cargas.

b. UPS de corriente alterna: Estos UPS obtienen a su salida una señal alterna, por lo que necesitan un inversor para transformar la señal continua que proviene de las baterías en una señal alterna.

c. SAI en estado de espera (Stand-by Power Systems): Este tipo de SAI activa la alimentación desde baterías automáticamente cuando detecta un fallo en el suministro eléctrico.

d. SAI en línea (on-line): Alimenta el ordenador de modo continuo, aunque no exista un fallo con el suministro eléctrico y al mismo tiempo recarga sus baterías, este dispositivo tiene la ventaja de que ofrece una tensión de alimentación constante.

2. Tipos de UPS por tipo de almacenamiento

a. Almacenamiento cinético: En la antigüedad se utilizaban volantes con alto almacenamiento de energía cinética el cual era conectado y desconectado a través de clutchs. Este volante podría mantener el movimiento por unos cuantos segundos lo suficiente para encender un generador.

b. Almacenamiento potencial: Utilizando grandes resortes es posible almacenar energía potencial que puede ser liberada en caso haya una falta en la alimentación principal. Esta liberación puede arrancar un generador.

c. Almacenamiento químico: Es la más utilizada porque presenta ventajas de tipo costo/tamaño y fiabilidad. Entre estas existen almacenamientos a través de distintos materiales. Los más comunes son baterías de níquel-cadmio y litio. En los últimos años se ha estado utilizando hidrógeno el cual tiene alta densidad energética y es amigable con el ambiente.

B. GENERALIDADES DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno es el elemento más simple, ligero y abundante en el Universo constituyendo aproximadamente un 75% de su masa. Es representado por el símbolo “H” siendo el primer elemento en la tabla periódica con un número atómico de 1. Este forma compuestos con la mayoría de los elementos y está presente en la naturaleza en forma de agua, compuestos orgánicos e inorgánicos. (COD. 2001)

Además, el gas hidrógeno (H₂) es un compuesto diatómico descubierto por Boyle en 1671 y nombrado por el químico francés Antoine Lavoiser a partir de la palabras griegas que significan “formador de agua”. Este compuesto diatómico con sorprendentes propiedades energéticas es encontrado en la atmósfera a niveles de trazas por lo que se ha tenido que sintetizar a partir de hidrocarburos y agua donde constituye la fracción más ligera de la molécula. (COD. 2001)

1. Propiedades generales del elemento:

- a. *Nombre:* Hidrógeno
- b. *Símbolo:* H

- c. *Numero atómico:* 1
- d. *Categoría:* No Metal
- e. *Peso atómico:* 1.00794 g/mol
- f. *Configuración electrónica:* $1s^1$

(COD. 2001)

2. Propiedades físicas (H₂):

a. *Estado:* El hidrógeno posee el segundo punto de ebullición y punto de fusión más bajos de todas las sustancias después del helio.

b. *Punto de ebullición:* 20 K; -423 °F; -253 °C.

c. *Punto de fusión:* 14 K; -434 °F; -259 °C.

d. *Olor, color y sabor:* El hidrógeno puro es inoloro, incoloro y sin sabor. Una fuga de hidrógeno es imperceptible a la luz. El compuesto mercaptano es utilizado para sensibilizar el gas natural pero no se le debe adicionar al hidrógeno destinado a celdas de combustión debido a que el sulfuro contamina las celdas.

e. *Toxicidad:* El hidrógeno no es tóxico pero puede actuar como un asfixiante simple desplazando todo el oxígeno en el aire.

f. *Asfixia (anoxia):* Niveles de oxígeno por debajo de 19.5% tiene efectos negativos en la salud de los seres humanos. Concentraciones por debajo de 12% ocasiona pérdida de conciencia inmediata sin ningún síntoma de alerta.

g. *Otros gases acompañados:* Los gases que acompañan al hidrógeno producido del reformado de combustibles fósiles como nitrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y otros, también pueden producir anoxia. Además, el monóxido de carbono es un gas venenoso convirtiéndolo en un gran peligro para la salud.

1) Monóxido de carbono: La afinidad de este en la hemoglobina es de 200 a 300 veces más grande que la afinidad del oxígeno. Como resultado, la inhalación de monóxido de carbono restringe la cantidad de oxígeno en el torrente sanguíneo dando lugar a la asfixia. Una exposición del 1200 ppm representa un peligro inmediato sin síntomas de alerta.

h. *Densidad:* Los valores de densidad sólo tienen sentido a una temperatura y presión determinada ya que estos parámetros afectan la compactación del arreglo de moléculas.

1) Densidad de vapor: 0.08376 kg/m³ (20°C y 1 atm).

2) Densidad de líquido: 70.8 kg/m³ (punto de ebullición y 1 atm).

i. *Volumen específico:* es el inverso de la densidad.

1) Volumen específico de vapor: 11.9 m³/kg (20°C y 1 atm).

2) Volumen específico de líquido: 0.014 m³/kg (punto de ebullición y 1 atm).

j. *Gravedad específica*: Es una forma común de expresar la densidad relativa, consiste en la razón entre la densidad del gas o líquido y una sustancia de referencia (aire o agua), ambas a la misma temperatura y presión.

1) **Gravedad específica vapor**: 0.0696 (aire)

2) **Gravedad específica agua**: 0.0708 (agua)

k. *Factor de expansión*: Esta es la razón entre el volumen al que un gas o líquido es almacenado y el volumen del mismo gas o líquido a presión y temperatura atmosférica. Para el hidrógeno el factor de expansión es 1:848.

l. *Fugas*: Las moléculas de gas hidrógeno (H_2) son más pequeñas que otros gases, y se puede difundir a través de muchos materiales que se consideran herméticos o impermeables. Esta propiedad hace del hidrógeno un gas difícil de contener. Las fugas de hidrógeno son peligrosas debido a su alto riesgo de inflamabilidad cuando este se mezcla con aire. Sin embargo, el pequeño tamaño de las moléculas que incrementan la probabilidad de fugas también resulta en una alta volatilidad y difusividad, ocasionando que las fugas de gas se eleven y se diluyan rápidamente, especialmente en el exterior.

m. *Energía*: El hidrógeno libera una cantidad arreglada de energía cuando reacciona completamente con oxígeno para formar agua.

1) **Valor de calor alto (HHV)**: Considera el calor requerido para vaporizar el combustible al igual que el calor necesario para vaporizar el agua producida durante la reacción. 61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g).

2) **Valor de calor bajo (LHV)**: No considera el calor requerido para vaporizar el combustible al igual que el calor necesario para vaporizar el agua producida durante la reacción. 51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g).

3) **Densidad de energía**: Denota la cantidad de energía del hidrógeno por unidad de volumen determinado, es el producto entre el valor de calor bajo y la densidad del gas.

a) **Densidad de energía (gas)**: 270 Btu/ft³ (10,050 kJ/m³)

b) **Densidad de energía (líquido)**: 227,850 Btu/ft³ (8,491,000 kJ/m³).

n. *Inflamabilidad*:

1) **Punto de ignición**: < -423 °F (<-253 °C; 20 K)

2) **Rango de inflamabilidad**: 4-75%

3) **Rango de explosividad**: 15-59%

4) **Temperatura de auto ignición**: 585 °C

5) **Octanaje**: 130

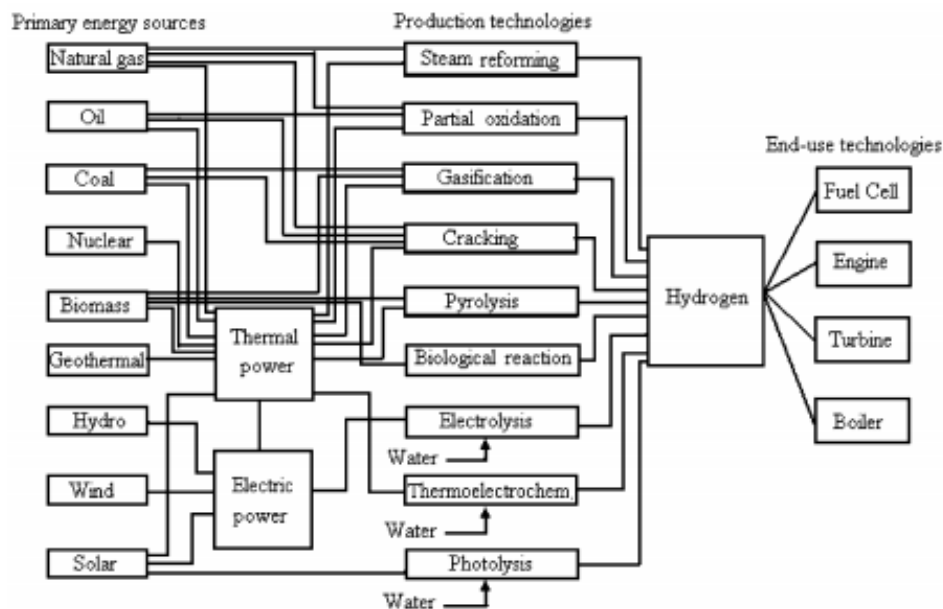
6) **Características de la llama**: La llama de hidrógeno es azul pálida y casi invisible a la luz debido a la ausencia de hollín e impurezas.

(COD. 2001)

3. **Preparación**: El hidrógeno puede ser generado a través de distintas formas, como procesos electroquímicos, termoquímicos, fotoquímicos, fotocatalíticos o foto-electroquímicos. Los principales

métodos alternativos de generación de hidrógeno a partir de distintas fuentes energéticas se muestran en la siguiente figura: (Balat, 2009)

Figura No. 1: Principales métodos alternativos para la producción de hidrógeno



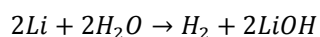
Fuente: Boehm et al. 2003

A continuación se explica con más detalle algunos de ellos:

a. *Electrólisis*: A través del suministro de energía eléctrica desde una fuente externa, el agua se puede descomponer en hidrógeno y oxígeno.

b. *Acción con metales*: Los metales alcalinos como: litio, sodio y potasio reaccionan de manera violenta con el agua a temperatura ambiente, generando hidrógeno. (O'Leary, 2000)

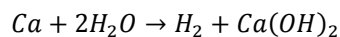
Ecuación No. 1



(O'Leary, 2000)

El calcio reacciona con el agua de manera más lenta a menos que ésta se encuentre a altas temperaturas, dándose la misma de manera más vigorosa. (O'Leary, 2000)

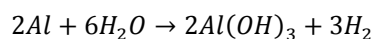
Ecuación No. 2



(O'Leary, 2000)

c. *Descomposición de agua*: El agua fría se descompone al estar en contacto con amalgama de aluminio. (O'Leary, 2000)

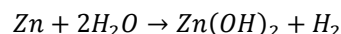
Ecuación No. 3



(O'Leary, 2000)

El agua caliente se descompone utilizando zinc y cobre. (O'Leary, 2000)

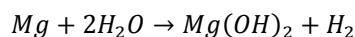
Ecuación No. 4



(O'Leary, 2000)

El agua en su punto de ebullición se descompone lentamente al entrar en contacto con magnesio en polvo. (O'Leary, 2000)

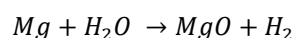
Ecuación No. 5



(O'Leary, 2000)

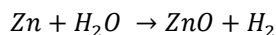
El vapor se descompone cuando se pasa por magnesio, zinc y hierro sobre-calentados. (O'Leary, 2000)

Ecuación No. 6



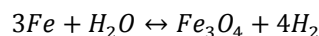
(O'Leary, 2000)

Ecuación No. 7



(O'Leary, 2000)

Ecuación No. 8

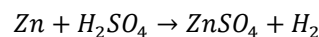


(O'Leary, 2000)

La última reacción es reversible dependiendo de las condiciones experimentales. (O'Leary, 2000)

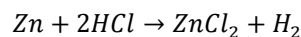
d. *Acción con ácidos*: Una solución de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico diluido se añade a gránulos de zinc. En solución se forma sulfato de zinc o cloruro de zinc y el hidrógeno que se genera se recolecta en un canal. (O'Leary, 2000)

Ecuación No. 9



(O'Leary, 2000)

Ecuación No. 10



(O'Leary, 2000)

Debido a que el hidrógeno es más ligero que el aire, también puede ser recolectado.

C. TEORÍA DE ELECTRÓLISIS

Las investigaciones de Michael Faraday (1812-1867) llevaron al descubrimiento de las relaciones cuantitativas entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una solución y la cantidad de materia separada o precipitada en los electrodos. Estas relaciones quedan concretadas en dos leyes: (Mantell, 1980)

1. Leyes de la electrólisis, establecida por Faraday:

a. *Cualitativamente:* Una cantidad de energía eléctrica, por pequeña que sea, basta para realizar la descomposición electrolítica, lo que prueba que la ionización es anterior al paso de la corriente. (Fouillé, 1979)

Por otra parte, los productos de la descomposición aparecen en seguida que pasa la corriente y únicamente sobre los electrodos, prueba de que los iones preexistentes se transforman allí en átomos. (Fouillé, 1979)

b. *Cuantitativamente:* La igualdad de las cargas de todos los iones convertidos en átomos entraña la proporcionalidad de la masa de la especie depositada, a la cantidad de electricidad que ha pasado a través del electrodo. (Fouillé, 1979)

Ecuación No. 11

$$m = \frac{QM}{z_+F}$$

m es la masa de la sustancia liberada en un electrodo en gramos

Q es la carga eléctrica total que pasa a través de la sustancia

F = 96487 C mol⁻¹ es la constante de Faraday

M es la masa molar de la sustancia

z es el número de valencia de los iones de la sustancia (electrones transferidos por iones).

(Levine, 2004)

Al parecer, no hay excepciones a ésta ley; es independiente de la concentración del electrolito, y se cumple a cualquier temperatura y para cualquier clase de disoluciones. Asimismo, tanto se cumple en los conductores electrolíticos sólidos como en las sales fundidas. (Mantell, 1980).

El voltaje proveído es necesario únicamente para hacer pasar la corriente a través de la celda, éste no tiene relación con la cantidad de gas producida. El sobrevoltaje necesario para iniciar la producción de gas se determina considerando el material de los electrodos, densidad de corriente, espaciamento entre electrodos y la conductividad del electrolito. Entre menor sea el espaciamento entre electrodos menor será el voltaje aplicado. (Mantell, 1980).

La conductividad eléctrica es un fenómeno de transporte en el cual la carga eléctrica (en forma de electrones o iones) se mueve a través del sistema. La conductividad y la resistividad dependen de la composición del conductor, pero no de sus dimensiones. La resistencia depende de las dimensiones del conductor, así como del material de éste. Para muchas sustancias, la conductividad es independiente de la magnitud del campo eléctrico aplicado y por tanto es independiente de la magnitud de la densidad de corriente. Se dice que tales sustancias obedecen la ley de Ohm. La ley de Ohm establece que la conductividad permanece constante cuando la magnitud del campo eléctrico cambia. Los metales obedecen la ley de Ohm. Las disoluciones de electrolitos obedecen la ley de Ohm, con la condición de que el campo

eléctrico no sea extremadamente alto y se mantengan las condiciones de estado estacionario. (Levine, 2004)

D. ELECTRÓLISIS DE AGUA

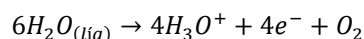
La electrólisis del agua es la descomposición de agua (H_2O) en gas de oxígeno (O_2) e hidrógeno (H_2) por medio de una corriente eléctrica a través del agua. Este proceso electrolítico es raramente usado en aplicaciones industriales debido a que el hidrógeno puede ser producido a menor costo por medio de combustibles fósiles. (Mantell, 1980)

Una fuente de poder eléctrica es conectada a dos electrodos, o dos platos (típicamente hechos de algún metal inerte como el platino o acero inoxidable), los cuales son puestos en el agua. En una celda propiamente diseñada, el hidrógeno aparecerá en el cátodo (el electrodo negativamente cargado, donde los electrones son bombeados al agua), y oxígeno aparecerá en el ánodo (el electrodo positivamente cargado). La cantidad de hidrógeno generado es el doble que la de oxígeno, y ambas son proporcionales al total de carga eléctrica que fue enviada por el agua. Sin embargo, en varias celdas las reacciones del lado competidor dominan, resultando en diferentes productos. (Mantell, 1980)

La electrolisis de agua pura requiere una gran cantidad de energía extra en forma de sobrepotencial para romper varias barreras de activación. Sin esa energía extra, la electrólisis de agua pura ocurre muy lentamente si es que logra suceder. Esto es en parte debido a la limitada autoionización del agua. El agua pura tiene una conductividad eléctrica alrededor de una millonésima parte de la del agua de mar. Varias celdas electrolíticas pueden no tener los electrocatalizadores requeridos. La eficacia de la electrólisis aumenta con la adición de un electrolito (como la sal, un ácido o una base) y el uso de electrocatalizadores. (Mantell, 1980)

En el ánodo, el agua se disocia en oxígeno, iones hidronio y electrones: (Laoun, 2007)

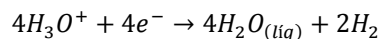
Ecuación No. 12



(Laoun, 2007)

En el cátodo, a medida que los iones hidronio migran a través de la membrana se recombinan con los electrones, forman gas hidrógeno y agua: (Laoun, 2007)

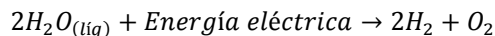
Ecuación No. 13



(Laoun, 2007)

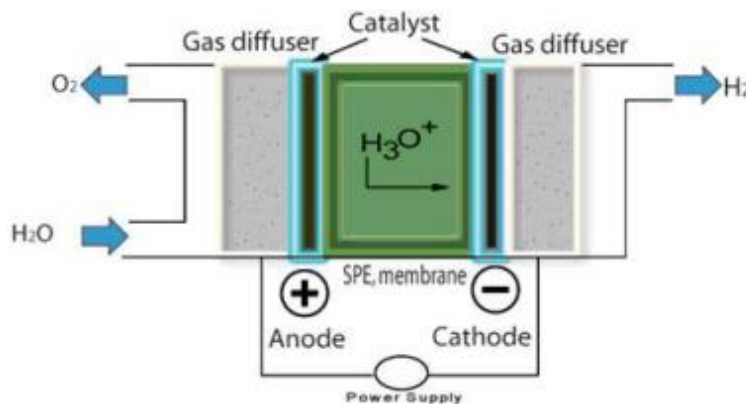
La reacción global que es la suma de las dos anteriores, se escribe: (Laoun, 2007)

Ecuación No. 14



(Laoun, 2007)

Figura No. 2: Representación esquemática de la electrólisis de agua utilizando un electrolito sólido polimérico (SPE)



Fuente: Laoun, 2007. p.436

Bajo condiciones de temperatura y presión constantes, la cantidad máxima de trabajo es igual a la energía de Gibbs del sistema, ΔG . Esta se define como: (Sequeira, 2010)

Ecuación No. 15

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

(Sequeira, 2010)

Donde ΔH denota el contenido calórico o entalpía del sistema, T es la temperatura del sistema y ΔS es el cambio en la magnitud de desorden o entropía que ocurre en las moléculas involucradas durante la reacción. (Sequeira, 2010)

El cambio en la energía libre de Gibbs es un indicador útil de la espontaneidad de las reacciones electroquímicas (o químicas): i) Si ΔG es positivo, el proceso no es espontáneo pero se puede llevar a cabo aplicando la energía suficiente proveniente de los alrededores. ii) Si ΔG es negativo, el proceso se puede llevar a cabo de manera espontánea y realizar trabajo hacia los alrededores, iii) Si ΔG es cero, el sistema está en equilibrio ya que la cantidad de trabajo realizado al proceso y por el proceso son iguales. La categoría i) aplica para la electrólisis del agua y ii) para el proceso reversible, que se lleva a cabo en una celda de combustión. (Sequeira, 2010)

1. Conceptos básicos:

a. *Electrodos:* Partes eléctricamente conductoras de una celda electroquímica. Estas pueden ser simples estructuras metálicas, o estructuras mucho más complicadas de materiales compuestos.

b. *Cátodo:* Electrodo donde se produce la reducción en una celda electroquímica. Este es negativo en celdas electrolíticas y positivo en celdas voltaicas.

c. *Ánodo*: Electrodo donde se produce la oxidación en una celda electroquímica. Este es positivo en celdas electrolíticas y negativo en celdas voltaicas.

d. *Electrolito*: Compuesto químico (sal, ácido o de base) que se disocia en iones eléctricamente cargados cuando se disuelve en un solvente. La solución de electrolito (o electrolítica) resultante es un conductor iónico de la electricidad.

e. *Catalítico*: Compuesto que promueve el fenómeno de aumentar la velocidad de una reacción química mediante su presencia en el medio de reacción (Catálisis homogénea), o estando presente en una superficie sólida en la cual se produce la reacción.

f. *Difusores*: Parte eléctricamente conductora que permite el contacto uniforme entre las placas bipolares y los electrodos al igual que permite la rápida ruptura y difusión de los gases generados sobre la superficie de los electrodos.

(Laoun, 2007)

E. TECNOLOGÍAS DE ELECTROLIZADORES

La electrólisis es un proceso bastante conocido que convierte agua en hidrógeno y oxígeno utilizando electricidad. La electrólisis abre la puerta a la producción de hidrógeno desde cualquier fuente de energía primaria que puede ser utilizada para la generación de electricidad. Actualmente, existen varios tipos de electrolizadores pero los más utilizados son dos: los alcalinos que utilizan soluciones de KOH y los más recientes que utilizan la tecnología de membranas intercambiadoras de protones (PEM). Los electrolizadores PEM son, en términos simples, celdas de combustible operando en modo inverso. Los electrolizadores alcalinos con KOH son bastante adecuados para aplicaciones estacionarias con presiones operacionales hasta de 25 bares. En la electrólisis PEM, el electrolito es un sólido, una membrana ácida polimérica y ningún electrolito líquido es requerido. Entre otras ventajas, incluye: ausencia de corrosión por el electrolito KOH, un diseño compacto, trabaja a altas densidades de corriente y altas presiones de operación (hasta varios cientos de bares). El mayor inconveniente con los sistemas PEM es el tiempo de vida limitado de la membrana. Se espera que el comportamiento del electrolizador PEM (en términos de costo, capacidad, eficiencia y tiempo de vida) pueda ser mejorado con nuevos materiales y diseños. Se están desarrollando nuevas tecnologías que trabajan a altas temperaturas y/o presiones. (OECD, 2005)

1. Tipos de tecnologías:

a. *Electrolizador alcalino*: El electrolizador alcalino es una tecnología bien establecida que por lo general emplea una solución acuosa de agua y 25-30 en peso.% de hidróxido de potasio (KOH). Sin embargo, hidróxido de sodio (NaOH), cloruro de sodio (NaCl) y otros electrolitos también pueden ser empleados. El electrolito líquido permite la conducción de iones entre los electrodos sin consumirse en la reacción, pero tienen que ser remplazados periódicamente debido a las pérdidas en el sistema. Los

electrolizadores alcalinos comerciales operan a densidades de corriente en el rango de 100 a 400 mA cm⁻². (OECD, 2005)

b. *Electrolizador PEM*: La electrólisis PEM (PEME) es también conocida como electrolito de polímero sólido (SPE) o de membrana de polímero electrolítico (también, PEM), pero todos representan un sistema que incorpora una membrana sólida permeable para los protones pero que no para los electrones. La membrana tiene doble propósito, como barrera de separación de gases y como conductor de iones (protones). Agua des ionizada de alta pureza (DI) es requerida en electrolizadores PEM, los fabricantes de electrolizadores PEM regularmente recomiendan un mínimo de un MQ-cm de resistente en el agua para prolongar la vida útil del stack.

La tecnología PEM fue desarrollada originalmente como parte del programa espacial Gemini 16. En un electrolizador PEM, el electrolito se encuentra en una fina membrana solida conductora de iones, en lugar de una solución acuosa como es el caso en los electrolizadores alcalinos. Esto permite que los iones H⁺ (protones) o molécula de agua hidratado (H₃O⁺) se desplacen desde el lado del ánodo de la membrana hacia el lado del cátodo, y separa el hidrógeno del oxígeno. El oxígeno se produce en el lado del ánodo y el hidrógeno se produce en el lado del cátodo. El material de la membrana más utilizado es el Nafion® de DuPont. Regularmente los electrolizadores PEM utilizar el diseño bipolar y pueden ser hecho para operar a altas presión diferenciales a través de la membrana. (OECD, 2005)

El agua des ionizada, se introduce en el ánodo de las celdas, y se aplica un potencial a través de la celdas para disociar el agua. Los protones (H⁺) pasan a través de la membrana bajo la influencia de un campo eléctrico y se reúne con los electrones que se suministran por la fuente de alimentación en el cátodo para formar hidrógeno gaseoso (H₂). Los electrolizadores PEM son operados a altas densidades de corriente (> 1600 mA cm⁻²) casi un orden de magnitud más alta que las versiones alcalinas. La eficiencia del stack disminuye al aumentar la densidad de corriente, pero es necesario aumentar la producción de hidrógeno para compensar los costos en capital más elevados de las cedas PEM. La ventajas de la tecnología PEM sobre la alcalina es la capacidad para mantener una presión diferencial significativa entre el ánodo y el cátodo. Además, los electrolizadores PEM requiere agua des ionizada, pero evita los peligros relacionados con el manejo de KOH. (OECD, 2005)

c. *Electrolizadores de alta temperatura*: La electrólisis de alta temperatura (también HTE o electrólisis de vapor) es un método que esta siendo actualmente investigado para la electrólisis del agua con un motor térmico. La electrólisis a alta temperatura es más eficiente que los métodos tradicionales de electrólisis a temperatura ambiente, debido a que parte de la energía se suministra en forma de calor, que es más barato que la electricidad, y porque la reacción de electrólisis es más eficiente a altas temperaturas. (OECD, 2005)

Tabla No. 1: Características de electrolizadores existentes.

Tecnología	Electrolizador convencional	Electrolizador alcalino avanzado	Electrolizador con membrana inorgánica	Electrolizador PEM	SOFC, electrolizador de alta temperatura y vapor
Etapas de desarrollo	Unidades comerciales a gran escala	Prototipos y comercial	Unidades comerciales	Prototipos y unidades comerciales	Etapas de laboratorio y unidades comerciales
Voltaje de la celda (V)	1.8 – 2.2	1.5 – 2.5	1.6 – 1.9	1.4 – 2.0	0.95 – 1.3
Densidad de corriente (A/cm ²)	0.13 – 0.25	0.20 – 2.0	0.2 – 1.0	1.0 – 4.0	0.3 – 1.0
Temperatura (°C)	70 – 90	80 – 145	90 – 120	80 – 150	900 – 1,000
Presión (bar)	1 – 2	Hasta 120	Hasta 40	Hasta 400	Hasta 30
Cátodo	Acero inoxidable o níquel	Ni activado catalítico o no catalítico	“ <i>Spinel oxide based on CO</i> ”	Platino	Níquel
Ánodo	Níquel	Níquel activado catalítico o no catalítico	“ <i>Spinel oxide based on CO</i> ”	Titanio poroso y catalítico apropiado	Ni-NiO
Separador de gases	Asbesto 1.2 – 1.7 Ohm/cm ²	Asbesto < 100°C; teflón enlazado con PBI-Ktitanate >100°C; 0.5 – 0.7 Ohm/cm ²	Membrana patentada de poliantimonio ácida 0.2 – 0.3 Ohm/cm ²	Planchas metálicas de múltiples capas expandidas	Ninguno
Electrolito (25-35)%	(25-40)% KOH	(14-15)% KOH	Perfluorosulfónico KOH	Y ₂ O ₃ sólido, membrana ácida 10-12 milésimas de pulgadas de espesor	ZrO ₃₈₀ estabilizado
Eficiencia de la celda (GJ H ₂ /GJ el)	66 – 69	69 – 77	73 – 81	73 – 84	81 – 86
Potencia necesaria (kWh/Nm ³ H ₂)	4.3 – 4.9	3.8 – 4.3	4.8	3.6 – 4.0	1.5 – 3.5

Fuente: Prince-Richard, 2004; Stuart, 2005 *SOFC's: Solid Oxide Fuel Cells

2. Tipos de electrolizadores: Los electrolizadores al igual que las baterías voltaicas, pueden ser construidos en configuraciones de diseño mono-polar o bipolar. (OECD, 2005)

a. *Mono-polares:* Los electrolizadores mono-polares (o "tipo tanque") consisten en electrodos positivos y negativos alternados y separados físicamente por una barrera porosa. Los electrodos positivos son acoplados en paralelo, al igual que los negativos, y todo el ensamblado es sumergido en un único baño

electrolítico ("tanque") para formar una sola celda. Los electrolizadores alcalinos (KOH) son a menudo de este tipo. (OECD, 2005)

1) **Celda tipo frasco:** Electrodo incorporados a frascos que captan los gases generados en las superficies del ánodo y cátodo. Ambos electrodos son sumergidos en una solo tanque con solución electrolítica.

2) **Celda tipo diafragma:** Electrodo sumergidos en un contenedor cerrado y separado por una membrana porosa que permite el intercambio iónico en la solución electrolítica.

3) **Celda combinada:** Electrodo incorporados a frascos de membrana porosa que captan los gases generados en las superficies del ánodo y cátodo, ambos electrodos son sumergidos en una solo tanque con solución electrolítica.

b. *Bipolares:* Los electrolizadores bipolares, por otra parte, tienen una Placa de metal o de grafito ("bipolares") que conecta eléctricamente las celdas adyacentes en serie. En este tipo de electrolizadores cada cara de la placa posee diferente polaridad, teniendo el electrodo positivo de un lado y el electrodo negativo en lado inverso de la placa. (OECD, 2005)

1) **Celda tipo contenedor:** Placas bipolares, colectores de corriente y membranas porosas incorporadas a un contenedor que posee salidas de gas hidrógeno y oxígeno alternadas. Todo el contenedor es sumergido en un único tanque de solución electrolítica.

2) **Celda tipo filtro prensa:** Placas bipolares y membranas separadoras alternadas y sujetadas por abrazaderas.

Figura No. 3: Representación esquemática de los tipos de electrolizadores más comunes.

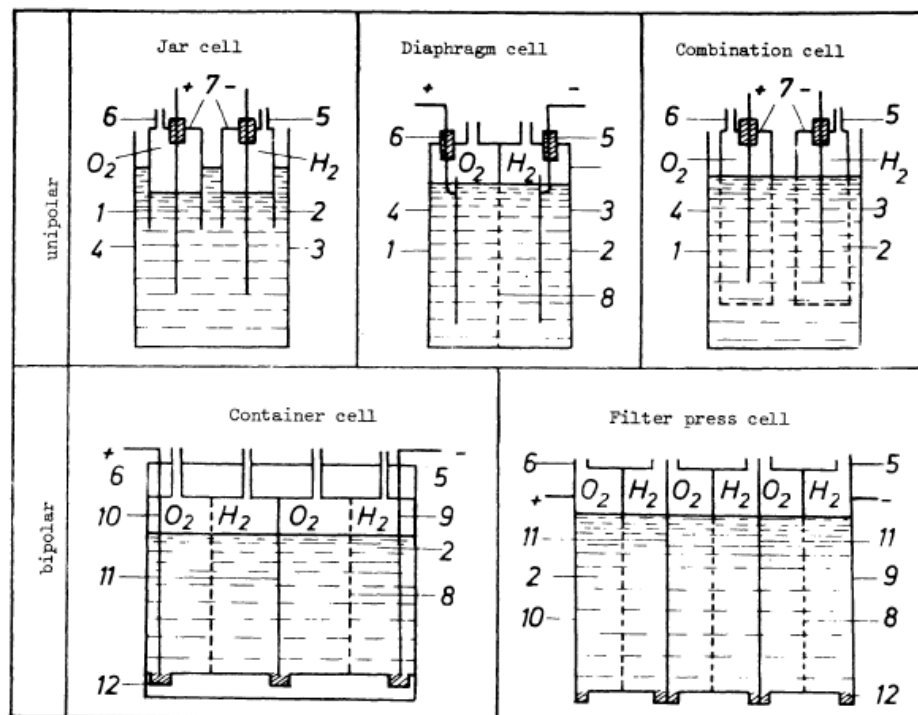
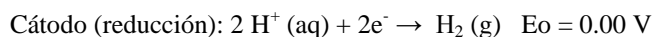
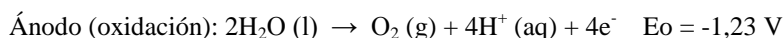


Tabla No. 2: Ventajas y desventajas de los distintos tipos de electrolizadores.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Mono-polares	<ul style="list-style-type: none"> - Pocas partes - Fácil fabricación - Fácil mantenimiento y reparación sin parar operación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja densidad de corriente. - Baja presión de operación. - Bajas temperaturas
Bipolares	<ul style="list-style-type: none"> - Voltajes altos - Altas densidades de corriente. - Diseño compacto. - Altas presiones de operación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muchas partes - Mantenimiento difícil - Riesgo de fugas

F. TERMODINÁMICA DE ELECTRÓLISIS

El proceso de descomposición del agua pura en hidrógeno y oxígeno por medio de la electrolisis a condiciones normales de temperatura y la presión no es favorable en términos termodinámicos.

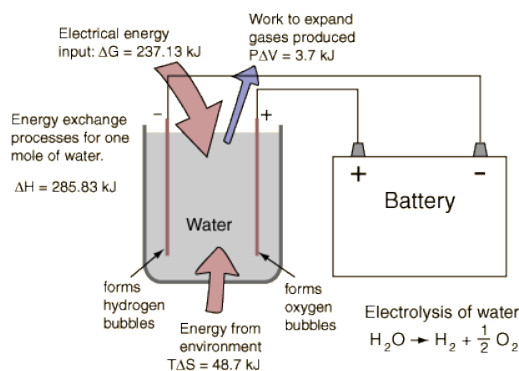


(Hyperphysics. 2000)

Por lo tanto, el potencial estándar de la celda de electrólisis del agua es $-1,23 \text{ V}$ a 25° C a $\text{pH} = 0$. También es $-1,23 \text{ V}$ a 25° C a $\text{pH} = 7$ ($\text{H}^+ = 1,0 \times 10^{-7} \text{ M}$), basado en la ecuación de Nernst.

El voltaje negativo indica que la energía libre de Gibbs para el proceso de electrólisis del agua es mayor que cero para estas reacciones. Esto se puede comprobar utilizando la ecuación: $G = -nFE$, ecuación de la cinética química, donde n es el moles de electrones y F es la constante de Faraday. Esto quiere decir que la reacción no es espontanea y no puede ocurrir sin la adición de la energía necesaria, por lo general suministrada por una fuente de alimentación eléctrica externa. (Hyperphysics. 2000)

Figura No. 4: Representación esquemática de la termodinámica de la electrólisis de agua a condiciones estándar.



La electrólisis de un mol de agua produce un mol de gas hidrógeno y medio mol de oxígeno gaseoso en sus formas diatómicas normales. Este proceso se asume que es a 298K y una atmósfera de presión, y los correspondientes valores se toman de una tabla de propiedades termodinámicas. (Hyperphysics. 2000)

Tabla No. 3: Propiedades termodinámicas de la electrólisis de agua a condiciones estándar.

Variable	H ₂ O	H ₂	0.5 O ₂	Cambio
Entalpía	-285.83 kJ	0	0	ΔH = 285.83 kJ
Entropía	69.91 J/K	130.68 J/K	0.5 x 205.14 J/K	TΔS = 48.7 kJ

El proceso debe proporcionar la energía para la disociación, además de la energía necesaria para expandir los gases producidos. Ambas raciones de energía son incluidas en el cambio de entalpía. A 298K de temperatura y una atmósfera de presión, el trabajo del sistema es:

Ecuación No. 16

$$\begin{aligned}
 W &= P\Delta V \\
 &= (101,3 \times 10^3 \text{ Pa}) (1,5 \text{ moles}) (22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{mol}) (298\text{K}/273\text{K}) = 3715 \text{ J} \\
 &\hspace{15em} (\text{Hyperphysics. 2000})
 \end{aligned}$$

Puesto que la entalpía $H = U + PV$, el cambio en la energía interna U es entonces

Ecuación No. 17

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \Delta H - P\Delta V \\
 &= 285.83 \text{ kJ} - 3,72 \text{ kJ} = 282,1 \text{ kJ} \\
 &\hspace{15em} (\text{Hyperphysics. 2000})
 \end{aligned}$$

Este cambio en la energía interna debe ser acompañado por la expansión de los gases producidos, por lo que el cambio en la entalpía representa la energía necesaria para llevar a cabo la electrólisis. Sin embargo, no es necesario suministrar este monto total en la forma de energía eléctrica. Dado que la entropía aumenta en el proceso de disociación, la cantidad $T\Delta S$ puede ser proporcionada por el medio ambiente a la temperatura T . La cantidad que debe ser suministrada en forma de energía eléctrica es realmente el cambio en la energía libre de Gibbs:

Ecuación No. 18

$$\begin{aligned}
 \Delta G &= \Delta H - T\Delta S \\
 &= 285.83 \text{ kJ} - 48,7 \text{ kJ} = 237,1 \text{ kJ} \\
 &\hspace{15em} (\text{Hyperphysics. 2000})
 \end{aligned}$$

Dado que en el proceso de electrólisis aumenta de la entropía del sistema, el medio ambiente "ayuda" el proceso por que contribuye a la cantidad de $T\Delta S$. La utilidad que tiene la energía libre de Gibbs es que indica la cantidad de energía que debe ser suministrada en otra forma para que el proceso ocurra. (Hyperphysics. 2000)

G. ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

El hidrógeno puede ser almacenado como un gas comprimido en tanques presurizados, como un líquido en tanques criogénicos y adsorbido o absorbido en materiales sólidos. El mecanismo puede ser mediante fuerzas físicas o químicas. (OECD, 2005)

1. **Gaseoso.** El hidrógeno gaseoso puede ser almacenado en tanques convencionales de acero o en tanques de alta presión de fibra de carbón de bajo peso entre 350 a 700 bares. La ventaja de éste último es su bajo peso. El tanque consiste en tres capas: un revestimiento interno de un polímero como barrera permeable de hidrógeno, un compuesto de fibra de carbono y una carcasa externa resistente a impactos. El almacenamiento a grandes presiones conlleva diversos problemas adicionales a asuntos de seguridad como los efectos del ciclo de carga en su tiempo de vida, el alto costo de los tanques y la energía requerida para comprimirlo son sus principales problemas. (OECD, 2005)

Existe una alternativa para el almacenamiento gaseoso: micro-esferas de vidrio vacías. Se llenan mediante el ingreso de hidrógeno a una alta presión (350 a 700 bares) y temperatura (300°C), las micro-esferas son enfriadas posteriormente a temperatura ambiente para retener el gas. Luego, son calentadas alrededor de 200-300°C para liberar el hidrógeno a un motor de celda de combustión. Los problemas principales de dichas esferas son: baja densidad volumétrica y la alta presión con la que se realiza la carga. La liberación de hidrógeno a altas temperaturas también es una preocupación al utilizar una celda de combustión PEM que trabaja entre 70 a 80°C. No está claro si las micro-esferas se convertirán en una opción viable. (OECD, 2005)

Tabla No. 4: Comparación de las características entre los tanques compuestos y las micro-esferas de vidrio

Parámetro	Tanques compuestos		Micro-esferas de vidrio	
	Valor	Comentario	Valor	Comentario
Temperatura, T	+	No es necesario un intercambiador de calor	-	Es necesaria una alta temperatura
Densidad de energía	-	Parcialmente conforme	+	Hasta 5% peso H ₂ , conforme
Robustez	+	Extensamente probados	-	Esperas frágiles
Seguridad	+	Códigos y estándares existentes	+	Pueden ser inherentemente seguras
Costo	-	Largo plazo \$(500-600)/kg H ₂	¿?	Por determinar

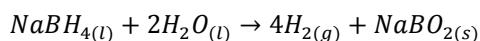
Fuente: IEA, HIA, 2005. Basado en un tanque de 165L que requiere 47kg de fibra compuesta de carbón con 68% en peso (Calson *et al.*, 2004).

Mientras que el 24K de fibra compuesta de carbón con un costo de \$20/kg, \$4 adicionales por kilo de aglutinante

2. Líquido. El hidrógeno puede ser almacenado en estado líquido a temperaturas criogénicas (253°C). La densidad de almacenamiento depende del peso del tanque, los materiales aislantes, sistemas adoptados para recuperar pérdidas de evaporación, etc. La US-DOE (US Department of Energy) indica que los valores prácticos que se pueden alcanzar en la actualidad en sistemas de almacenamiento de hidrógeno líquido son alrededor del 5% en peso. Utilizar hidrógeno líquido conlleva muchas desventajas como: de 0.3 a 0.7 GJ de energía primaria son necesarios para producir 1GJ de hidrógeno líquido, la pérdida por evaporación ocurre incluso en tanques criogénicos altamente aislados. Además, se puede perder hasta un 40% del contenido energético en el hidrógeno durante la operación de licuefacción. La principal ventaja es la alta densidad de almacenamiento que puede ser alcanzada a presiones relativamente bajas. (OECD, 2005; Dermibas, 2007)

El uso de soluciones de borohidruro de sodio (NaBH_4) es una alternativa para el almacenamiento líquido del hidrógeno. El hidrógeno es liberado a través de una reacción de hidrólisis catalítica: (OECD, 2005)

Ecuación No. 19



(OECD, 2005)

Con una densidad de almacenamiento teórica de 10.9% en peso. La principal ventaja de una solución de NaBH_4 es que permite una liberación segura y controlada del hidrógeno mientras que la principal desventaja es que el NaBO_2 debe ser almacenado con el fin de no ser liberado y regenerado nuevamente en NaBH_4 . Otros líquidos orgánicos para el almacenamiento de hidrógeno como el metilciclohexano (C_7H_{13}) y tolueno (C_7H_8) pueden ofrecer densidades de almacenamiento hasta de 6.1% en peso ($43\text{kg H}_2/\text{m}^3$). Sin embargo, estos liberan hidrógeno a altas temperaturas (300 – 400)°C y requieren de estudios posteriores en cuestiones de seguridad y toxicidad. (OECD, 2005)

Tabla No. 5: Características del almacenamiento de hidrógeno en forma líquida y en soluciones

Parámetro	H ₂ líquido		Soluciones de NaBH ₄		Líquidos orgánicos	
	Valor	Comentario	Valor	Comentario	Valor	Comentario
Temperatura, T	-	30 – 40% pérdida de energía, evaporación	+	No requiere de altas temperaturas	-	T _{liberación} = 300 – 400°C
Presión, P	+	Baja presión	+	Baja presión	+	Baja presión
Densidad de energía*	+	100, 20, 5% en peso **	+	10.9% en peso H ₂	+	6.1% en peso H ₂

Continuación Tabla No.5

Parámetro	H ₂ líquido		Soluciones de NaBH ₄		Líquidos orgánicos	
	Valor	Comentario	Valor	Comentario	Valor	Comentario
Costos	-	Infraestructura	-	Costos de regeneración por infraestructura	-	Costos de regeneración por infraestructura

Fuente: IEA, HIA, 2005. *Valores teóricos, **Teóricos, valores objetivos y prácticos

3. Sólido. El almacenamiento de hidrógeno en materiales sólidos ofrece el potencial de un almacenamiento seguro y eficiente para aplicaciones estacionarias como móviles. Cuatro grupos principales son considerados: carbón y otros materiales de gran superficie (HSA, por sus siglas en inglés), hidruros reactantes con agua, hidruros termo-químicos e hidruros recargables. (OECD, 2005)

Los hidruros metálicos sólidos prometen de tres a cuatro veces una mayor densidad de hidrógeno que en el almacenamiento gaseoso. (OECD, 2005)

Tabla No. 6: Materiales potenciales en consideración para el almacenamiento sólido

Carbón y otros materiales HSA	Hidruros (reaccionan con agua)	Hidruros termo-químicos	Hidruros recargables
* Carbón activado	* NaH encapsulado	* <i>Ammonia borozane</i>	* Aleaciones intermetálicas
* Nanotubos	* LiH y MgH ₂	* Hidruro de aluminio	* Nanocristalinos
* Nanofibras de grafito	* CaH ₂ , LiAlH ₄ , etc.		* Complejos
* Zeolitas			
* Hidratos clatratos			

Fuente: IEA, HIA, 2005

a. Materiales basados en carbón y materiales HSA. El almacenamiento se da mediante adsorción. Sin embargo, aún no se tiene evidencia de un almacenamiento significativo de hidrógeno a temperatura ambiente. (Gallego, 2003)

Actualmente, los mecanismos de adsorción no son completamente entendidos y las tecnologías para producir carbón de una manera económicamente viable no han sido desarrolladas. Como resultado, el almacenamiento de hidrógeno en materiales basados en carbón se considera como una opción cuestionable.

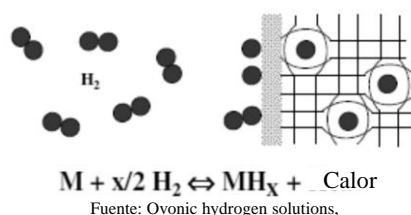
Otros materiales como zeolitas, hidratos clatratos, etc. pueden ser probados como realizables, pero requieren de mayor investigación. Lo que se pone en duda es si estos pueden ser dirigidos para almacenar cantidades significativas de hidrógeno a temperaturas cercanas a la ambiente. (OECD, 2005)

b. **Hidruros.** Los metales, compuestos intermetálicos y aleaciones generalmente reaccionan con el hidrógeno y forman principalmente compuestos sólidos metal-hidrógeno (MH_n). Los hidruros existen en forma iónica, polimérica, covalente, volátil y metálicos. (Dermibas, 2007)

El hidrógeno es absorbido y enlazado químicamente a un metalceptor (en forma granular o de partículas). Durante este proceso se genera calor y cualquier cambio en calor o presión puede conducir la reacción a cualquier dirección. Se necesita enfriamiento en los sistemas durante la etapa de carga con hidrógeno y calentamiento para recuperar el hidrógeno. (Ovonic hydrogen solutions, 2010; Wilson, 2008)

Los hidruros metálicos experimentan una pérdida muy pequeña de hidrógeno mientras está almacenado. Dándoles una ventaja en el almacenamiento a largo plazo. Además, proveen una plataforma muy segura contra la inflamabilidad, ya que la tasa a la cual se descarga el hidrógeno tiene una variable “normalmente cerrada”. Es decir, el hidruro metálico a temperatura ambiente es altamente controlable.

Figura No. 5: Formación de un hidruro metálico para el almacenamiento de hidrógeno



Donde M es un metal o una aleación. (Dermibas, 2007)

En el proceso de carga la presión del hidrógeno (H_2) es mayor que la presión de equilibrio y en el proceso de descarga es al revés. (Ovonic hydrogen solutions, 2010)

Figura No. 6: Proceso de carga y descarga de hidrógeno molecular en hidruros metálicos

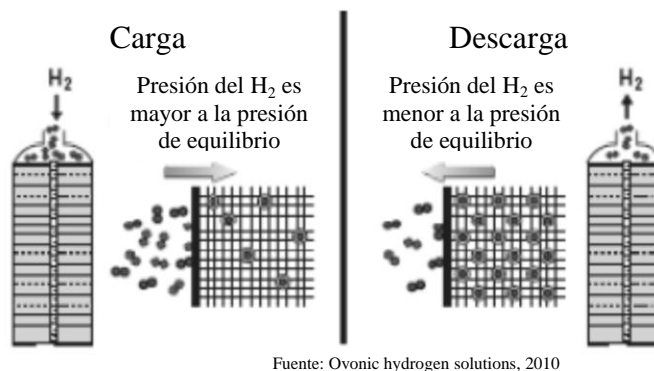
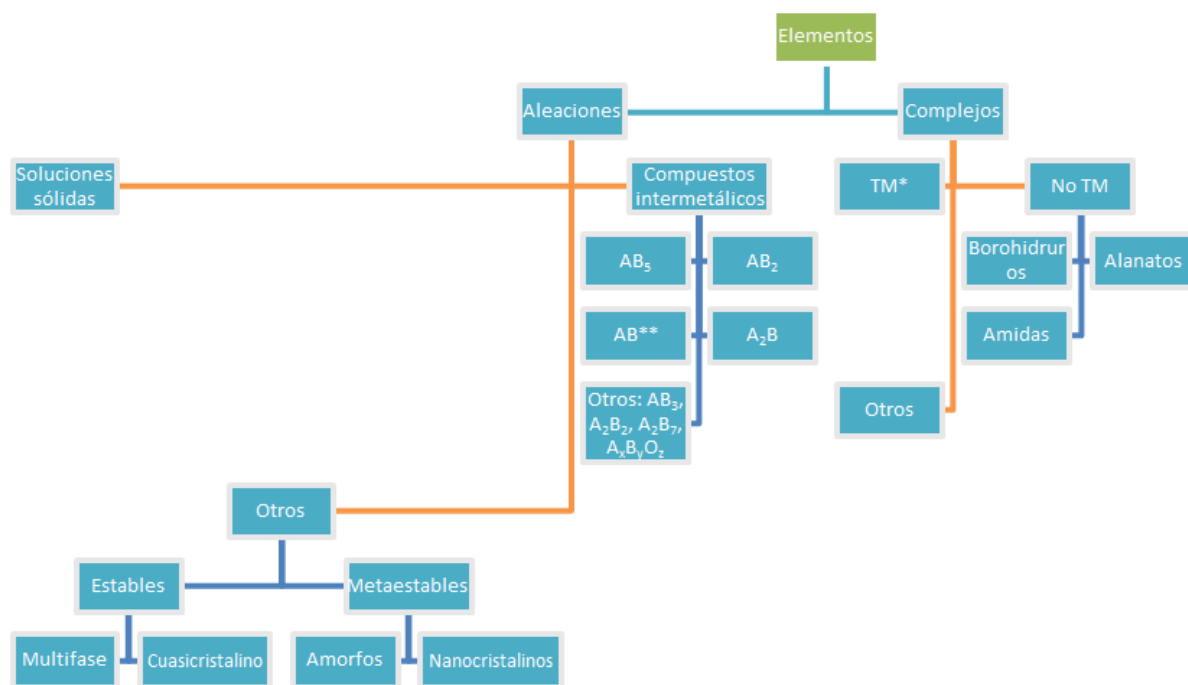


Figura No. 7: Árbol familiar de los hidruros metálicos



Fuente: IEA, HIA, 2005. *TM = Hidruros metálicos compuestos de transición. **AxBy = Compuestos típicos intermetálicos.

Los hidruros metálicos como la aleación FeTi son utilizados para almacenar hidrógeno enlazándolo a la superficie del material. La aleación actúa como una esponja que absorbe el hidrógeno formando el hidruro metálico FeTiH_{1.6}. Es un polvo fino plateado. Los hidruros como el FeTiH₂ y LaNi₅H₇ retienen el hidrógeno libremente y lo liberan a bajas temperaturas. Los hidruros como el MgH y Mg₂NiH₄, únicamente liberan el hidrógeno a altas temperaturas debido a que poseen una alta entalpía de enlace. (Dermibas, 2007)

1) Hidruros que reaccionan con agua. Estos pueden ser manejados de manera segura en forma semi-líquida como una mezcla de aceites minerales. La inyección controlada de agua en la mezcla que contiene los hidruros resulta en la liberación de hidrógeno. La ventaja de este proceso es que esta liberación no requiere calor, con una capacidad máxima teórica de almacenamiento de 5-8% en peso. Parece que el MgH₂ es el que ofrece la mejor combinación de desempeño y costo. La meta en la investigación y desarrollo es reducir el costo en la energía requerida para convertir el hidróxido de nuevo en hídrido. (OECD, 2005)

Tabla No. 7: Densidad de almacenamiento de los hidruros que reaccionan con agua

Reacción de hidrólisis	Densidad máxima teórica de almacenamiento (% en peso)
$\text{LiH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{LiOH}$	7.8
$\text{NaH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{NaOH}$	4.8
$\text{MgH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{Mg(OH)}_2$	6.5
$\text{CaH}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{Ca(OH)}_2$	5.2

2) Hidruros termoquímicos. Los boranos de amoniaco son un grupo de hidruros químicos que son potencialmente apropiados para el almacenamiento de hidrógeno en un estado sólido. Sin embargo, las reacciones no son reversibles y la regeneración es requerida. Se requiere de mayor investigación acerca de la viabilidad de esta opción. (OECD, 2005)

Tabla No. 8: Características clave de los hidruros termo-químicos

Reacción de descomposición	Densidad máxima teórica de almacenamiento (% en peso)	Temperatura de descomposición (°C)
$\text{NH}_4\text{BH}_4 \rightarrow \text{NH}_3\text{BH}_3 + \text{H}_2$	6.1	< 25
$\text{NH}_3\text{BH}_3 \rightarrow \text{NH}_2\text{BH}_2 + \text{H}_2$	6.5	< 120
$\text{NH}_2\text{BH}_2 \rightarrow \text{NHBH} + \text{H}_2$	6.9	> 120
$\text{NHBH} \rightarrow \text{BN} + \text{H}_2$	7.3	> 500

3) Hidruros recargables. Los hidruros metálicos elementales son bastante bien comprendidos pero son demasiado estables o inestables para utilizar en temperaturas prácticas (0 a 100°C). Las aleaciones y los compuestos intermetálicos son bien comprendidos, sin embargo muy costosos, y trabajan a temperaturas menores a 100°C. Su baja densidad gravimétrica (< 2.5% en peso) los hace inapropiados para vehículos, pero pueden ser utilizados para almacenamiento estacionario. Los hidruros amorfos y los nanocristalinos muestran buena cinética pero capacidades de almacenaje no favorables junto con las temperaturas de liberación. Los hidruros complejos, particularmente los borohidruros, alanatos y amidas pueden ser prometedores pero requieren de un mayor desarrollo. El NaAlH_4 , en particular, tiene una adecuada baja temperatura y su reversibilidad puede ser mejorada utilizando un catalítico como titanio. Sin embargo, el almacenamiento práctico (reversible) es alrededor de 4-5% en peso y los costos son demasiado altos. El $\text{Mg}(\text{AlH}_4)$ se caracteriza por un almacenamiento pobre reversible de hidrógeno y otros alanatos presentan altas temperaturas de liberación. Los borohidruros poseen un capacidad más grande que los alanatos pero son demasiado estables (no liberan hidrógeno fácilmente) y son menos reversibles. Sin embargo, se ha progresado en mejorar el desempeño del LiBH_4 . (OECD, 2005)

Tabla No. 9: Propiedades clave de alanatos y borohidruros seleccionados

Alanatos	Densidad máxima teórica de almacenamiento (% en peso)	Temperatura de liberación de H_2 (°C)
LiAlH_4	10.6	190
NaAlH_4	7.5	100
$\text{Mg}(\text{AlH}_4)$	9.3	140
$\text{Ca}(\text{AlH}_4)$	7.8	>230
Borohidruros		
LiBH_4	18.5	300
NaBH_4	10.6	350
KBH_4	7.4	125
$\text{Be}(\text{BH}_4)_2$	20.8	125
$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$	14.9	320
$\text{Ca}(\text{BH}_4)_2$	11.6	260

El porcentaje en peso máximo alcanzable actualmente es frecuentemente menor que los valores teóricos. Por ejemplo, la densidad máxima teórica de almacenamiento del NaAlH_4 es de 5.6% en peso

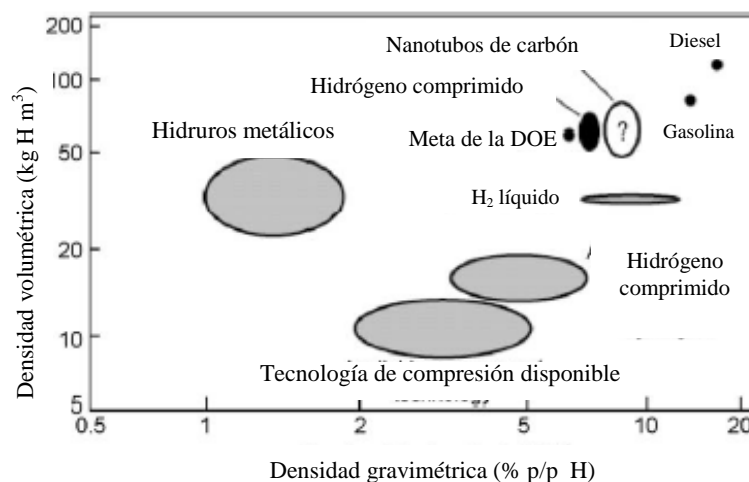
4. Comparación entre los tipos de almacenamiento de hidrógeno. A continuación se presentan los principales métodos y técnicas de almacenamiento:

Tabla No. 10: Seis métodos o fenómenos básicos de almacenamiento de hidrógeno

Método de almacenamiento	Densidad gravimétrica ρ_m (% peso)	Densidad volumétrica ρ_v (kg H ₂ /m ³)	Temperatura (°C)	Presión (bar)	Fenómenos y observaciones
Cilindros de gas a alta presión	13	< 40	25	800	Gas comprimido en cilindros de peso ligero
Hidrógeno líquido en tanques criogénicos	Depende del tamaño	70.8	-252	1	Pérdida de cierto porcentaje diario de H ₂ a temperatura ambiente
Hidrógeno adsorbido	2	20	-80	100	Adsorción física de H ₂ en materiales como carbón con gran área superficial específica, totalmente reversible
Absorbido o en sitios dentro de un metal	2	150	25	1	Intercalado de H atómico en metales anfitriones, los hidruros metálicos que trabajan a temperatura ambiente son completamente reversibles
Compuestos complejos	< 18	150	> 100	1	Compuestos complejos: [AlH ₄] ⁻ o [BH ₄] ⁻ , desorción a altas temperaturas, absorción a altas presiones
Metales y complejos con agua	< 40	> 150	25	1	Oxidación química de los metales con agua y liberación de hidrógeno, no directamente reversible

Fuente: Zutell, A. 2003. p.2

Figura No. 8: Densidad volumétrica y gravimétrica de almacenamiento de hidrógeno mediante distintos métodos



Fuente: Strobel, R. et al. 2006. p.782

H. DESHUMIDIFICACIÓN

1. Adsorción. Las operaciones de adsorción explotan la capacidad especial de ciertos sólidos para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma. Todas estas operaciones son similares en que la mezcla por separar se pone en contacto con otra fase insoluble, el sólido adsorbente, y en que la distinta distribución de los componentes originales entre la fase adsorbida en la superficie sólida y el fluido permite que se lleve a cabo una separación. Se tienen separaciones por lotes en una sola etapa, separaciones continuas en varias etapas y separaciones análogas a la absorción y desorción a contracorriente en el campo del contacto gas-líquido y a la rectificación y extracción mediante reflujo. (Treybal, 1988)

d. Adsorbentes y procesos de adsorción. La mayor parte de los adsorbentes son materiales muy porosos y la adsorción tiene lugar principalmente sobre las paredes de los poros o en sitios específicos dentro de la partícula. Puesto que los poros son por lo general muy pequeños, el área de la superficie interna es varios órdenes de magnitud superior al área externa y puede alcanzar con frecuencia valores de 500 a 1,000 m²/g. La separación se produce debido a que diferencias de peso molecular o de polaridad dan lugar a que algunas moléculas se adhieran con más fuerza a la superficie que otras o porque los poros son demasiado pequeños para admitir las moléculas grandes. Es posible regenerar el adsorbente con el fin de obtener el adsorbato en forma concentrada o prácticamente pura. (McCabe, 2007)

Los sólidos deben poseer ciertas propiedades relativas a la ingeniería, según la aplicación que se les vaya a dar. Si se utilizan en un lecho fijo a través del cual va a fluir un líquido o un gas, no deben ofrecer una caída de presión del flujo muy grande, ni deben ser arrastrados con facilidad por la corriente que fluyen. Deben tener adecuada consistencia para que no se reduzca su tamaño al ser manejados o para que no se rompan al soportar su propio peso en lechos del espesor requerido. Si se van a sacar y meter con frecuencia de los recipientes que los contienen, deben fluir libremente. Estas son propiedades fácilmente reconocibles. (Treybal, 1988)

Los sólidos poseen frecuentemente una capacidad muy específica para adsorber grandes cantidades de ciertas sustancias, siendo evidente que la naturaleza química del sólido tiene mucho que ver con sus características de adsorción. La simple identidad química no es suficiente para caracterizar su utilidad. (Treybal, 1988)

El secado de gases se lleva a cabo con frecuencia adsorbiendo el agua sobre gel de sílice, alúmina u otros sólidos inorgánicos porosos. Las zeolitas o tamices moleculares, que son aluminosilicatos, naturales o sintéticos, con una estructura fina de poro muy regular, resultan especialmente eficaces para la preparación de gases con bajos puntos de rocío (-75°C). La adsorción sobre tamices moleculares se utiliza también para separar oxígeno y nitrógeno, para preparar hidrógeno puro a partir de gas de síntesis. En el caso de la sílica

gel, no todas las muestras tienen la misma capacidad de adsorción en cuanto a vapor de agua. Influyen demasiado su método de fabricación y sus antecedentes de adsorción y desorción. (McCabe, 2007)

El tamaño del lecho adsorbente está determinado por la velocidad de flujo de gas y por el tiempo de ciclo deseado. El área de la sección transversal se calcula por lo general de tal forma que se obtenga una velocidad superficial de 0.15 a 0.45 m/s, que da lugar a una caída de presión de pocas pulgadas de agua por pie de lecho cuando se utilizan adsorbentes típicos (4 por 10 mallas o 6 por 16 mallas). Para velocidades de flujo muy grandes puede instalarse un lecho rectangular en la parte central de un cilindro horizontal en vez de utilizar un tanque vertical con un diámetro mucho mayor que el espesor del lecho. (McCabe, 2007)

El espesor del lecho y la velocidad de flujo por lo general se seleccionan para proporcionar un ciclo de adsorción de 2 a 24h. Utilizando un lecho más largo es posible ampliar el ciclo de adsorción a varios días, pero la mayor caída de presión y la mayor inversión necesaria harán la operación probablemente antieconómica. Algunas veces se recomienda un espesor de lecho de sólo 0.3m o menos para disminuir la caída de presión y el tamaño del adsorbente, pero los lechos de poca longitud no producen una separación completa y requieren más energía para la regeneración. (McCabe, 2007)

La siguiente lista presenta los principales adsorbentes de uso general: (Treybal, 1988)

a) Tierras de Fuller: Son arcillas naturales. Principalmente son silicatos de aluminio y magnesio, bajo la forma de atapulguita y montmorillonita. La arcilla se calienta y se seca, y durante esta operación desarrolla una estructura porosa, es molida y cernida. Los tamaños que se consiguen comercialmente van desde grandes gránulos hasta polvos finos. Las arcillas son particularmente útiles para decolorar, neutralizar y secar productos del petróleo como aceites lubricantes, aceites de transformador, querosenos y gasolinas, lo mismo que aceites vegetales y animales. Lavando y quemando la materia orgánica adsorbida sobre la arcilla durante su utilización, el adsorbente puede utilizarse muchas veces. (Treybal, 1988)

b) Arcillas activadas: Son bentonita u otras arcillas que no muestran ningún poder de adsorción hasta que se activan mediante el tratamiento con ácido sulfúrico o clorhídrico. Después de este tratamiento, la arcilla se lava, se seca y se reduce a un polvo fino. Es particularmente útil para decolorar productos del petróleo; generalmente se descarta después de una sola aplicación. (Treybal, 1988)

c) Bauxita: Es cierta forma de la alúmina hidratada natural que debe activarse mediante calentamiento a temperaturas que varían entre 450 a 1500°F (232.2 a 815.6°C), con el fin de activar su poder de adsorción. Se utiliza para decolorar productos del petróleo y para sacar gases: se puede reactivar mediante calentamiento. (Treybal, 1988)

d) Alúmina: Es un óxido de aluminio hidratado, duro, que se activa por calentamiento para eliminar la humedad. El producto poroso se puede conseguir como gránulos o polvos; se utiliza principalmente como desecante de gases y líquidos. Puede reactivarse para volver a utilizar. (Treybal, 1988)

e) Carbón de hueso: Se obtiene mediante la destilación destructiva de huesos pulverizados y secos a temperaturas a 600 a 900°C. Se utiliza principalmente en la refinación del azúcar; puede volverse a utilizar después de lavado y quemado. (Treybal, 1988)

f) Carbones decolorantes: Se preparan de modos distintos. i) Se mezcla materia vegetal con sustancias inorgánicas como cloruro de calcio; se carboniza y elimina por lixiviación la materia inorgánica. ii) Mezclando materia orgánica, como aserrín, con sustancias porosas como piedra pómez; luego se emplea calentamiento y carbonización para depositar la materia carbónica en todas las partículas porosas. iii) Se carboniza madera, aserrín y similares; luego se emplea activación con aire o vapor caliente. La lignita y el carbón bituminoso también son materias primas. Se utilizan para gran cantidad de fines, incluso para la decoloración de soluciones de azúcar, sustancias químicas industriales, drogas y líquidos de limpieza en seco, purificación de agua, refinamiento de aceites vegetales y animales y para la recuperación de oro y plata a partir de sus soluciones de cianuro. (Treybal, 1988)

g) Carbón adsorbente de gases: Se prepara por carbonización de cáscaras de coco, semillas de fruta, carbón, lignita y madera. Debe ser activado, lo cual equivale esencialmente a un proceso parcial de oxidación mediante tratamiento con aire o vapor caliente. Se puede conseguir en forma granular o de lentejas; se utiliza para la recuperación de vapores de disolventes en mezclas gaseosas, en máscaras de gas, recuperación de hidrocarburos de la gasolina a partir de gas natural y para el fraccionamiento de gases de hidrocarburos. Para volverlo a utilizar, se puede revivir, por evaporación del gas adsorbido. (Treybal, 1988)

h) Carbón activado de malla molecular: Es una forma preparada especialmente con aberturas de poro controladas, que van desde 5 hasta 5.5 Angstroms. Los poros pueden admitir hidrocarburos parafínicos, pero rechazan isoparafinas de diámetros moleculares grandes. El producto es útil para fraccionar compuestos acetilénicos, alcoholes, ácidos orgánicos, cetonas, aldehídos y muchos otros. (Treybal, 1988)

i) Adsorbentes poliméricos sintéticos: Son perlas esféricas porosas, 0.5mm de diámetro; cada perla es un conjunto de microesferas, 10^{-4} mm de diámetro. El material es sintético, fabricado de monómeros polimerizables de dos tipos principales. Los fabricados a partir de aromáticos insaturados como estireno y divinilbenceno, son útiles para la adsorción de orgánicos no polares a partir de soluciones acuosas. Los fabricados a partir de ésteres acrílicos son adecuados para solutos más polares. Se utilizan principalmente en el tratamiento de soluciones acuosas; se regeneran por lixiviación con alcoholes o cetonas de bajo peso molecular. (Treybal, 1988)

j) Silica gel: Es un producto muy duro, granular, muy poroso; se prepara partir del gel precipitado por tratamiento ácido de una solución de silicato de sodio. Su contenido en humedad antes de utilizarse varía del 4 al 7% más o menos; se utiliza principalmente para la deshidratación del aire y otros gases, en máscaras de gases y para el fraccionamiento de hidrocarburos. Para volverse a utilizar, se puede revivir por evaporación de la materia adsorbida.

k) Mallas moleculares: Son cristales de zeolitas sintéticos, porosos, aluminosilicatos metálicos. Los espacios vacíos de las celdas cristalinas pueden atrapar materia adsorbida; el diámetro de los

pasadizos, controlado por la composición del cristal, regula el tamaño de las moléculas que pueden entrar o ser excluidas. Por lo tanto, las mallas pueden separar de acuerdo con el tamaño molecular, y también por adsorción de acuerdo con la polaridad molecular y el grado de insaturación. Se utilizan para la deshidratación de gases y líquidos, la separación de mezclas de hidrocarburos gaseosos y líquidos y para una gran variedad de procesos. Se regeneran por calentamiento o elución. (Treybal, 1988)

Tabla No. 11: Principales características de ciertos desecantes encontrados en el mercado

Desecante	Características	Ventajas	Desventajas
Cloruro de calcio anhidro CaCl_2	<ul style="list-style-type: none"> * Adecuado para secados preliminares * Se recomienda para hidrocarburos y sus derivados halogenados y para éteres 	<ul style="list-style-type: none"> * Gran capacidad (6 moléculas de agua por molécula de CaCl_2) * Relativamente barato 	<ul style="list-style-type: none"> * Lento * Moderadamente eficaz * Generalmente inadecuado para compuestos ácidos y para alcoholes, fenoles, cetonas, aminas, aminoácidos y algunos aldehídos y éteres
Sulfato de sodio Na_2SO_4	<ul style="list-style-type: none"> * Adecuado para compuestos como ácidos grasos, aldehídos, cetonas, halogenuros de alquilo 	<ul style="list-style-type: none"> * Barato * Gran capacidad de secado (a temperaturas $< 33^\circ\text{C}$ puede formar hasta un decahidrato) * Recomendado como agente de secado preliminar para eliminar grandes cantidades de agua especialmente en soluciones etéreas. 	<ul style="list-style-type: none"> * Lento * Baja eficacia \rightarrow casi inservible para disolventes en los que el agua se disuelve poco * Se activa a 240°C
NaOH anhidro, o KOH anhidro		<ul style="list-style-type: none"> * Los más adecuados para secar aminas 	<ul style="list-style-type: none"> * No se utilizan para el secado de compuestos que tienen contacto con los mismos.
Gel de sílice o tamices moleculares	<ul style="list-style-type: none"> * Por adsorción 	<ul style="list-style-type: none"> * Adsorbe hasta 40% de su masa en agua * Duro y granular * Poroso (~ 0.6) * Se utiliza principalmente para la deshidratación de aire y otros gases. * Se puede revivir por evaporación de la materia adsorbida. 	<ul style="list-style-type: none"> * Contenido de humedad inicial: 4 a 7%.
Pentóxido de fósforo	<ul style="list-style-type: none"> * Uso principal: uno de los más poderosos agentes desecantes que se conocen 	<ul style="list-style-type: none"> * Afinidad extraordinaria hacia el agua 	<ul style="list-style-type: none"> * Reacciona desprendiendo gran cantidad de calor.
Sulfato de calcio anhidro o diedrita		<ul style="list-style-type: none"> * Inerte, puede usarse con la mayoría de compuestos * Regenerable 	<ul style="list-style-type: none"> * Baja capacidad de hidratación (6.6% de su peso en agua) * Se activa a 250°C durante 6h

Continuación Tabla No.11

Desecante	Características	Ventajas	Desventajas
Tamices moleculares	<ul style="list-style-type: none"> * Por adsorción * Las moléculas polares quedan fuertemente adsorbidas 	<ul style="list-style-type: none"> * Extraordinariamente eficaces para eliminar el vapor de agua de los gases * Muy rápidos * Pueden reactivarse por secado en horno a 300°C * Alta capacidad de adsorción de agua y compuestos polares a concentraciones relativamente pequeñas 	

b. Equipo para el secado de gases. Se utiliza gas caliente para la regeneración. El gas húmedo procede del lecho que se está regenerando y puede descargarse a la atmósfera o bien la mayor parte del agua se separa en un condensador y el gas se hace recircular al lecho a través de un sistema de calefacción. Para secadores pequeños se instalan con frecuencia calentadores eléctricos dentro del lecho para suministrar la energía de regeneración. (McCabe, 2007)

Cuando la regeneración se realiza a presión mucho más baja que la de adsorción no es necesario suministrar calor toda vez que la presión favorece la desorción. Si un secador de gases opera a varias atmósferas de presión durante un ciclo de adsorción, se puede conseguir una regeneración casi completa pasando parte del gas seco a través del lecho, a la presión atmosférica, sin calentamiento previo. Parte del calor de adsorción, que está almacenado en el lecho como calor sensible, se utiliza para la desorción y el lecho se enfría durante la regeneración. La cantidad de gas que se necesita para la regeneración es sólo una fracción del gas de alimentación del ciclo de adsorción, puesto que el gas que sale a 1 atm tendrá una fracción molar de agua mucho mayor que el gas de alimentación. Aplicando el mismo principio, la regeneración al vacío ofrece una alternativa a la regeneración con vapor de agua o con gases calientes cuando la adsorción se realiza a la presión atmosférica. (McCabe, 2007)

c. Regeneración. Se han publicado pocos estudios acerca de la cinética de la regeneración, dado que es difícil reproducir las condiciones para un gran lecho adiabático en un adsorbedor de laboratorio. (McCabe, 2007)

Una alternativa consiste en desplazar el adsorbato por medio de un gas o un líquido que sea fuertemente adsorbido en forma moderada y se pueda separar fácilmente del producto. Muchos materiales pueden ser adecuados para la regeneración por desplazamiento, ya que un adsorbato puede ser desplazado casi por completo por otras especies, incluso si la sustancia que desplaza está adsorbida con menor fuerza. (McCabe, 2007)

d. Diseño de adsorbedores. El diseño de un adsorbedor para purificación de gas o líquido implica la elección del adsorbente y el tamaño de la partícula, seleccionando una velocidad apropiada para obtener el área del lecho, y también determinar la longitud del lecho para un ciclo de tiempo determinado o calcular el tiempo de ruptura para una longitud escogida. Utilizando una longitud de lecho menor significa un pequeño inventario de sorbente y una baja caída de presión en el lecho. Sin embargo, el lecho más corto significa una regeneración más frecuente y altos costos de regeneración. (McCabe, 2007)

e. Tipos de adsorción. Existen dos tipos de fenómenos de adsorción: físicos y químicos. (Treybal, 1988)

1) Adsorción física o adsorción de “van der Waals”. Fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. Por ejemplo, cuando las fuerza atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre moléculas del gas mismo, el gas se condensará sobre la superficie del sólido, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante. Cuando ocurra esta condensación, se desprenderá cierta cantidad de calor, que generalmente será algo mayor que el calor latente de evaporación y parecida al calor de sublimación del gas. La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie. Sin embargo, si el sólido es muy poroso y contiene muchos pequeños capilares, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios si es que la sustancia humedece al sólido. Las operaciones industriales de adsorción dependen de su reversibilidad para recuperar el adsorbente (que se vuelve a utilizar), para la recuperación de la sustancia adsorbida o para el fraccionamiento de mezclas. La adsorción reversible no se concreta a los gases, también se observa en el caso de líquidos. (Treybal, 1988)

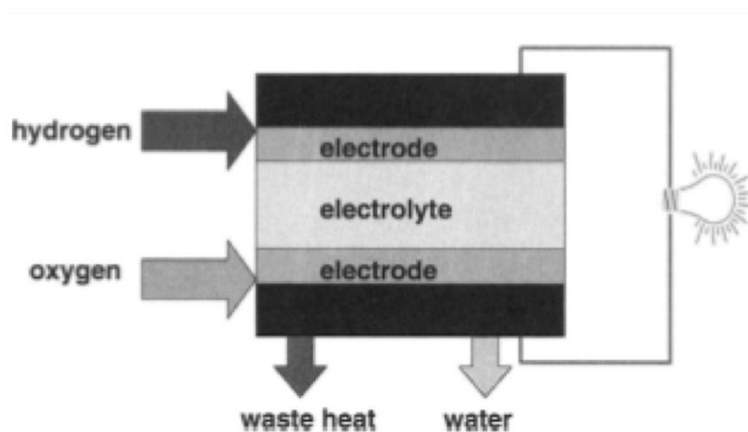
2) Quemisorción o adsorción activada. Resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de la unión química puede variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; pero la fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física. El calor liberado durante la quemisorción es comúnmente grande, es parecido al calor de una reacción química. El proceso frecuentemente es irreversible; en la desorción, de ordinario se descubre que la sustancia original ha sufrido un cambio químico. La misma sustancia, que en condiciones de baja temperatura, sufrirá esencialmente sólo la adsorción física sobre un sólido, algunas veces exhibe quemisorción a temperaturas más elevadas; además, los dos fenómenos pueden ocurrir al mismo tiempo. (Treybal, 1988)

I. CELDAS DE COMBUSTIÓN

Una celda de combustión es un convertidor de energía electroquímica que convierte energía química directamente en corriente directa. Lo hace utilizando una membrana semipermeable, dos electrodos y un electrolito.

En comparación, los combustibles usuales necesitan varios pasos para convertir la energía química en electricidad, las celdas de combustión los hacen en un solo paso.

Figura No. 9: Celda de combustión



1. Tipos de celdas de combustión:

a. Alcalinas: (AFC, por sus siglas en inglés). Utilizan KOH como electrolito. Este es retenido en una matriz (usualmente asbesto) y un gran rango de electrolizadores pueden ser usados como: níquel, plata, óxidos metálicos y metales nobles. Estas celdas son intolerantes al CO₂. Este tipo de celda ha sido utilizada en muchas aplicaciones desde los años 1960's.

b. De membrana de intercambio de protones: (PEMFC, por sus siglas en inglés). Utiliza una delgada lámina (50µm) de un polímero conductivo como el electrolito. El catalizador es típicamente platino sobrepuesto en carbón. La temperatura de operación es de 60 a 80°C. Las celdas PEM son candidatas muy prometedoras para vehículos y aplicaciones de energía pequeñas.

1) Ventajas:

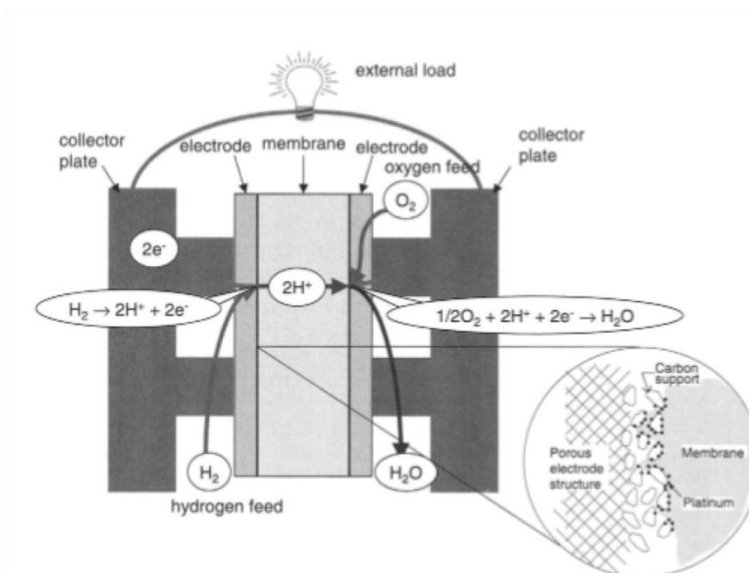
- a) Tecnología completamente madura y probada con información pública y accesible.
- b) Trabaja a temperaturas cercanas a la ambiente.
- c) Existen muchas compañías con celdas disponibles comercialmente.
- d) Existen celdas pequeñas, de menos de 1kW.

2) Funcionamiento: En el núcleo de la celda PEM hay una membrana semipermeable polimérica, que tiene características muy especiales. Es impermeable a gases, pero permeable a protones. Esta membrana que actúa como un electrolito es presionada entre dos electrodos porosos y conductores. Estos electrodos están hechos de papel de fibra de carbono. En la interfase entre los electrodos porosos y la membrana polimérica hay una capa de partículas catalíticas, típicamente platino.

Reacciones electroquímicas ocurren en la superficie del catalizador en la interfase entre el electrolito y la membrana. El hidrógeno, que es alimentado en un lado de la membrana se desenlaza en protones y electrones, los protones viajan por la membrana y los electrones por los electrodos, luego hacia colectores de corriente y hacia el circuito externo en donde realizan trabajo. Luego regresan por el otro electrodo hacia el otro lado de la membrana.

En los lugares catalíticos entre la membrana y el otro electrodo se encuentran con los protones que viajaron a través de la membrana. En este lado, oxígeno es alimentado y, como producto de la reacción electroquímica, se produce agua.

Figura No. 10: Detalle de reacciones dentro de una celda PEM



c. De ácido fosfórico: Utilizan ácido fosfórico como electrolito, y la matriz que lo contiene es usualmente SiC. Los electrolizadores son normalmente hechos de platino. La temperatura de operación es de 150 a 220°C.

d. De carbonato líquido: (MCFC, por sus siglas en inglés). Estas tienen el electrolito compuesto por una combinación de carbonatos alcalinos (Li, Na, K). Que son retenidos en una matriz

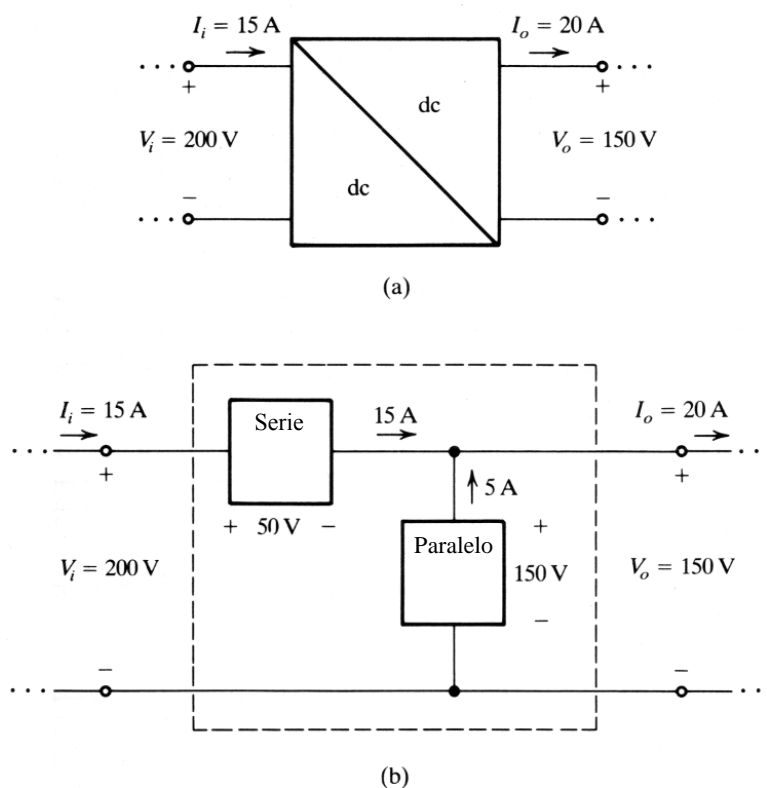
LiAlO. Y la temperatura de operación es entre 600 y 700°C. A estas temperaturas, los carbonatos forman una sal derretida altamente conductiva, y no se necesitan metales nobles.

e. De óxidos sólidos: Utilizan un óxido metálico no poroso, usualmente YO estabilizado y ZrO como electrolito. Estas celdas operan entre 800 y 1,000°C en donde se da la conducción iónica.

J. CONVERSIÓN DE VOLTAJE ELÉCTRICO DC/DC

En los procesos de conversión de voltaje DC/DC, el dispositivo que haga la conversión se comporta como una caja negra (a) con las siguientes características de entrada y salida.

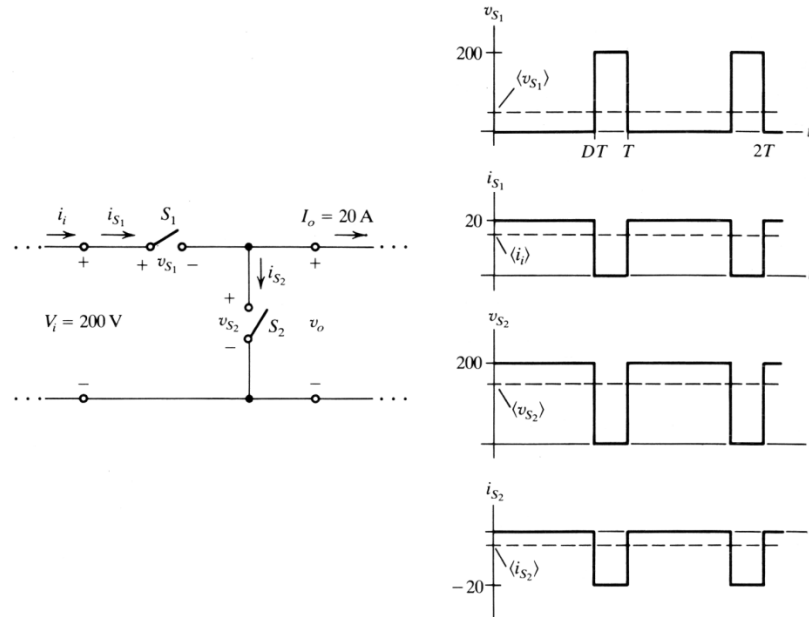
Figura No. 11: Caja negra de un convertidor DC/DC



Esta caja consta de dos elementos, uno en serie y el otro en paralelo (b). El voltaje de salida corresponde al voltaje del elemento en paralelo, y la diferencia entre el voltaje de salida y el de entrada cae a través del elemento en serie.

En su forma más sencilla, estos elementos son dos interruptores (S_1 y S_2 como aparecen en la Figura no.12 (ver pág.35) que se activan y desactivan de manera alterna. Evidentemente esto produce una señal cuadrada, no una señal DC. La conversión a DC se realiza por medio de filtros. Si el switch S_1 está el 100% del tiempo activo, el voltaje de entrada y el voltaje promedio de salida son iguales. Si está encendido el 50% del tiempo activo, el voltaje promedio de salida es la mitad del voltaje de entrada. La corriente máxima de entrada es la misma que la corriente máxima de salida.

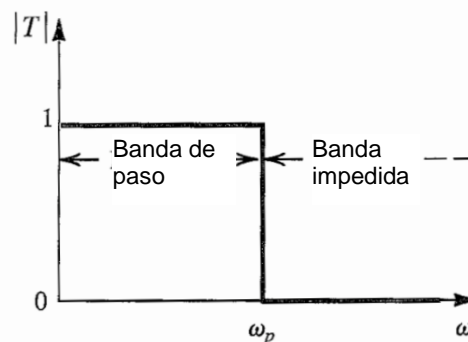
Figura No. 12: Señal de entrada y salida de un convertidor DC/DC



K. FILTROS PASA BAJA

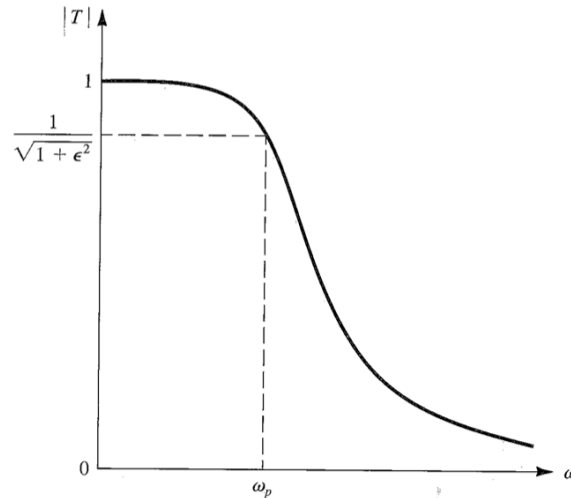
Son circuitos cuya función de transferencia $T(s)$ tiene las características que se muestran en la siguiente figura:

Figura No. 13: Función de transferencia $T(s)$. $|T|$ vs ω (rad/s)



Estos circuitos eliminan las componentes de alta frecuencia de una señal de entrada, y dejan pasar las de baja frecuencia. La Figura No. 13 muestra un filtro ideal. En la práctica, los filtros pasa baja tienden a mostrar características diferentes, dependiendo de la forma en que se construyan. Un ejemplo de filtro real presenta la siguiente función de transferencia.

Figura No. 14: Función de transferencia $T(s)$ de un filtro pasa baja tipo Butterworth. $|T|$ vs ω (rad/s)



L. CONSIDERACIONES DE EFICIENCIA

Si la caja negra que corresponde al convertidor de energía se comportara de forma ideal, la energía que entra sería la misma a la que sale. En la práctica esto no es cierto, existen pérdidas de energía que se disipan en forma de calor, en circuitos de control o en dispositivos de señalización. Se deben minimizar estas pérdidas para que el sistema sea útil.

Para alcanzar este requerimiento es necesario utilizar elementos que no disipen energía, o que disipen una pequeña cantidad. Los capacitores y los inductores tienen esta característica, estos almacenan la energía y su disipación es pequeña.

M. TRANSFORMADA DE LAPLACE DE UNA FUNCIÓN

Para realizar el análisis de un filtro, es útil hacerlo en el dominio S por medio de la aplicación de la transformada de Laplace. Es una herramienta matemática que facilita en gran parte el análisis de señales en sistemas lineales e invariantes (SLI).

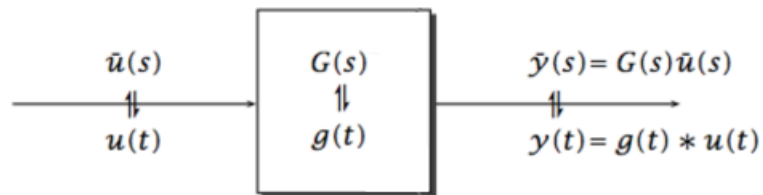
Para funciones, la transformada de LaPlace toma la siguiente forma, en donde $f(t)$ es la señal en cuestión. A partir de esto se puede construir un diagrama de Bode, el cual proporciona información útil del comportamiento de un SLI.

Ecuación No. 20

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-st} f(t) dt.$$

En los SLI, la función de salida en el dominio S corresponde a la multiplicación de la función de transferencia y la función de entrada.

Figura No. 15: Señal de entrada $u(s)$, función de transferencia $G(s)$



V. DISEÑO

A. CRITERIO Y MODELOS PARA EL DISEÑO DEL ELECTROLIZADOR PEM

A continuación se presenta una descripción de los distintos modelos y criterios que se tomaron en cuenta para el diseño del dispositivo generador de hidrógeno por electrólisis.

Lo que se pretendió fue diseñar un dispositivo que fuera lo suficientemente versátil y flexible en su construcción para que este pudiera operar a las condiciones óptimas demandadas por el módulo de almacenamiento de hidrógeno.

1. Selección de tecnología de electrólisis: Como primera consideración del diseño, se decidió optar por la tecnología de membrana de intercambio de protones (PEM), esto debido a que este tipo de tecnología permite trabajar en amplios rangos de presión (1-400 bar), temperatura (80-150 °C), densidad de corriente (1-3 A/cm²) y eficiencia (73-84 %). Todos estos parámetros de operación se encuentran en un rango idóneo que permiten el acondicionamiento del gas para el módulo de almacenamiento.

2. Tipo de electrolizador (stack): Se consideró un electrolizador tipo filtro prensa con electrodos bipolares utilizando un arreglo de las celdas en serie, lo cual permite un diseño y construcción sencilla y flexible. Este tipo de electrolizador permite operar a altos voltajes y altas corrientes, al igual que permite la sencilla separación de los gases de procesos en flujos independientes.

3. Componentes del electrolizador: En este segmento se mencionarán los criterios de selección de cada uno de los componentes del electrolizador.

a. *Ensamble de membrana y electrodos (MEA):* En vista a que el insumo a utilizar como materia prima para la generación de hidrógeno sería agua pura desionizada, se decidió utilizar un ensamblado de membrana y electrodos el cual consiste en una membrana electrolítica de ácido perfluorosulfónico recubierta de catalítico pulverizado en ambas caras de la misma, este recubrimiento juega la función de ánodo y cátodo en la celda electrolítica. Este tipo de tecnología permite una mayor conductividad en el sistema sin necesidad de adicionar un electrolítico en solución. Este producto es de la marca registrada NAFION®.

b. *Placas bipolares:* Se optó por placas de grafito grado “Fuelcell” debido a que es un material maniobrable, resistente y además cumple con todos los requerimientos de estabilidad química (resistencia a la corrosión), buena estabilidad mecánica (compresión) y excelente conductividad (>100 S cm⁻¹).

c. *Difusores de gas*: El contacto uniforme del difusor con los electrodos recubiertos fue el principal criterio por el cual se decidió utilizar un difusor de cuatro mallas de titanio expandido soldadas a una última malla delgada de titanio expandido recubierta de platino. Este diseño no solo permite un contacto y distribución uniforme de la corriente, también promueve la separación, ruptura y difusión de las burbujas de gas en la cara de los electrodos. Este producto es de la marca registrada PLATION®.

d. *Empaques*: La estabilidad química y la dureza son las características más importantes a considerar cuando se trabaja con membranas poliméricas, esto con el objeto de garantizar la impermeabilidad del sistema y extender la vida útil de las membranas. Con base en estos criterios el material más recomendado es el EPDM, pero debido a su escasez en el mercado guatemalteco se optó por un sustituto de neopreno.

e. *Especios*: Los espejos deben de contar con la suficiente fuerza, rigidez y dureza para soportar y contener todas las celdas electrolíticas unidas en serie, el material utilizado debe tener la capacidad de empalmar a presión todos los componentes de la celda con el fin de garantizar un mejor contacto entre las placas bipolares, difusores y electrodos al igual que garantizar un sellado uniforme de los empaques y así evitar fugas. Bajo este criterio se optó por placas de acero inoxidable ya que cumple con todas las especificaciones y además sus propiedades mecánicas permiten su fácil trabajo mecánico y manipulación. Los espejos serían fabricados en un taller local bajo especificaciones de diseño.

f. *Colectores de corriente*: Los colectores de acero inoxidable son la mejor opción debido a cuentan con una conductividad aceptable y es químicamente estable, además en un material muy común y económico en el mercado en comparación con los metales nobles (metales preciosos), los cuales son escasos y extremadamente caros.

4. Cálculos de diseño: En este apartado se describen los cálculos realizados para el diseño del electrolizador con una capacidad de producción de hidrógeno de 100 mL/min y operando a una presión de 14 bares, haciendo uso de la curva característica de desempeño del ensamblado de membranas y electrodos (MEA) seleccionado. Las curvas de desempeño de la MEA seleccionada fueron determinadas de forma empírica (Apéndice) para luego dimensionar el dispositivo al tamaño requerido.

a. *Número de celdas*: El número de celdas en electrolizador se determina utilizando las curvas de desempeño de la MEA HYDRion™ N117 seleccionada (Apéndice) y el flujo de hidrógeno requerido de 100mL/min. Para esto se utiliza el flujo de producción de hidrógeno correspondiente al voltaje máximo permitido por celda, dato especificado en la hoja técnica del producto el cual es de 2.5V. El flujo de hidrógeno determinado en la curva de desempeño para el voltaje máximo es de 20mL/min determinando el número de celdas con la siguiente razón:

Ecuación No. 21

$$N_{celdas} = \frac{m_{requerido}}{m_{celda}}$$

Donde el flujo de hidrógeno requerido $m_{requerido} = 100\text{mL}/\text{min}$, y el flujo de hidrógeno por celda

$$m_{celda} = 20\text{mL}/\text{min}.$$

$$N_{celdas} = \frac{100\text{mL}/\text{min}}{20\text{mL}/\text{min}} = 5 \text{ celdas}$$

b. *Voltaje máximo de operación:* El voltaje máximo de operación corresponde al voltaje máximo permitido por celda multiplicado por el número de celdas que componen el electrolizador PEM, esta relación se puede realizar debido a que la configuración en serie distribuye uniformemente el voltaje en cada una de las celdas, respetando la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchhoff para circuitos en serie de corriente directa (DC):

Ecuación No. 22

$$V_{max\ total} = IR_{total}$$

para circuitos en serie:

$$V_{max\ total} = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)$$

$$V_{max\ total} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 + IR_5$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5$$

Ecuación No. 23

$$V_{max\ total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$$

Con la ley de Ohm (Ecuación No. 22)

$$V_{max} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5$$

Ecuación no. 24

$$V_{max\ total} = N_{celdas}V_{max}$$

$$V_{max\ total} = 5 * 2.5V = 12.5V$$

c. *Corriente teórica de operación:* La corriente que consume el sistema determina la cinética del proceso electroquímico, de ésta depende el flujo de gas que produce el dispositivo. La corriente depende exclusivamente de la resistencia eléctrica del sistema.

La corriente que debe consumir el sistema para producir $0.1\text{L}/\text{min}$ puede determinarse utilizando el modelo de Faraday para electrolisis asumiendo que la corriente suministrada por la fuente es constante y que pasa a misma por cada celda, respetando la ley de Ohm (Ecuación No. 22).

$$\dot{m} = 0.1\text{L}/\text{min} = 0.000133\text{g}/\text{s}$$

Ecuación No. 25

$$A = \frac{m\dot{F}z_+}{M N_{celdas}}$$

El valores de m ya se conoce y $z = 2$, que corresponde a la cantidad de moles de electrones por cada mol de hidrógeno producido, $N_{celdas} = 5$ corresponde al numero de celdas conectadas en serie.

$$A = \frac{\left(\frac{0.000133g}{s}\right) \left(\frac{96,485C}{mol}\right) (2)}{\left(\frac{2.001g}{mol}\right)} =$$

$$= 2.6 \left(\frac{C}{s}\right) \text{Amperios} = 2.5 A$$

d. *Capacidad de agua del sistema:* La capacidad volumétrica del sistema se calcula a partir de la cantidad de agua requerida para generar los 600L demandados por el módulo de almacenamiento.

$$(600L \text{ de } H_2) * \left(\frac{1m^3}{1000L}\right) * \left(\frac{80g}{1m^3}\right) * \left(\frac{1mol \text{ de } H_2}{2.001g \text{ de } H_2}\right) * \left(\frac{1mol \text{ de } H_2O}{1mol \text{ de } H_2}\right) * \left(\frac{18.002g \text{ de } H_2O}{1mol \text{ de } H_2O}\right)$$

$$* \left(\frac{1 ml \text{ de } H_2O}{1g \text{ de } H_2O}\right) = 431mL$$

B. ESPECIFICACIONES DEL ELECTROLIZADOR PEM

1. Hardware:

a. *Espejos:* Los espejos son placas rectangulares de acero inoxidable 304 de un centímetro de espesor, estas cuentan con sus respectivas huellas de arandela y empaque de 1/8” para un mejor acoplamiento del sistema. Los espejos cuentan con seis pernos de 1/4” de acero inoxidable de una longitud de once centímetros, longitud suficiente para el acoplamiento de hasta 10 celdas electrolíticas.

b. *Empaques:* Los empaques rectangulares son de 1/16” de espesor hechos de neopreno, poseen un diseño de marco con uñas y agujeros en los extremos opuestos, el área interna del marco se ajusta al área activa de los las electrodos ensamblados a la membrana (MEA).

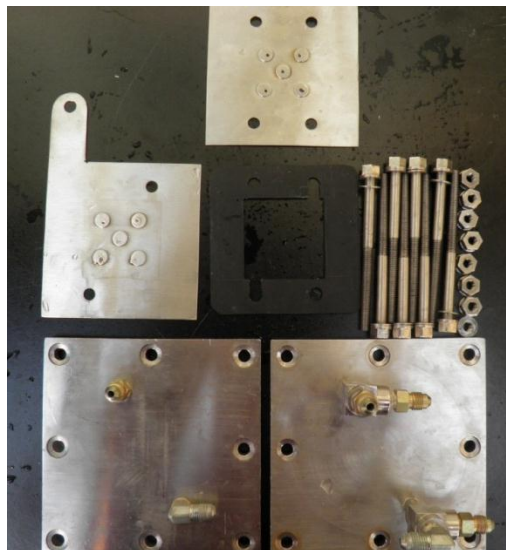
c. *Colectores:* Los colectores son placas rectangulares de acero inoxidable 304, con 3/16” de espesor, estas cuentan con cinco discos dentro del perímetro del área de los electrodos, esto con el fin de

mejorar el contacto entre el difusor y el electrodo, los colectores también cuentan con terminales eléctricas donde se conecta la fuente.

d. *Placas bipolares*: Las Placas bipolares son placas rectangulares de acero inoxidable 304, con 3/16" de espesor, estas cuentan con cinco discos dentro del perímetro del revestimiento de electrodos, esto con el fin de mejorar el contacto entre el difusor y el electrodo. Las placas bipolares cuentan con cuatro orificios que permiten el flujo de gases independientes y agua de alimentación.

e. *Difusores*: Los difusores son cuatro mallas de titanio expandido soldadas a una última malla delgada de titanio expandido recubierta de platino, estos son difusores especiales para las MEAs HYDRion™. Este producto es de la marca registrada PLATion™.

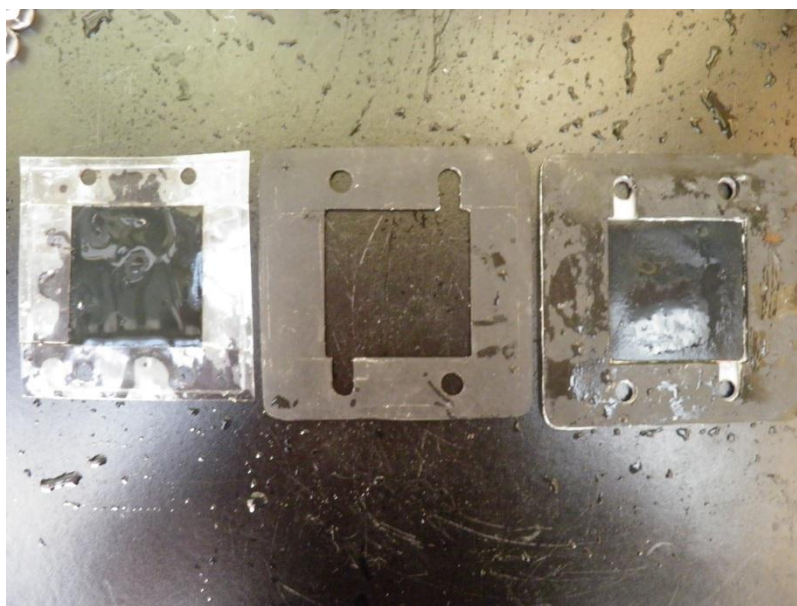
Figura No. 16: Vista general de algunos componentes del hardware del electrolizador PEM



2. Ensamblado de membrana y electrodo (MEA): El ensamblado de membrana y electrodos es un arreglo especial para electrólisis de agua la cual está compuesta de una membrana polimérica de ácido perfluorosulfónico de 8x8 cm y 183 micrones de espesor recubierta con una capa de catalítico pulverizado de 5x5 cm que corresponde a los electrodos, este revestimiento catalítico posee una composición patentada de titanio y platino en distinta proporción en ambas caras de la membrana, esto dependiendo de la cara en que se realice la oxidación y la reducción. Esta puede operar a voltajes no mayores a 2.5 voltios, densidades de corriente no mayores a 3 A/cm² y temperaturas no mayores a 80C°. El modelo del producto es HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane marca patentada por NAFION®.

En el electrolizador cada una de la MEAs fue protegida en el contorno no revestido de catalítico pulverizado con un polímero Mylar especial para incrementar la vida útil de la membranas. De igual forma cada una de las MEAs fue empalmada y sellada con los empaques diseñados con el fin de garantizar la hermeticidad del sistema y facilitar el ensamblado de las celdas en el electrolizador.

Figura No. 17: Vista general de todos los componentes de cada celda electrolítica



3. Equipo auxiliar:

a. Tanques separadores gas-líquido: Los separadores de oxígeno e hidrógeno son tanques de acero 304 de 40mL y 713mL de capacidad respectivamente. Estos son tanques cilíndricos con tapas roscadas y sello de neopreno. El separador tiene la capacidad de contrarrestar la diferencia en la relación molar de los gases formados durante la electrolisis, ajustando las columnas de agua en ambos separadores y así poder operar a condiciones de presión constante (isobárico) en todo el sistema. Los tanques fueron contruidos para soportar una presión de hasta 700 psi.

b. Válvula de aguja: El control flujo en el sistema se hace a través de válvulas de aguja en cada uno de los separadores gas -líquidos, estas válvulas especiales para altas presiones soportan una presión de hasta 3,000 psi y poseen conexiones hembra de 1/4" NPT.

c. Manómetro: El control de presión en el sistema se realiza a través de un manómetro ASHCROFT de 600 psi, este regula la presión en todo el sistema ya que este opera a condiciones isobáricas. El manómetro servirá para determinar el volumen de gases producido por el sistema.

d. *Mangueras:* Las mangueras utilizadas son de teflón revestidas con maya de acero inoxidable. El sistema cuenta con cuatro mangueras, dos mangueras para los separadores gas-líquido y dos mangueras que sirven de puentes de alimentación de agua entre los espejos.

Figura No. 18: Vista general de los separadores Gas- Líquido (Agua- Oxígeno y Agua- Hidrógeno).

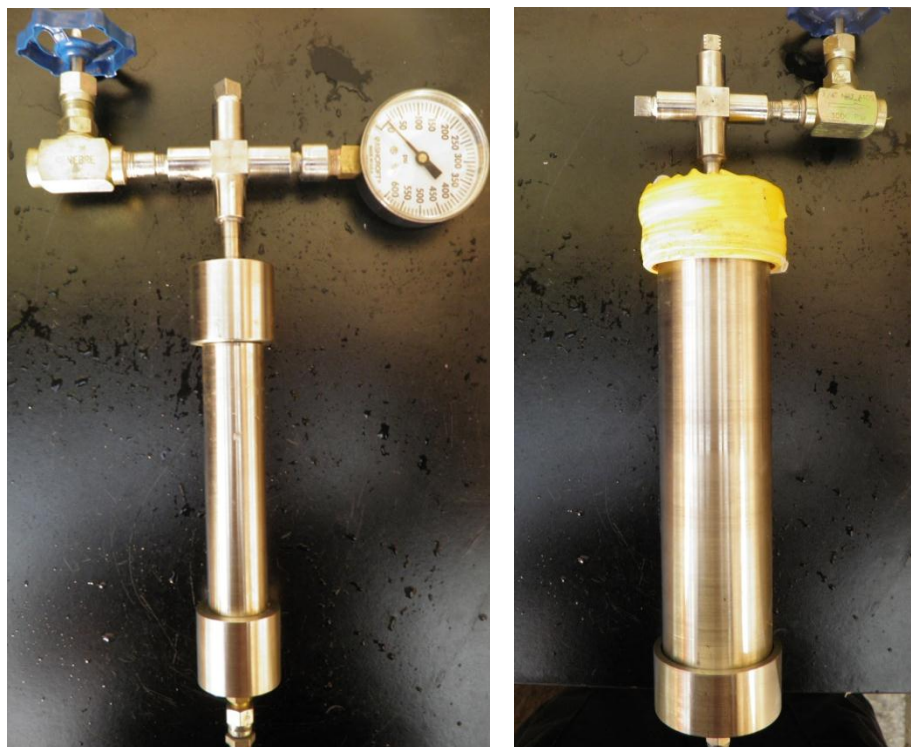


Figura No. 19: Manómetro y válvula de aguja de sistemas de separación Gas-Líquido

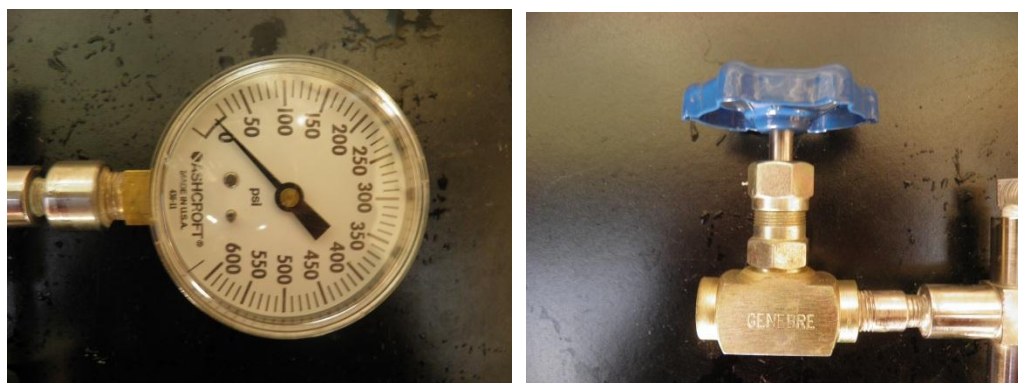
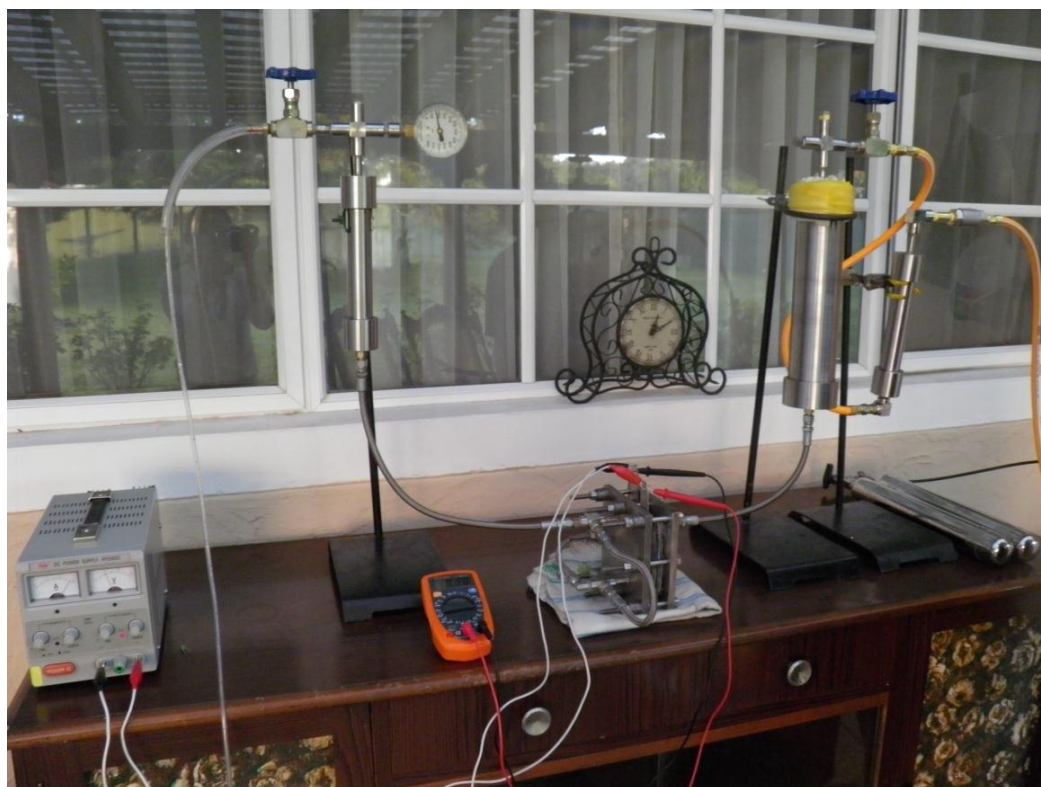


Figura No. 20: Vista general de dispositivo generador de hidrógeno por electrólisis**Tabla No. 12:** Especificaciones de la celda electrolítica (stack)

Cantidad	Componentes	Parámetros del diseño	Valor
2	Espejos	Material	Acero Inoxidable 304
		Espesor, mm	10
		Dimensiones, mm	140 x 140
		Diámetro de tubería de entrada y salida, inch	1/8"
4	Placas bipolares	Material	Acero Inoxidable 304
		Espesor, inch	3/16
		Dimensiones, mm	105x105
		Diámetro de orificios, inch	1/8
10	Difusores de corriente	Materiales	Titanio expandido recubiertas de platino
		Espeso, mm	1.067
		Dimensiones, mm	50 x 50
		Marca	PLATion™

Continuación Tabla No.12

Cantidad	Componentes	Parámetros del diseño	Valor
10	Empaques	Materiales	Neopreno
		Espesores, inch	1/6
		Dimensiones externas, mm	100x100
		Dimensiones internas, mm	52x52
		Diámetro de orificios, mm	1/8
2	Colectores de corriente	Material	Acero Inoxidable 304
		Espesor, inch	3/16
		Dimensiones, mm	105x105
5	Ensamblado de membranas y electrodos	Material de PEM	Ácido Perfluorosulfónico
		Dimensiones de PEM, mm	80x80
		Espesor de PEM, micrones	183
		Material cátodo	Platino pulverizado
		Material ánodo	Titanio y platino pulverizado
		Dimensiones de electrodos, mm	50x50
		Marca	HYDRion™
		Área activa, cm ²	25

Tabla no. 13: Especificaciones del equipo auxiliar

Cantidad	Componentes	Parámetros del diseño	Valor
1	Tanque Separador Oxígeno-Agua	Material	Acero Inoxidable 304
		Diámetro interno, mm	15
		Altura, mm	220
		Espesor, mm	15
		Volumen nominal, mL	40
		Diámetro de accesorios, inch	1/8
1	Tanque Separador Hidrógeno-Agua	Material	Acero Inoxidable 304
		Diámetro interno, mm	55
		Altura, mm	300
		Espesor, mm	15
		Volumen nominal, mL	620
		Diámetro de accesorios, inch	1/8
1	Manómetro	Marca	ASHCROFT
		Rango de presión, psi	0-600
		Diámetro de instalación, inch	¼" NPT macho

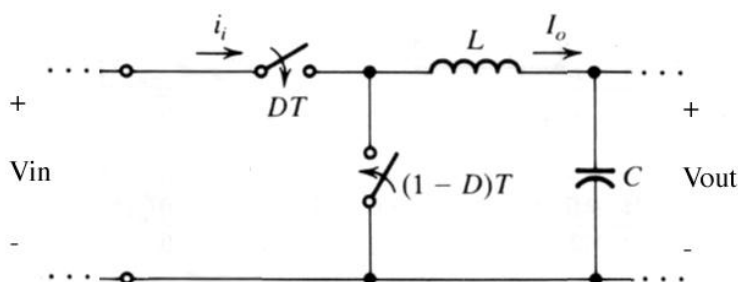
Continuación Tabla No.13

Cantidad	Componentes	Parámetros del diseño	Valor
2	Válvula de aguja	Marca	Genebre
		Presión máxima, psi	3,000
		Diámetro de instalación, inch	1/4" NPT hembra
4	Mangueras reforzadas	Marca	Mangueras San Antonio
		Material	Neopreno con revestimiento de acero
		Presión máxima, psi	1,700
		Diámetro de instalación, inch	1/8" hembra
		Longitud, mm	150 y 300

C. EL CONVERTIDOR DIRECTO DE ALTA FRECUENCIA

El convertidor directo consta de dos interruptores y un filtro. El convertidor modifica el voltaje entre la entrada y la salida del sistema sin consumir potencia significativa.

Figura No. 21: El convertidor directo con periodo de conmutación T y ciclo de trabajo D

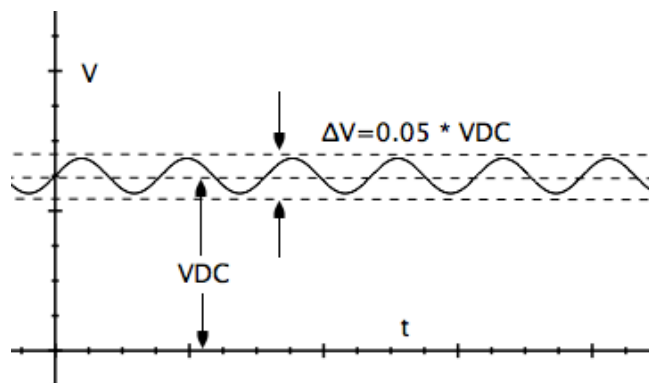


Se asume que el voltaje de entrada es DC estable. Si los interruptores conmutan a alta frecuencia y el capacitor junto al inductor son suficientemente grandes, entonces las señales de alta frecuencia de los interruptores serán filtradas.

El capacitor en paralelo y el inductor en serie forman el filtro pasabaja. La frecuencia de conmutación, el tamaño del inductor y del capacitor deben ser definidas de manera analítica para que el filtrado sea adecuado y se logre una señal DC en la salida.

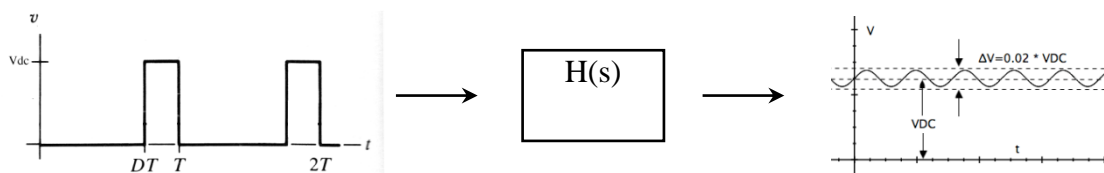
1. Especificación del filtro. El proceso de especificación el filtro comienza detallando los requerimientos de la señal de salida. Se fijó el requisito para el sistema, el cual debe cumplir que $\Delta V \leq 0.05 * VDC$:

Figura No. 22: Nivel de distorsión máxima para la señal DC de salida



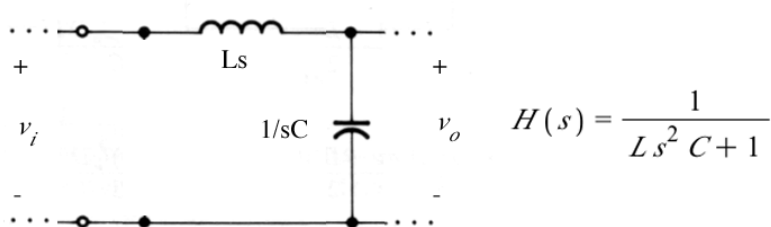
La señal que se desea filtrar es la que conmutan los interruptores de la Figura No. 21 Para que cumpla los requerimientos de la Figura No. 22.

Figura No. 23: Sistema de filtrado en el convertor directo



En donde $H(s)$ surge a partir del tipo de filtro que utilizamos y la disposición en que conectamos los componentes. Para la siguiente figura y Ecuación No. 20 (ver pág.37) las condiciones iniciales del sistema son cero.

Figura No. 24 y Ecuación No. 26: Circuito y función de transferencia del filtro



Se puede observar que la frecuencia de corte de este filtro pasa baja depende de los valores de L y C . Fijando L , se puede variar C hasta llegar a la frecuencia de corte deseada.

a. Medición de la inductancia de un inductor. Fue necesario determinar la inductancia de manera experimental. Para esto se construyó un circuito RL y se le aplicó una función escalón como se muestra en la figura no.26. Este sistema tiene condiciones iniciales iguales a cero.

Figura No. 25 y Ecuación No. 27: Circuito RL y la solución a la ecuación diferencial correspondiente

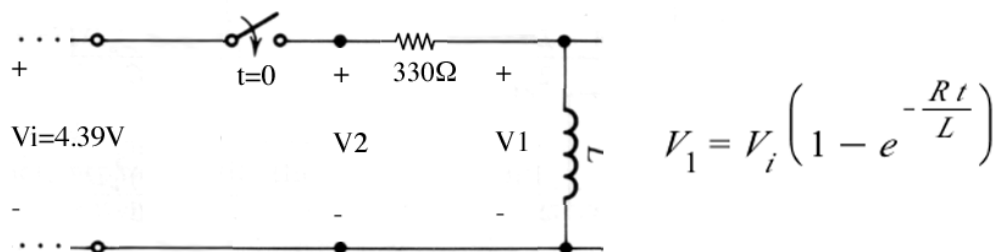
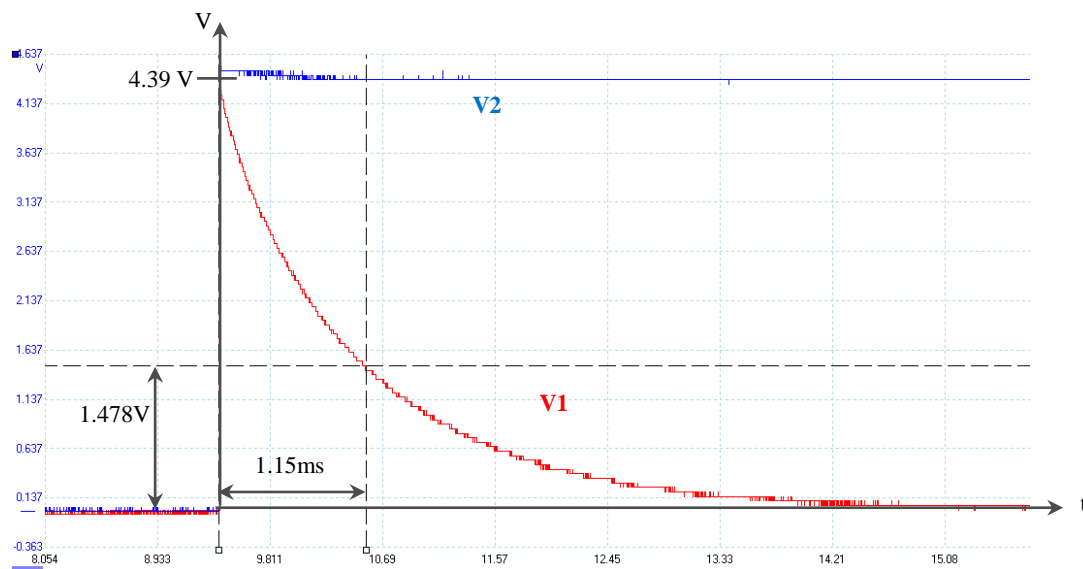


Figura No. 26: Mediciones sobre el circuito RL



Ecuación No. 28

$$L = - \frac{Rt}{\ln\left(-\frac{(V_1 - V_i)}{V_i}\right)}$$

Tabla No. 14: Resultados de la medición de un inductor

Variable	Valor
R	330 Ω
T	1.15 ms
V ₁	1.47 V
V _i	4.39 V
L	0.84 H

b. Determinación de la frecuencia de los interruptores. La frecuencia que se utiliza para conmutar los interruptores está en el rango de 10-20kHz debido a las siguientes características:

1) Es un rango suficientemente alto comparado con la frecuencia de las líneas de alimentación convencionales a 60Hz. Lo cual hace que los armónicos se filtren en su mayoría.

2) Es un valor suficientemente bajo, que permite a un generador de pulsos (ej. Un microcontrolador) modificar el ciclo de trabajo de la señal al menos 10,000 veces por segundo. Lo cual será útil más adelante en este documento.

3) Como punto de partida, en el proceso de iterativo del diseño, se utiliza la frecuencia de 15 kHz.

c. Determinación del valor de la capacitancia. Teniendo el valor de la inductancia, $L=0.84\text{H}$ y el valor de la frecuencia de entrada $f=15\text{kHz}$. Procedemos a evaluar los criterios para determinar la capacitancia del filtro.

El convertidor de voltaje directo se utilizará más adelante para generar una señal sinusoidal de 60Hz, por lo tanto, el filtro no debe eliminar señales que se encuentren en la vecindad de esa frecuencia, el rango de 1 a 100Hz. Esto nos delimita la capacitancia a dos criterios:

1) El filtro debe cumplir con el requisito $\Delta V \leq 0.05 \cdot V_{DC}$ como se muestra en la Figura No. 22 (ver pág.48).

2) El filtro no debe eliminar las señales en el rango de los 1-100Hz.

Para poder llegar a cumplir estos criterios necesitamos encontrar una expresión analítica para la frecuencia de corte del filtro pasa bajas. La Ecuación No.29 proviene de la función de transferencia del circuito de la Figura No.24 (ver pág.48)

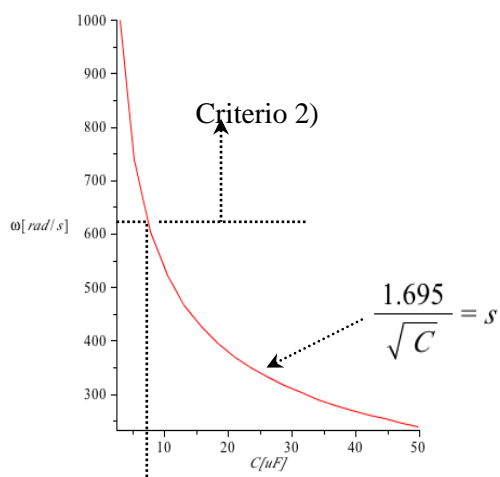
Ecuación No. 29

$$20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{1}{0.84 \cdot C \cdot s^2 + 1} \right| \right) = -3$$

Utilizando software de cálculo, los datos obtenidos y la función de transferencia, se analizó la relación entre la capacitancia y la frecuencia de corte ($|H(s)| = -3\text{dB}$) del filtro, utilizando la magnitud de las soluciones complejas de la Ecuación No. 20 (ver pág.37) en términos de C se llegó a la gráfica de la Figura No.27. Se puede observar como la frecuencia de corte disminuye al aumentar la capacitancia.

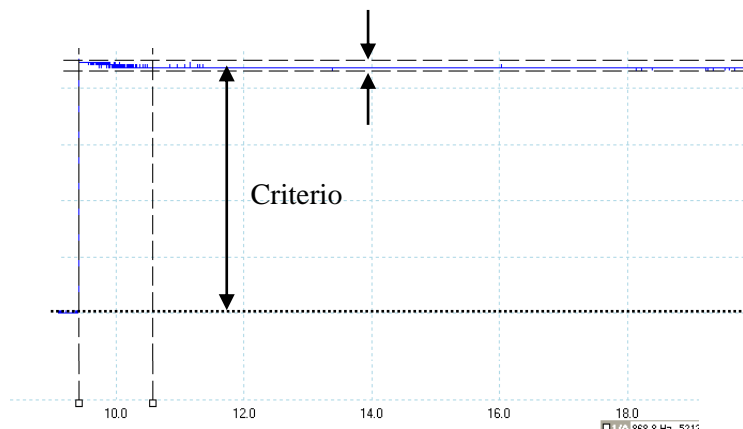
Para cumplir con el criterio 2), la capacitancia máxima que se puede utilizar es $C=7.27\mu\text{F}$. Se decidió utilizar el capacitor comercial de $4.7\mu\text{F}$, para una frecuencia de corte de 124Hz.

Figura No. 27: Gráfica de capacitancia C [μF] vs. frecuencia de corte ω_c [rad/s]

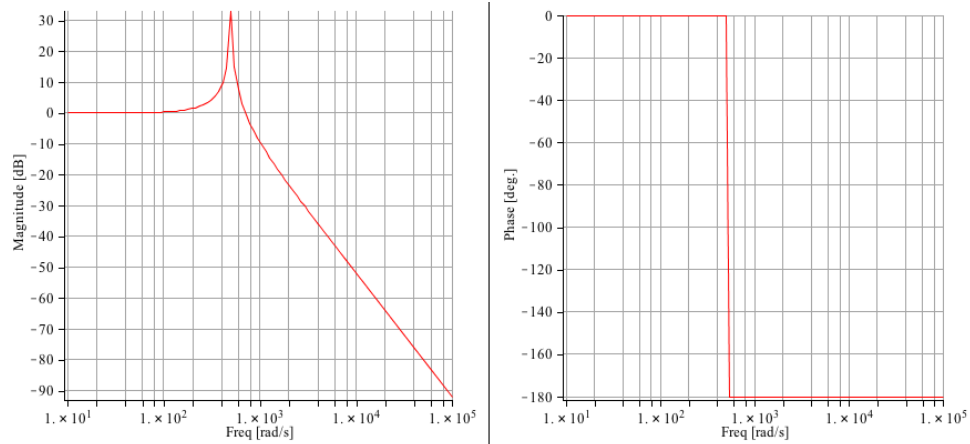


Para verificar el criterio 1) se construyó el circuito de la Figura No. 21 (ver pág.47) y se midió ΔV . Utilizando un voltaje de entrada de 12 V y un ciclo de trabajo de 40% a 15 kHz, el voltaje de salida se muestra en la siguiente figura.

Figura No. 28: Resultados de la medición de ΔV



d. Resumen y resultados de la especificación del filtro. Una vez especificados los componentes del filtro podemos elaborar el diagrama de Bode. Tiene una frecuencia de corte de 124 Hz, no existe amplificación para el rango de 0 a 100 Hz y existe atenuación para el rango de 300 Hz en adelante. No existe cambio de fase para el rango 0 a 700 Hz.

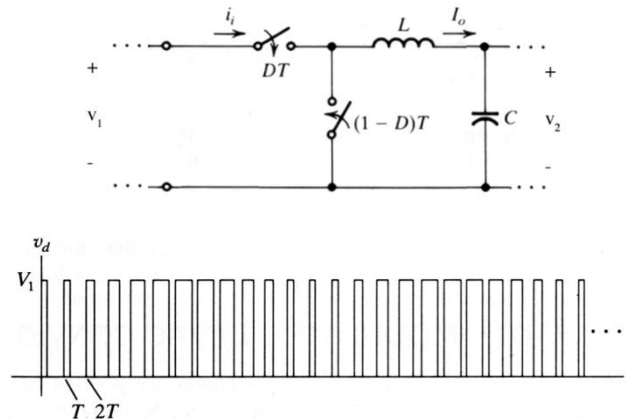
Figura No. 29: Diagrama de Bode, ganancia y fase del filtro

D. GENERACIÓN DE UNA ONDA SINUSOIDAL

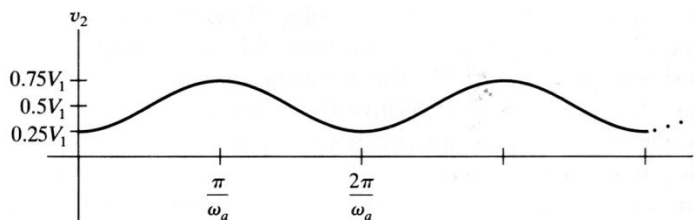
El convertidor directo de alta frecuencia puede utilizarse para generar ondas sinusoidales, esto se hace variando el ciclo de trabajo de la conmutación de los interruptores.

Se debe cumplir que el filtro deje pasar la frecuencia de la onda que se quiere generar. Lo cual ya fue previsto en el capítulo anterior. Basados en los datos de dicho capítulo y en el dimensionamiento del filtro podemos afirmar que la frecuencia sinusoidal de 60 Hertz no va a ser atenuada significativamente. También sabemos que el sistema cumple el criterio DC ($\Delta V \leq 0.05 \cdot V_{DC}$).

Para un ciclo de trabajo d , hay un valor DC correspondiente en la salida. Utilizando un microcontrolador se genera una conmutación de los circuitos, variando el ciclo de trabajo de forma sinusoidal. A esta señal se le denomina PWM (Pulse Width Modulated).

Figura No. 30: Conmutación con un ciclo de trabajo variado de forma sinusoidal

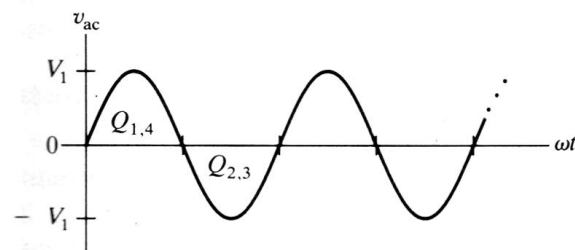
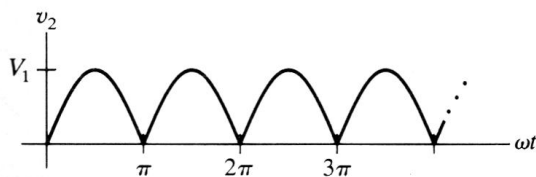
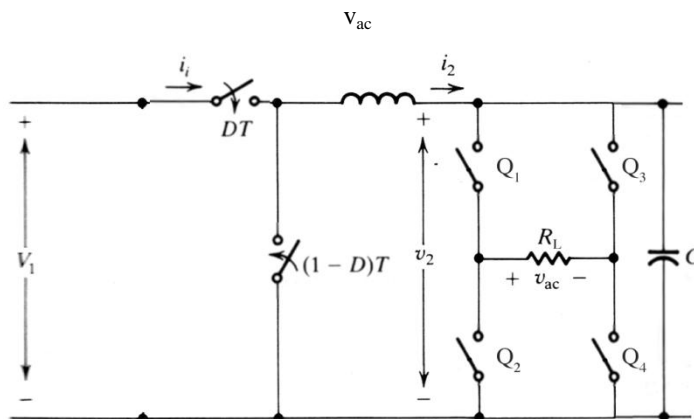
Continuación de Figura No.30



Los interruptores deben conmutarse a una frecuencia suficientemente baja para que un microcontrolador a 8MHz utilizando 4 ciclos por instrucción pueda modificar el ciclo de trabajo de la señal al menos 10,000 veces por segundo. Esto permite tener una resolución de 166 valores por ciclo en la onda sinusoidal a 60Hz, lo cual elimina la mayoría de transientes y picos.

Debido a que la onda sinusoidal se debe generar simétrica respecto al eje x. Es necesario invertir la señal PWM para crear la parte negativa de la onda. Esto se realiza por medio de un puente H. El cual cada media de onda, invierte la señal y vuelve a modularla de forma sinusoidal.

Figura No. 31: Puente H para generar la parte negativa de la señal y gráficas del voltaje en los puntos v_2 y



E. CONTROL DE INTERRUPTORES

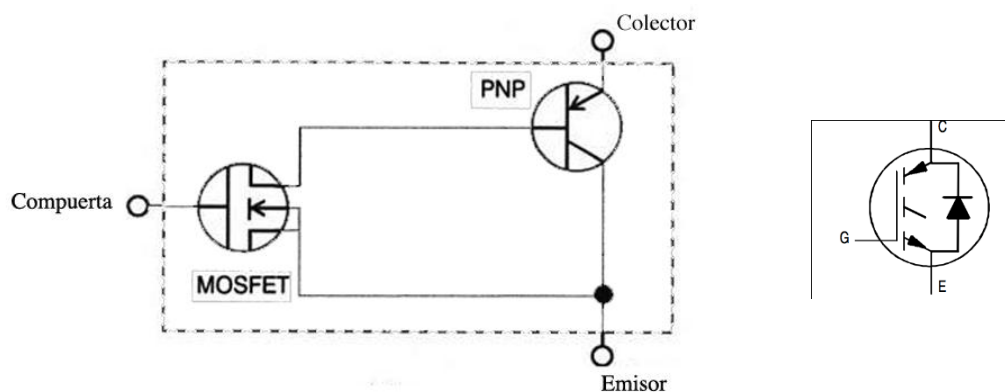
El tipo de interruptores utilizados en este sistema son Transistores IGBT. Comúnmente soportan conmutar en el rango de 10-50 kHz, además existen elementos discretos de alta potencia hasta 1kW. Estos están disponibles y son producidos comercialmente en grandes cantidades.

Los transistores IGBT combinan las ventajas de un Transistor MOSFET: La alta velocidad de reacción y facilidad para controlar (la corriente de la compuerta es cero). Con las de un BJT: La alta capacidad de corriente a bajo costo.

Las principales características de un transistor IGBT:

- Tiene una caída de voltaje pequeña entre colector y emisor, y tiene una alta capacidad de corriente en su estado activo.
- Utiliza poca potencia para conmutar y es de fácil control comparado con los dispositivos controlados por corriente (ej. BJT).
- Tiene un excelente bloqueo de voltaje en ambas direcciones, en su estado inactivo.

Figura No. 32: Circuito equivalente para un transistor IGBT canal N



A continuación se muestran los valores específicos de las variables importantes de los transistores utilizados en el sistema (IRG4PH50UDPbF):

Tabla No. 15: Características del transistor IGBT IRG4PH50UDPbF

Símbolo	Parámetro	Mínimo (V)	Típico (V)	Máximo (V)	Condiciones
$V_{(BR)CES}$	Voltaje máximo entre colector y emisor			1,200	
$V_{CE(on)}$	Voltaje de saturación colector emisor (modo interruptor)	2.56	2.56	3.5	$I_C = 20 \text{ A}$ $V_{GE} = 15 \text{ V}$
$V_{GE(th)}$	Voltaje umbral en la compuerta (para activar modo interruptor)	3.0		6.0	$V_{CE} = V_{GE}$ $I_C = 250 \mu\text{A}$
P a 25°C	Potencia máxima disipada				200 W

Continuación Tabla No.15

Símbolo	Parámetro	Mínimo (V)	Típico (V)	Máximo (V)	Condiciones
I_c a 25°C	Corriente continua en el colector				45 A

Para activar el transistor IGBT, el circuito de control debe superar el umbral V_{GE} . En el caso del puente H, existen 2 transistores que tienen el voltaje del emisor conectado a tierra. Esto nos permite controlarlo fácilmente debido a que el $V_{GE}=V_G$.

En el caso de los dos transistores que están del lado alto del puente H (Q_1 y Q_3), el voltaje V_G debe estar 6.0 V sobre el voltaje V_E . Esto presenta un problema para activar el transistor, ya que V_E es el voltaje del inductor, y este tiene una variación en el tiempo.

Además hay un momento en el cual V_E llega muy cerca al voltaje de alimentación del sistema, el cual es el voltaje máximo disponible.

1. Control de un transistor en el lado alto (Q_1 y Q_3) del puente H. Existen varias estrategias para mantener el voltaje V_{GE} sobre el umbral. Algunas de las más simples se listan en la siguiente tabla: Ver sección de Anexos, Tabla No. 47 (pág.138) para más detalle.

Tabla No. 16: Estrategias para mantener al voltaje V_{GE} sobre el umbral

Estrategia	Circuito	Ventajas/Desventajas
Fuente de poder flotante		<ul style="list-style-type: none"> • Control de la compuerta por tiempo indefinido. • El costo de agregar una fuente extra es alto. • Los opto aisladores tienen un costo alto.
Método carga de un capacitor flotante		<ul style="list-style-type: none"> • Simple y de bajo costo. El ciclo de trabajo y el tiempo de encendido están limitados por la carga del capacitor. • Si el capacitor es cargado utilizando el voltaje más alto del sistema, puede consumir potencia considerable. • Necesita opto aisladores con costo alto.

La estrategia utilizada es la de cargar un capacitor flotante. Este es un circuito bastante simple que se puede implementar con pocos componentes. Además existen integrados llamados “ICs” que implementan esta estrategia y están disponibles comercialmente.

2. Funcionamiento del método de carga de un capacitor flotante

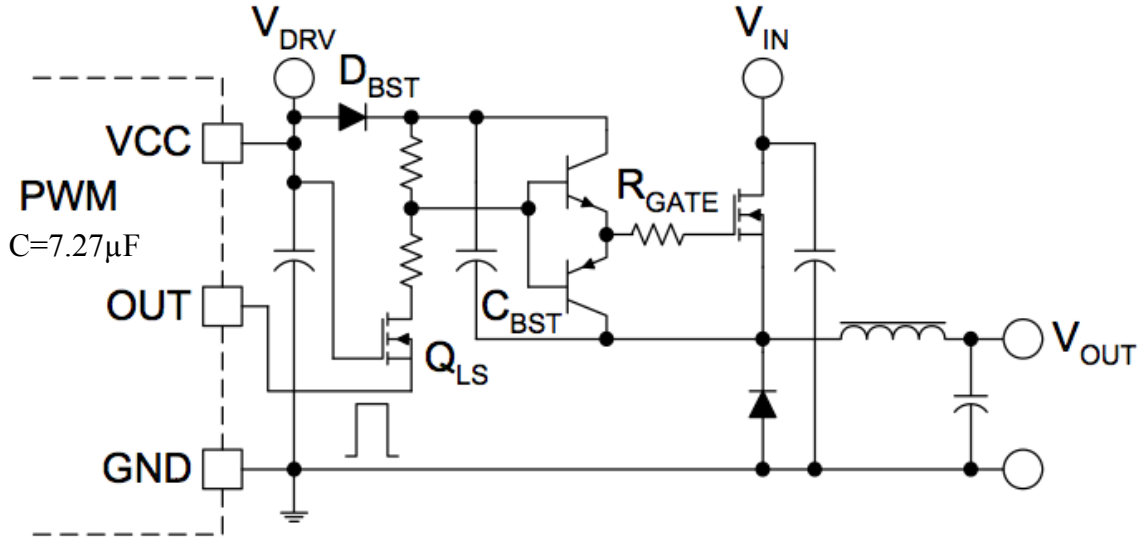
a. En el momento en el que el PWM envía un alto, Q_{LS} se desactiva. C_{BST} estaba cargado del ciclo anterior, lo cual alimenta la corriente de base para los BJTs que alimentan R_{gate} el cual activa el IGBT, esto se puede observar en el circuito de la siguiente figura.

b. Al activarse el el IGBT, su emisor, el cual está conectado al inductor, se eleva a un valor cercano a V_{IN} .

c. En este momento el diodo D_{BST} bloquea el voltaje proveniente del inductor. Y el voltaje del capacitor se suma al voltaje del emisor. Esto mantiene al IGBT activo mientras C_{BST} se descarga (esto limita el tiempo de activación.)

d. En el momento en el que el PWM envía un bajo, Q_{LS} se activa y descarga rápidamente al C_{BST} . Los BJTs se desactivan, lo cual desactiva el IGBT. Esto hace que el voltaje del emisor disminuya a cero, esto ocasiona que el capacitor se cargue a V_{DRV} .

Figura No. 33: Implementación del circuito de control tipo “capacitor flotante”



La implementación de este circuito se realizó utilizando un integrado ICs IRS2011(S)PBF.

F. CONVERTIDOR DC/AC

En vez de utilizar 6 transistores como en la Figura No. 31 (ver pág.53) se pueden utilizar los mismos transistores del puente H para realizar la conmutación, y mover el filtro al puente.

El Microcontrolador se encarga de las líneas de control y de la señal PWM. Un relé es el que se encarga de conectar o desconectar la fuente de poder principal o la de reserva. Un regulador sirve como fuente de poder para el microcontrolador y los ICs.

En la salida la señal sinusoidal es transformada a 110VAC. Como protección existen 2 fusibles, uno para cada fuente de poder a 15A (a 12VDC representan 180W, lo cual está por debajo de la capacidad de un transistor IGBT (200W). (ver Figura No. 35, pág.81)

Tabla No. 17: Características de los componentes

Elemento	Característica
Lc + Lt	0.84 H
C1	4.7 μ F
Cb	1 μ F
R ₁ = R ₂	330 Ω
Q ₁ , Q ₂ , Q ₃ , Q ₄	IRG4PH50UDPbF
Microcontrolador	PIC18F4620
IGBT Driver	IR2011
Regulador variable de voltaje	LM317
B1, B2	Fusible 15 A
V +	12 VDC (Fuente principal o secundaria)
VCC	5VDC
RL1	Función auxiliar 1
RL2	Función auxiliar 2

G. FUENTE DE PODER DE FRECUENCIA VARIABLE DE SEÑAL CUADRADA

Utilizando una fuente de poder DC existente a 12 V, se le implementó medio puente H utilizando transistores IGBT. Como protección se le agregó un fusible a 15A, para un total de 180W. Para el control se utilizó un microcontrolador con señal PWM y con las siguientes funciones: (ver Figura No. 36, pág.82)

1. Dos botones, para incrementar o disminuir la frecuencia entre 5kHz y 10kHz. Esto se muestra de forma incremental a través de 5 LEDs (1, 2, 3, 4, 5) montados en el panel.
2. Dos botones, para incrementar o disminuir el ciclo de trabajo, entre 1% y 99%. Esto se muestra a través de 3 LEDs (LED 6, 7 y 8). Los 3 LEDs encendidos significan potencia máxima.

VI. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL MÓDULO DE ALMACENAMIENTO

Los componentes que integran el módulo de almacenamiento fueron seleccionados a partir de distintos criterios y parámetros, presentados a continuación:

A. Regulador de presión posterior a separador gas-líquido

1. Fluido: hidrógeno, no corrosivo. Se puede utilizar latón como material adecuado.
2. Presión de generación de hidrógeno: 1.58×10^6 Pa (230 psi), correspondiente a la presión de entrada al regulador de presión.
3. Presión sugerida de carga en tanque de almacenamiento: Entre 1.5 a 2.5 MPa (218 a 363 psi). Por lo que la presión de salida en el regulador debe abarcar un rango por encima de dichos valores ya que existe una caída de presión en el deshumidificador utilizado, que se encuentra entre el regulador y el tanque de almacenamiento.
4. Conexiones:
 - a. Entrada: ¼’’ NPT, válvula de aguja al final del separador gas hidrógeno-agua.
 - b. Salida: Manguera reforzada para gas de ¼’’ que soporta hasta 4.96×10^6 Pa (720 psi).
5. Costo: A continuación se presentan las opciones más accesibles en cuanto a costo y más favorables en términos de tiempo de entrega.

Tabla No. 18: Cotizaciones más relevantes correspondientes al regulador de presión previo al deshumidificador

Empresa	País	Especificaciones	Costo* (\$)	Costo de envío* (\$)	Costo total* (\$)	Tiempo de envío
McMaster	Estados Unidos	*Material: Latón *Presión máxima de entrada: 2.41×10^7 Pa *Rango de presión de salida: 0 – 3.45 MPa *Conexiones: ¼’’	246.43	44.36	290.79	Venden únicamente a clientes específicos fuera de EEUU
Xuzhou Hongye Apparatus & Instrument Co., Ltd	China	*Material: Latón *Presión de entrada: ≤ 18.5 MPa *Presión de salida: ≤ 3 MPa *Rango de presión en manómetro de entrada: 0 – 25 MPa *Rango de presión en manómetro de salida: 0 – 4 MPa	219.85	70.90	290.75	10 días hábiles luego de recibir el pago

*Tasa de cambio: Q. 7.86 = \$ 1

6. Seguridad: Cuenta con válvulas de seguridad tanto para la presión baja como la presión alta. Además, cuenta con un año de garantía por parte del proveedor.

B. Desecante: Silica gel

1. Fluido: Hidrógeno en estado gaseoso. La silica gel se utiliza principalmente para la deshidratación de aire y otros gases.

2. Humedad del hidrógeno producido: $(27\pm 7)\%$ (p/p), humedad a ser removida en su mayoría para prolongar la vida útil de la aleación contenida en el tanque de almacenamiento. La eficiencia de absorción en dicho tanque puede verse estancada por la oxidación que puede ocasionar el oxígeno presente en la humedad.

3. Capacidad de adsorción: Hasta 40% de su masa en agua. Sin embargo, su contenido de humedad inicial oscila entre un 4 a 7% (p/p). Además, cuenta con una porosidad de alrededor de 0.6 por lo que cuenta con una gran área de superficie interna que favorece la retención de humedad.

4. Regeneración: Se puede revivir por evaporación de la humedad adsorbida. (Treybal, 1988). Además, el deshumidificador opera a varias atmósferas (~15 atm) de presión durante la adsorción, pudiéndose conseguir una regeneración casi completa pasando parte del hidrógeno seco a través del lecho, a presión atmosférica, sin calentamiento previo. La cantidad de gas que se necesita para la regeneración es sólo una fracción del gas de alimentación del ciclo de adsorción, puesto que el gas que sale a 1 atm tendrá una fracción molar de agua mucho mayor que el gas de alimentación. (McCabe, 2007).

5. Accesibilidad: De venta en comercios locales de productos químicos hacia cualquier cliente.

C. Tanque de hidruro metálico: Aleación AB_5 , intermetálico de baja temperatura; $LaNi_5$

1. Densidad volumétrica: $64.61 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$,

2. Presión de carga y descarga:

a. Presión de carga: La presión sugerida por el proveedor se encuentra entre el rango de 1.5 a 2.5 MPa (218 a 363 psi), presión mucho menor a la requerida en un proceso de almacenamiento gaseoso (150 a 200 bar).

b. Presión de descarga: 0.3 MPa (44 psi) a 20°C. Entre más alta sea la temperatura de la aleación durante la descarga, la presión y el flujo de liberación será mayor ya que la adición de calor al sistema desplaza el equilibrio hacia la desorción. Dicha presión se encuentra por encima de la presión de operación de la celda de combustión: 0.05 a 0.06 MPa por lo que se requirió de un regulador de presión posterior a los tanques de almacenamiento.

3. Temperatura de carga y descarga

a. Temperatura de carga: ambiente, ya que la tasa de generación de hidrógeno que se espera es baja (alrededor de 0.1 L/min). Debido a que el proceso de absorción es una reacción exotérmica, la temperatura que alcanzan los tanques durante la carga debe ser monitoreada ya que ésta no debe superar los 45°C para evitar la descomposición de la aleación. Si se desea incrementar la tasa de almacenamiento, los tanques se pueden colocar en un baño de agua fría o diseñar una carcasa adecuada para que opere como un intercambiador de calor. El proveedor sugiere que para alcanzar una tasa de almacenamiento alrededor de 20L/min, se puede utilizar un baño de agua a 0°C. Alcanzando la capacidad (600L, nominal) de los mismos en 30 min a una presión de carga de 2.0 MPa.

b. Temperatura de descarga: El tipo de aleación es de bajas temperaturas por lo que el requerimiento energético en la descarga es bajo. La transferencia de calor que se da entre los alrededores (25°C) y la superficie de los tanques es suficiente para brindar el flujo que demanda la celda de combustión para alcanzar su máxima potencia, 2.8L/min. A temperatura ambiente (25°C), el flujo máximo de hidrógeno de salida se encuentra entre 2 a 3 L/min.

4. Flujo de H₂ de descarga: Depende de la temperatura a la que se encuentre la aleación, ya que el proceso de desorción se lleva a cabo mediante un proceso endotérmico. A temperatura ambiente (25°C), el flujo máximo de descarga de hidrógeno se da entre 2 a 3 L/min.

5. Pureza recomendada del hidrógeno: Mayor o igual a 99.99%. El proceso de generación de hidrógeno por electrólisis no genera productos adicionales al hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, puede existir un cierto grado de mezcla entre ambos gases, incluyendo trazas de agua en los mismos. Por lo que como mínimo se requiere de un proceso de deshumidificación del gas. Además, se recomienda un proceso adicional de purificación que puede ser por adsorción sobre tamices moleculares para remover trazas de gas oxígeno.

6. Costo y tiempo de entrega

Tabla No. 19: Cotizaciones realizadas para la adquisición de los tanques de almacenamiento

Empresa	País	Especificaciones	Costo* (\$)	Costo de envío* (\$)	Costo total* (\$)	Tiempo de envío
Fuel Cell Markets	Francia	*Aleación: AB ₅ *Capacidad: 600L *Presión de carga: 2MPa *Presión de descarga: 0.3MPa (20°C) *Flujo de descarga: 2 a 3 L/min *Tiempo de recarga: 30 min (baño de agua a 0°C) *Ciclos de vida: > 2,000 *Material del tanque: Acero inoxidable *Dimensiones: 11.5 x 11.5 x 24 cm *Peso: 14.8 lb	2,244	326.78	2,570.78	4 semanas

Continuación Tabla No.19

Empresa	País	Especificaciones	Costo* (\$)	Costo de envío* (\$)	Costo total* (\$)	Tiempo de envío
Golden Saqi Technology	China	*Aleación: TiMn ₂ *Capacidad: 500L *Presión de carga: 2 a 3 MPa (20°C) *Presión de descarga (25°C): 0 a 1.5MPa *Temperatura de carga: 0 a 30°C *Temperatura de descarga: 5 a 50°C *Flujo de descarga: 1.5 L/min *Pureza del H ₂ : >99.99% *Material del tanque: Aluminio *Dimensiones: 6 x 33 cm *Peso: 6.8 lb *No venden los conectores, no se logró confirmar las dimensiones de las conexiones.	500	100	600	10 días hábiles después de recibir el pago
Whole Win Materials	China	*Aleación: AB ₅ *Capacidad: 300 L *Presión de carga: 2 a 3 MPa *Presión de descarga: 1.2 MPa (25°C) *Flujo de descarga: 2 L/min (20°C) *Tiempo de recarga: ≤ 30 min (baño de agua a 20°C) *Dimensiones: Diámetro 7.3 cm, largo 34 cm *Peso: 8.8 lb	770	138.6	908.60	4 semanas
		*Aleación: AB ₅ *Capacidad: 500 L *Presión de descarga: ≤ 1.2 MPa *Flujo de descarga: 3 L/min (20°C) *Tiempo de recarga: ≤ 30 min (baño de agua a 20°C) *Dimensiones: Diámetro 8.8 cm, largo 35 cm *Peso: 13.2 lb	975	175.50	1,150.50	4 semanas

Continuación Tabla No.19

Empresa	País	Especificaciones	Costo* (\$)	Costo de envío* (\$)	Costo total* (\$)	Tiempo de envío
Tianjin Highland Energy Technology Development Co, Ltd.	China	*Aleación: AB ₅ , intermetálico de baja temperatura *Capacidad: 600 NL (Nominal Liters) *Presión de carga: 1.5 a 2.5 MPa *Presión de descarga: 0.3 MPa *Flujo de descarga: 2 a 3 L/min (por convección, 25°C) *Tiempo de recarga: ≤ 30 min (baño a 0°C) *Ciclos de vida: > 5,000 veces con H ₂ con una pureza mayor a 99.99% *Material de los tanques: Acero inoxidable *Dimensiones: 5 x 10.5 x 42 cm *Peso: 14.3 lb	1,204	496	1,700	3 semanas luego de la confirmación del pedido y recibir el pago
H Bank Technology, Inc.	China	*Aleación: AB ₅ *Capacidad: 660 L *Presión de carga: 4 a 5 MPa *Presión de descarga: 0.1 a 2 MPa *Flujo de descarga: ≤ 2 L/min (25°C) *Dimensiones: diámetro 7.5 cm, largo 38 cm *Peso: 13.4 lb *Pureza de H ₂ : ≥ 99.99% *Temperatura de carga: 0 – 35°C	2,950	394	3,344	2 semanas

*Tasa de cambio: Q. 7.86 = \$1

D. Regulador de presión posterior a tanque de almacenamiento

1. Fluido: hidrógeno, no corrosivo. Se puede utilizar latón como material adecuado.
2. Presión de descarga de hidrógeno en el tanque: 0.3 MPa (44 psi) a 20°C, correspondiente a la presión de entrada al regulador de presión.
3. Presión de operación en la celda de combustión: Entre 0.05 a 0.06 MPa (7.25 a 8.70 psi).
4. Conexiones:
 - a. Entrada: Manguera no flexible de 6 mm de diámetro exterior.
 - b. Salida: Manguera flexible de 6 mm de diámetro exterior.

5. Costo: A continuación se presentan las opciones más accesibles en cuanto a costo y más favorables en términos de tiempo de entrega.

Tabla No. 20: Cotizaciones más relevantes correspondientes al regulador de presión posterior a los tanques de almacenamiento

Empresa	País	Especificaciones	Costo* (\$)	Costo de envío* (\$)	Costo total* (\$)	Tiempo de envío
McMaster	Estados Unidos	*Material: Latón *Presión máxima de entrada: 2.41×10^7 Pa *Rango de presión de salida: 0.007 a 0.21 MPa *Conexiones: 6 mm	283.26	50.99	334.25	Venden únicamente a clientes específicos fuera de EEUU
Xuzhou Hongye Apparatus & Instrument Co., Ltd	China	*Material: Latón *Presión de entrada: 0 – 1.38 MPa *Presión de salida: 0 – 0.16 MPa *Rango de presión en manómetro de entrada: 0 - 1.6 MPa *Rango de presión en manómetro de salida: 0 – 0.16 MPa	117.40	70.90	188.30	10 días hábiles luego de recibir el pago

*Tasa de cambio: Q. 7.86 = \$ 1

6. Seguridad: Cuenta con válvulas de seguridad tanto para la presión baja como la presión alta. Además, cuenta con un año de garantía por parte del proveedor.

VII. METODOLOGÍA

La metodología dispuesta para el desarrollo del prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno, consta de cinco partes: (1) definición de objetivos y parámetros de operación, (2) revisión bibliográfica, (3) planificación y diseño, (4) construcción y evaluación de diseño y (5) retroalimentación.

La definición de objetivos y parámetros de operación consiste en identificar una necesidad a satisfacer o un problema a resolver, para luego plantear las metas del trabajo. En este trabajo se planteó desarrollar el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno con la capacidad de suministrar 0.5 kW-h.

La revisión bibliográfica es posiblemente la parte más delicada del proceso para el desarrollo del prototipo del UPS, ya que en esta se empieza a realizar un análisis minucioso de los procesos de generación, almacenamiento y consumo de hidrógeno, de las tecnologías disponibles para el desarrollo del dispositivo, de la factibilidad técnica para su construcción y de las condiciones de operación. Esta parte consiste en una revisión amplia de antecedentes de diferentes fuentes bibliográficas y de búsquedas en internet, con el propósito de con un marco teórico extenso que proporcione una variedad de opciones para el diseño del prototipo.

El diseño y planificación consistió en realizar un análisis meticuloso de las opciones previamente recopiladas en la revisión bibliográfica y así seleccionar las mejores alternativas tecnológicas para iniciar el proceso de diseño del prototipo. Durante el proceso de análisis se toma en consideración factores como: materiales, insumos, capacidades, temperatura y presión de operación, dispositivos de control, fuente eléctrica, salida eléctrica e incluso costos de los componentes. Luego se elaboró un cronograma de las actividades críticas. Este cronograma toma en consideración todas las partes del proceso de diseño, listado de materiales, cotizaciones, compra de materiales, construcción y evaluación de diseño.

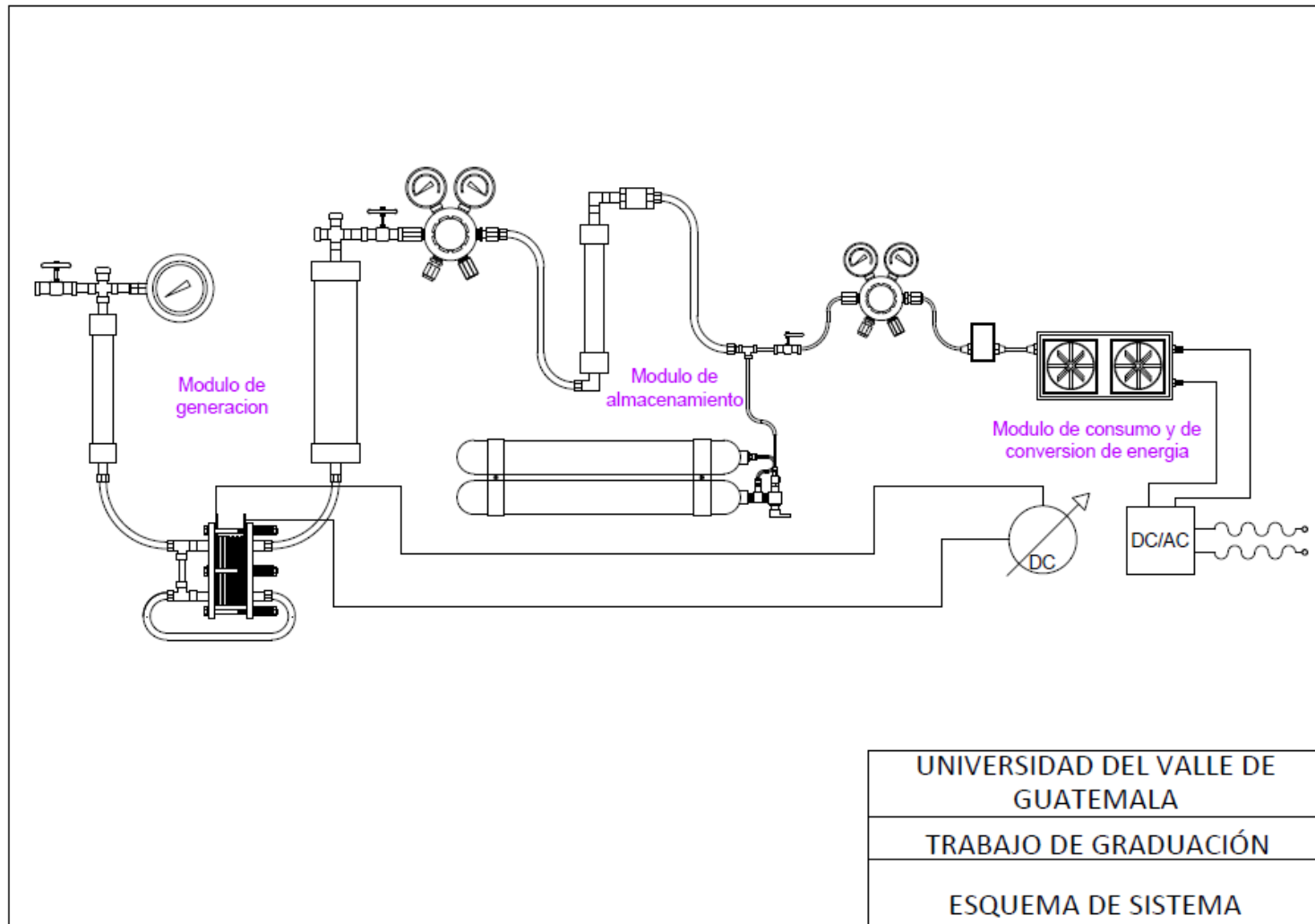
La construcción y evaluación del diseño consiste en resolver los retos técnicos de construcción, al igual que incorporar todos los materiales previstos en el diseño inicial de cada uno de los módulos, para luego realizar la evaluación del diseño, materiales y operación del prototipo.

Por último la retroalimentación tiene la función de analizar, interpretar, los datos e información recolectados de la evaluación del diseño, materiales y operación de equipo para luego poder corregir ciertas condiciones de operación y así optimizar el desempeño del diseño.

Es de suma importancia recalcar que el presente trabajo no se enfoca en el desarrollo de una nueva tecnología alternativa sino en la implementación de distintas tecnologías disponibles para el desarrollo del prototipo de fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno. Esto es importante ya que es el primer paso para relacionarse, entusiasmarse y motivarse en el estudio de esta fuente energética alternativa.

VIII. RESULTADOS

Figura No. 34: Esquema del prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS) a base de hidrógeno



A. ELECTROLIZADOR PEM: GENERACIÓN DE H₂

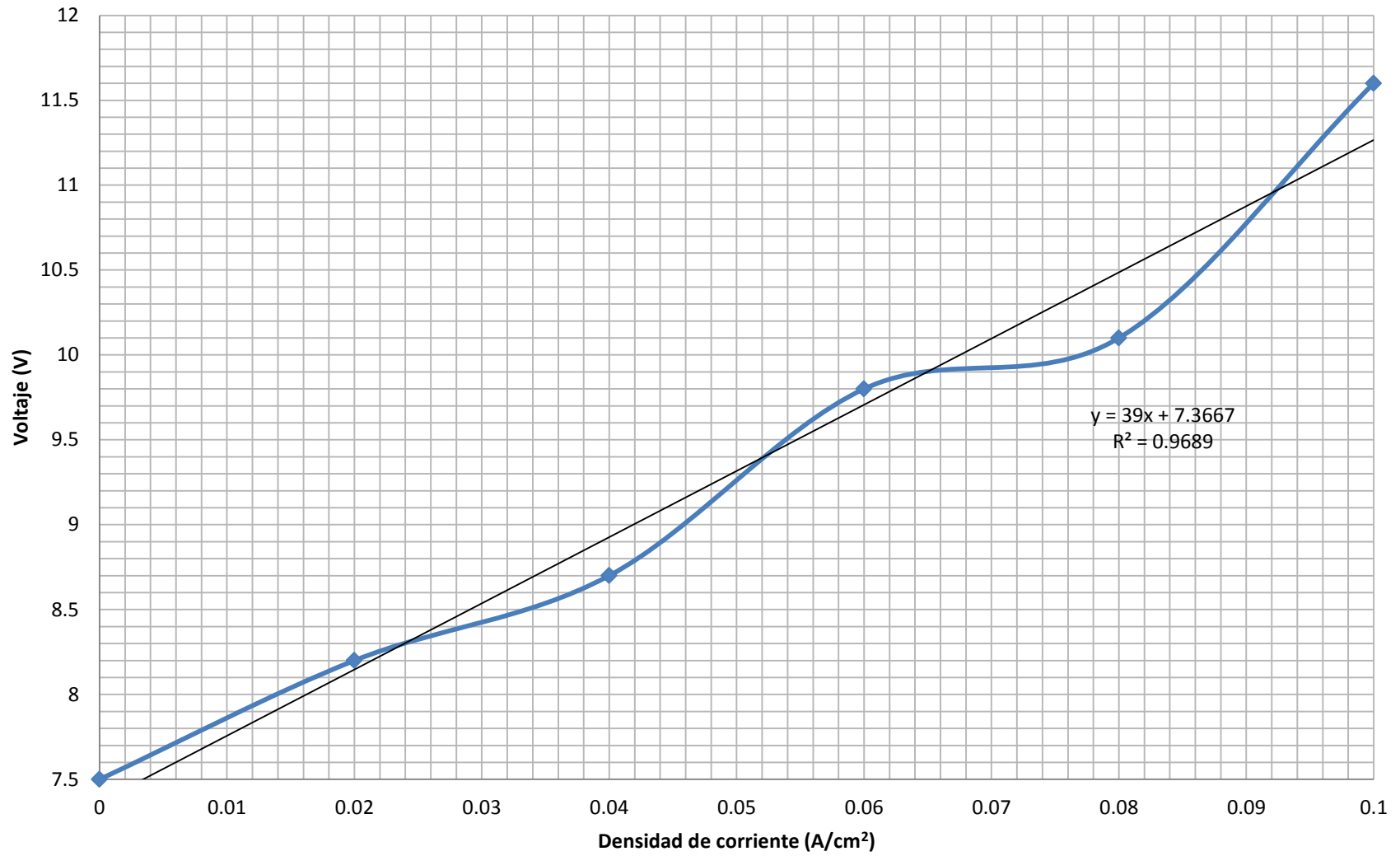
1. Pruebas de equipo. A continuación se presentan todos los resultados y curvas características de operación y desempeño del electrolizador PEM de cinco celdas electrolíticas configuradas en serie al igual que las condiciones óptimas de operación seleccionadas para el módulo de generación.

a. Calibración de electrolizador (PEM) a presión atmosférica. Esta tabla corresponde a la calibración del dispositivo en distintos parámetros de operación, medidos de forma empírica, como calculados utilizando diferentes modelos descritos en los cálculos de muestra. Los parámetros obtenidos empíricamente fueron: voltaje y flujo de hidrógeno, los parámetros calculados fueron: densidad de corriente, potencia, consumo energético y eficiencia energética. Todas las calibraciones se realizaron en función de la corriente de operación.

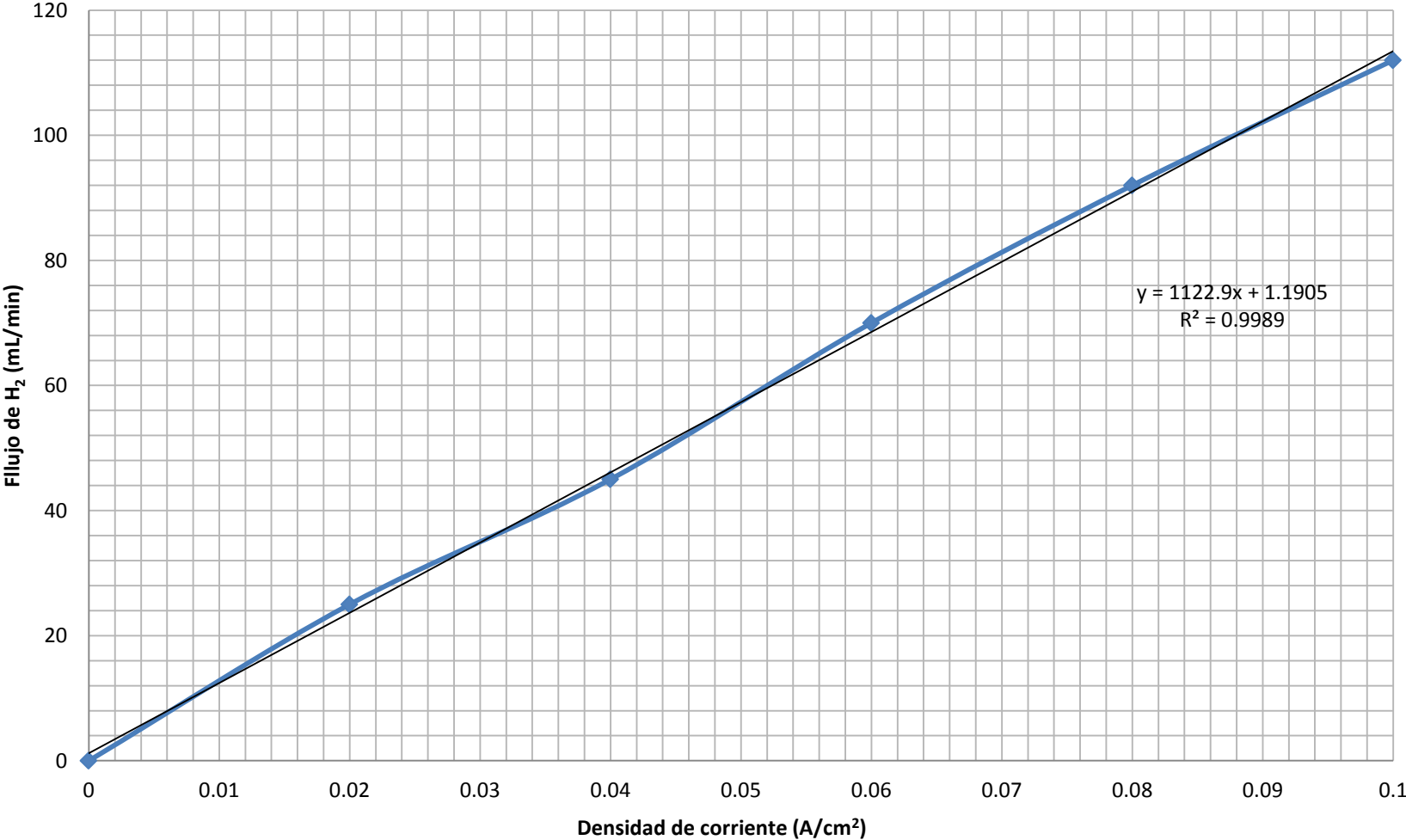
Tabla No. 21: Curvas de calibración de los diferentes parámetros de operación en función del amperaje del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie.

Medida No.	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Densidad de corriente (A/cm ²)	Flujo de H ₂ (mL/min)	Consumo Energético (KJ/m ³)	Eficiencia energética
1	0.5	8.2	4.1	0.02	25	10216.7	0.98
2	1	8.7	8.7	0.04	45	11551.1	0.87
3	1.5	9.8	14.7	0.06	70	12605.1	0.80
4	2	10.1	20.3	0.08	92	13221.5	0.76
5	2.5	11.6	28.9	0.1	112	15484.8	0.65

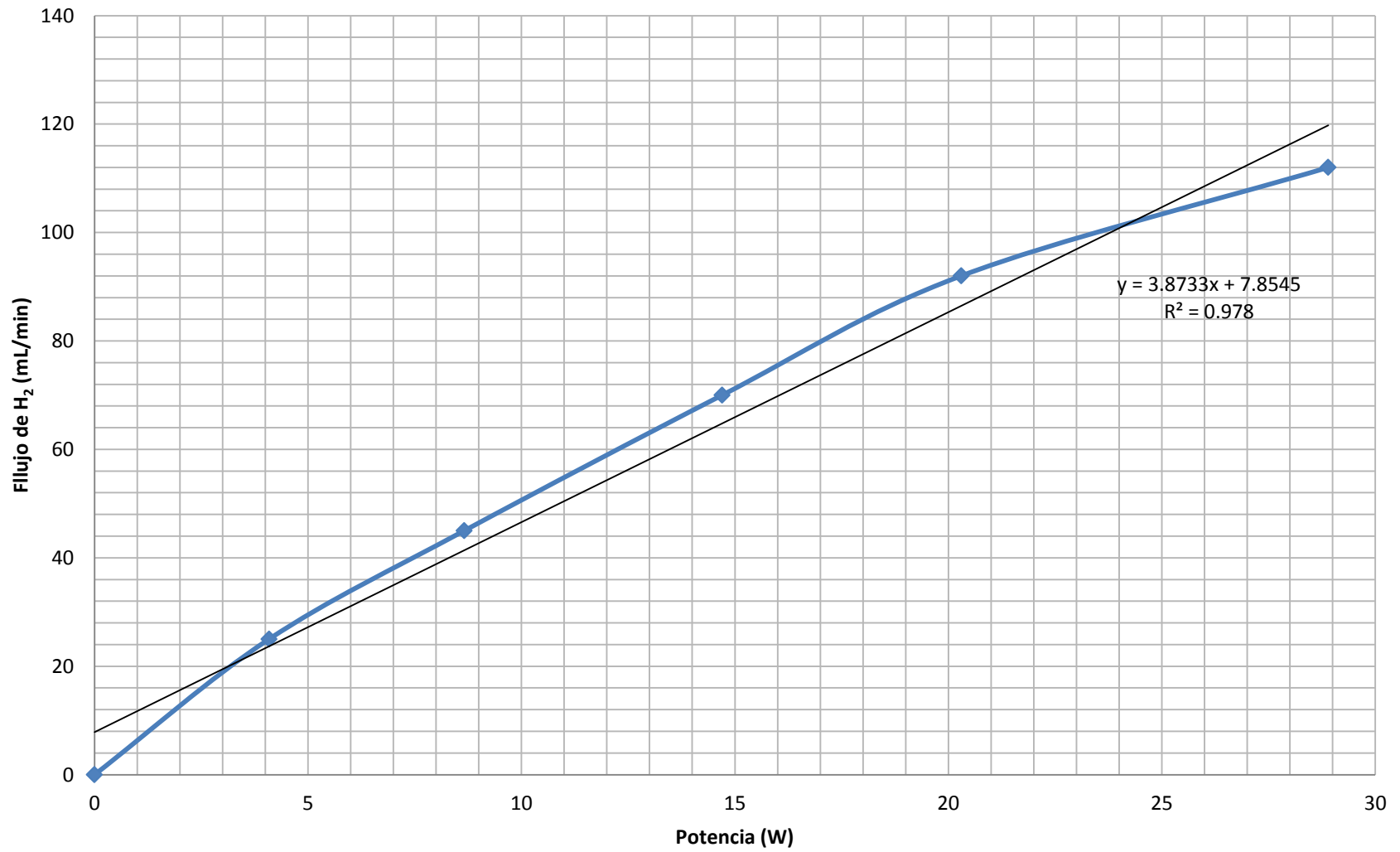
Gráfica No. 1: Curva característica de voltaje vs. densidad de corriente de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°



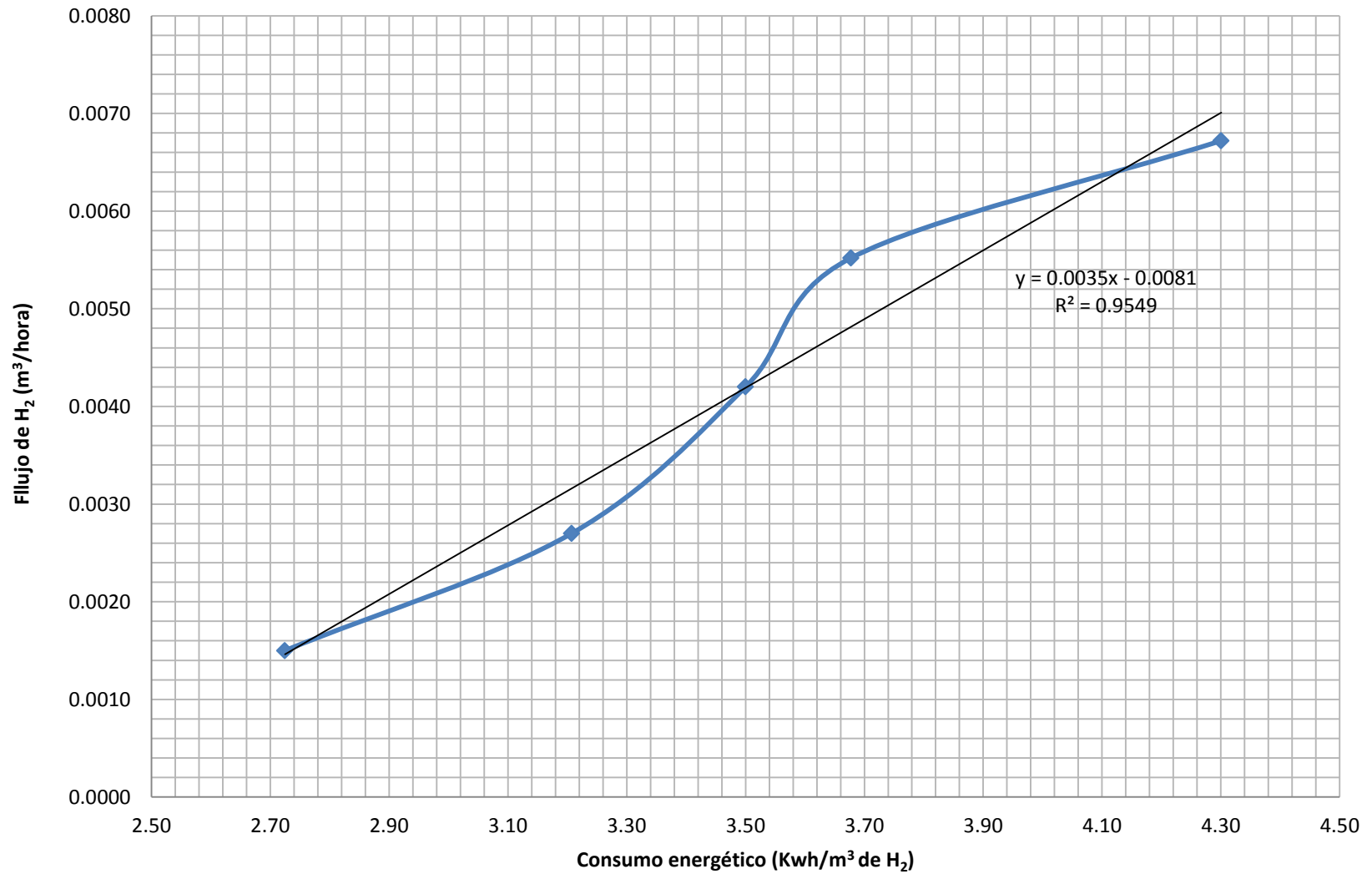
Gráfica No. 2: Curva característica de flujo de generación de H₂ vs. densidad de corriente de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°



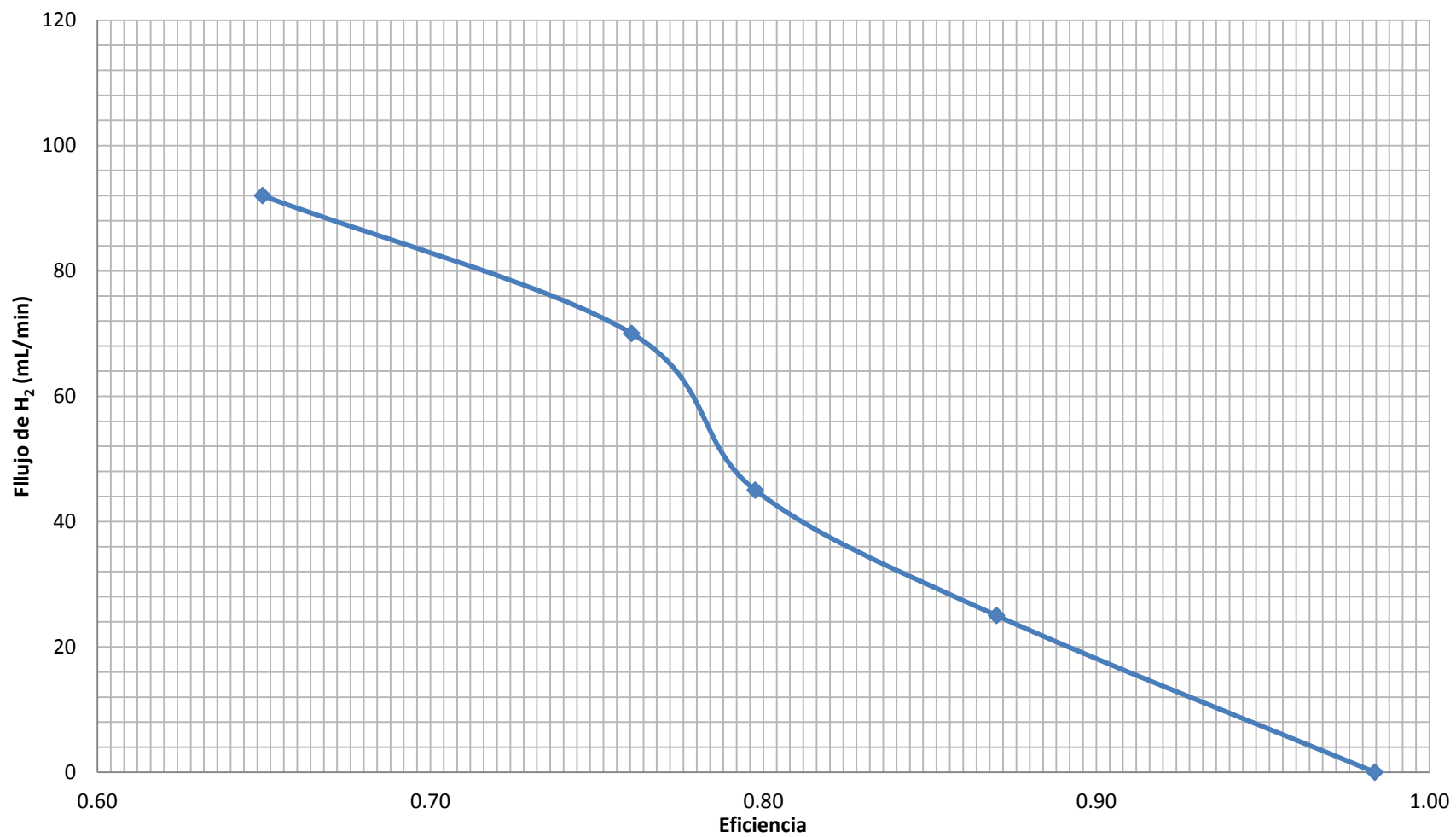
Gráfica No. 3: Curva característica de flujo de generación de H₂ vs. potencia de electrolizador PEM a 1atm y 26 C°



Gráfica No. 4: Curva característica de flujo de generación de H₂ vs. consumo energético de electrolizador PEM a 1 atm y 26°C



Gráfica No. 5: Curva característica de flujo de generación de H₂ vs. eficiencia energética del electrolizador PEM a 1 atm y 26°C

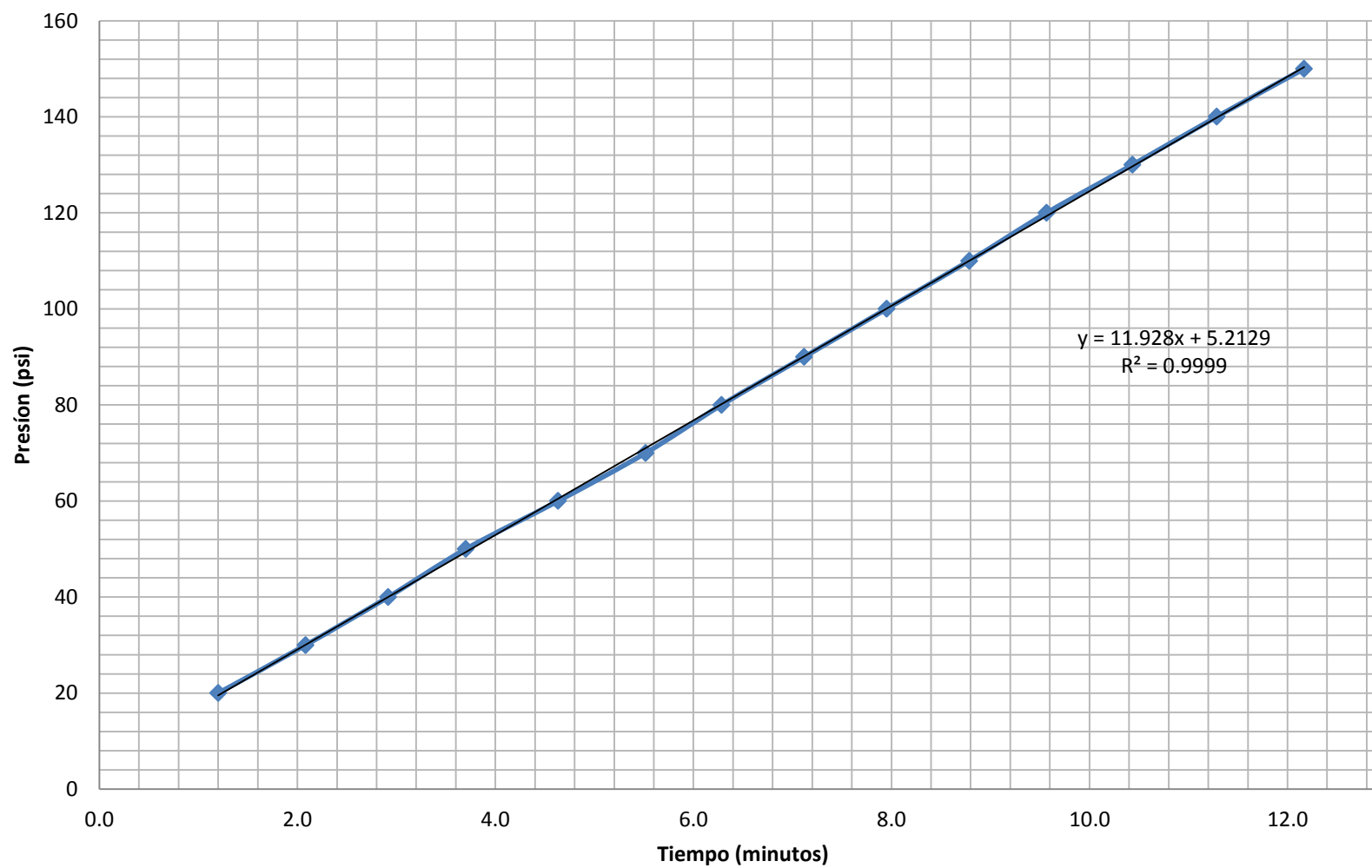


b. Curvas de desempeño a diferentes presiones de operación. Esta tabla corresponde al desempeño de los diferentes parámetros de operación del dispositivo a diferentes presiones, tanto los medidos de forma empírica, como los calculados utilizando diferentes modelos descritos en los cálculos de muestra. Los parámetros obtenidos empíricamente fueron: Amperaje, voltaje y tiempo, los parámetros calculados fueron: Flujo de hidrógeno, potencia, consumo energético y eficiencia energética. Todas las calibraciones se realizaron en función de la presión.

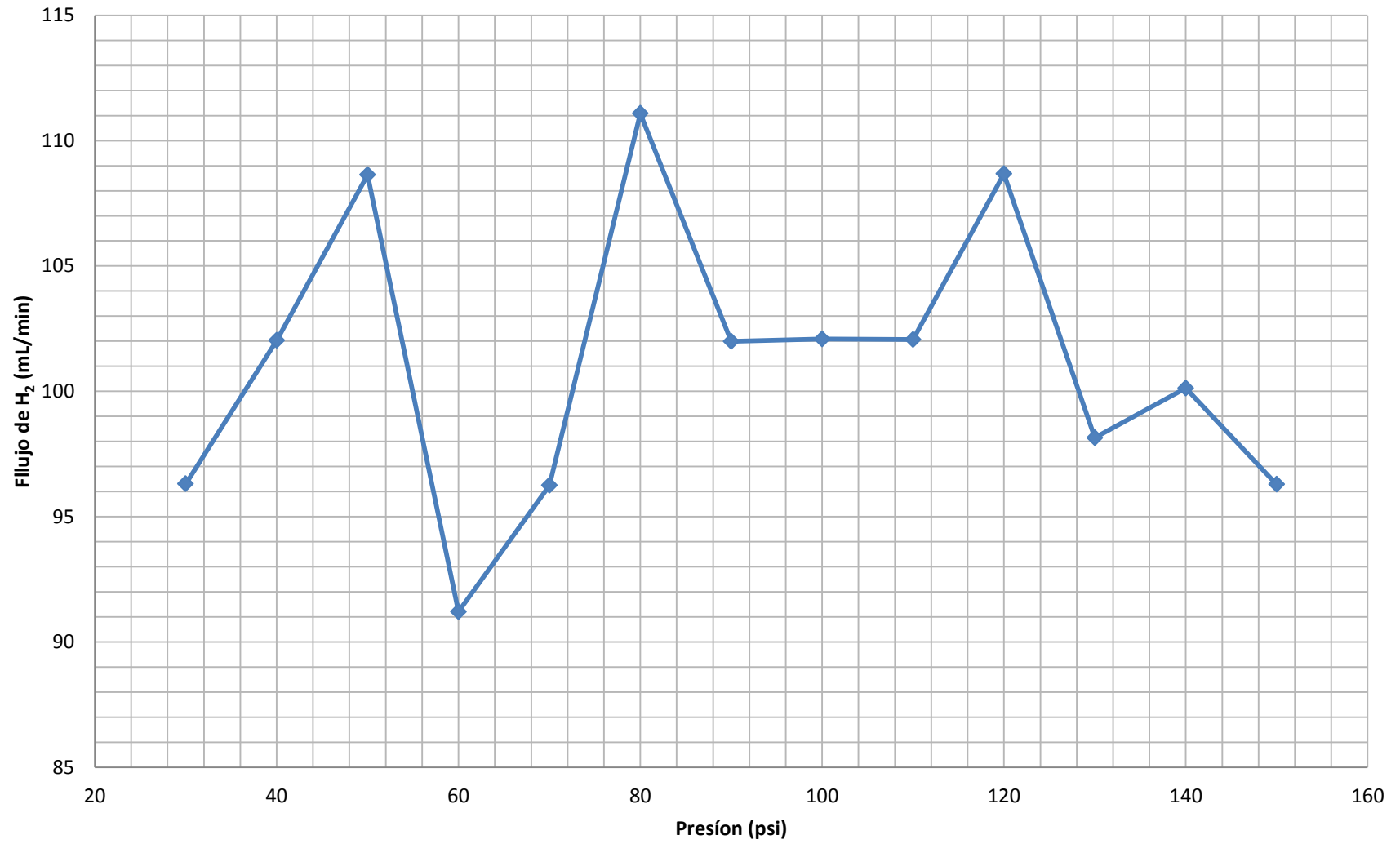
Tabla No. 22: Curvas de desempeño de los diferentes parámetros de operación en función de la presión del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie

Tiempo (min)	Presión del sistema (psi)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)	Flujo de H ₂ (mL/min)	Consumo Energético (kJ/m ³)	Eficiencia energética
1.2	20	2.50	11.41	28.53	71	24142.6	0.42
2.1	30	2.50	11.41	28.53	96	17770.5	0.57
2.9	40	2.50	11.40	28.50	102	16759.7	0.60
3.7	50	2.50	11.40	28.50	109	15741.1	0.64
4.6	60	2.55	11.40	29.07	91	19123.0	0.53
5.5	70	2.60	11.39	29.61	96	18461.1	0.54
6.3	80	2.60	11.39	29.61	111	15996.2	0.63
7.1	90	2.64	11.39	30.07	102	17689.1	0.57
8.0	100	2.65	11.38	30.16	102	17724.9	0.57
8.8	110	2.68	11.38	30.50	102	17928.4	0.56
9.6	120	2.70	11.38	30.73	109	16964.1	0.59
10.4	130	2.72	11.38	30.95	98	18922.9	0.53
11.3	140	2.75	11.37	31.27	100	18736.3	0.54
12.2	150	2.78	11.32	31.47	96	19609.7	0.51

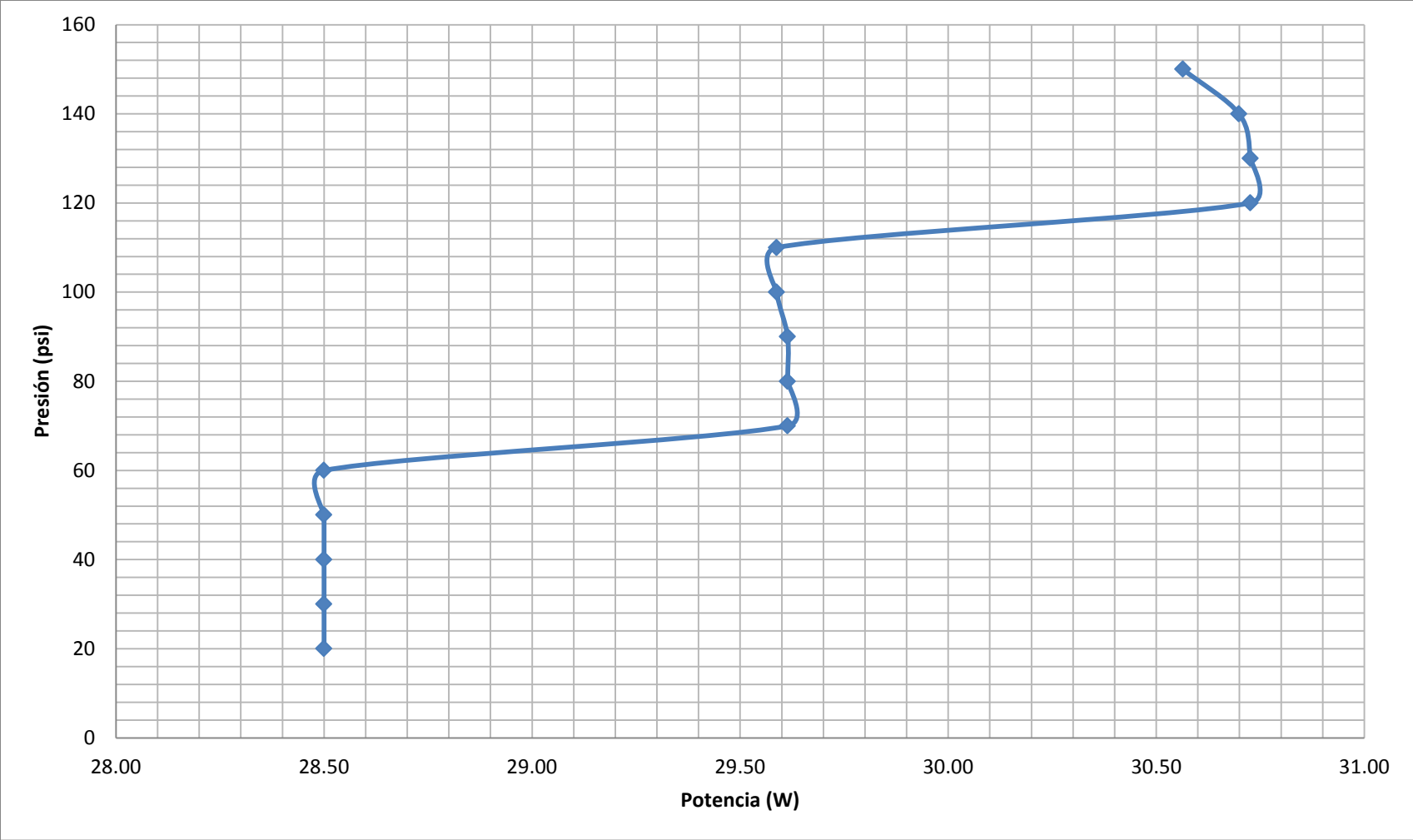
Gráfica No. 6: Velocidad de aumento de presión de electrolizador PEM con un volumen libre de 130mL operando a 11V y 2.6A



Gráfica No. 7: Comportamiento del flujo de generación de H₂ en función de la presión, operando a 11V y 2.6A



Gráfica No. 8: Efecto de la presión sobre la potencia del electrolizador PEM



2. Condiciones de operación

Tabla No. 23: Condiciones de operación de electrolizador PEM de cinco celdas electrolíticas correspondiente al modulo de generación.

Voltaje (V)	11.4
Amperaje (A)	2.6
Potencia (W)	30
Flujo de H₂ (mL/min)	101.1
Consumo energético (KJ/m³)	16765.58
Consumo de agua (mL/hora)	4.8
Eficiencia	0.62
Rango de presión (psi)	30-180
Temperatura (C°)	26

B. DESHUMIDIFICACIÓN DE H₂

Tabla No. 24: Contenido de humedad en el gas hidrógeno producido por electrólisis

Contenido de humedad en hidrógeno producido (%p/p)
27 ± 7

Tabla No. 25: Parámetros de diseño del deshumidificador previo al almacenamiento

Parámetro	Dato
Desecante	Silica gel
Densidad aparente del desecante (g/mL)	0.6 ± 0.1
Capacidad de tanque (g silica)	24
Cantidad de silica a utilizar (g)	19.2
Horas de operación antes de saturación	41 ± 5
Caída de presión (Pa)	$2,992 \pm 567$

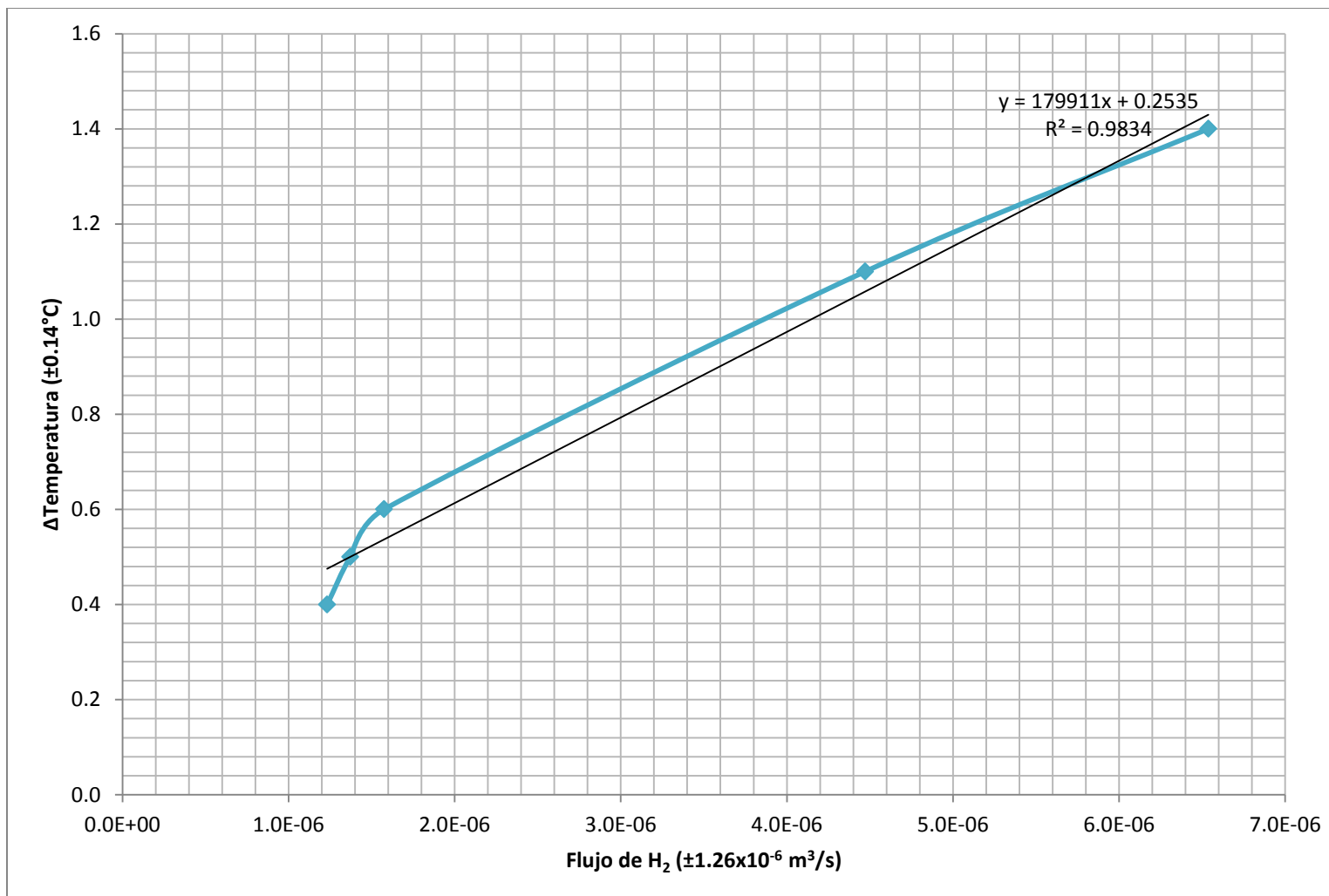
C. ALMACENAMIENTO DE H₂

Tabla No. 26: Parámetros de operación de los tanques de hidruros metálicos

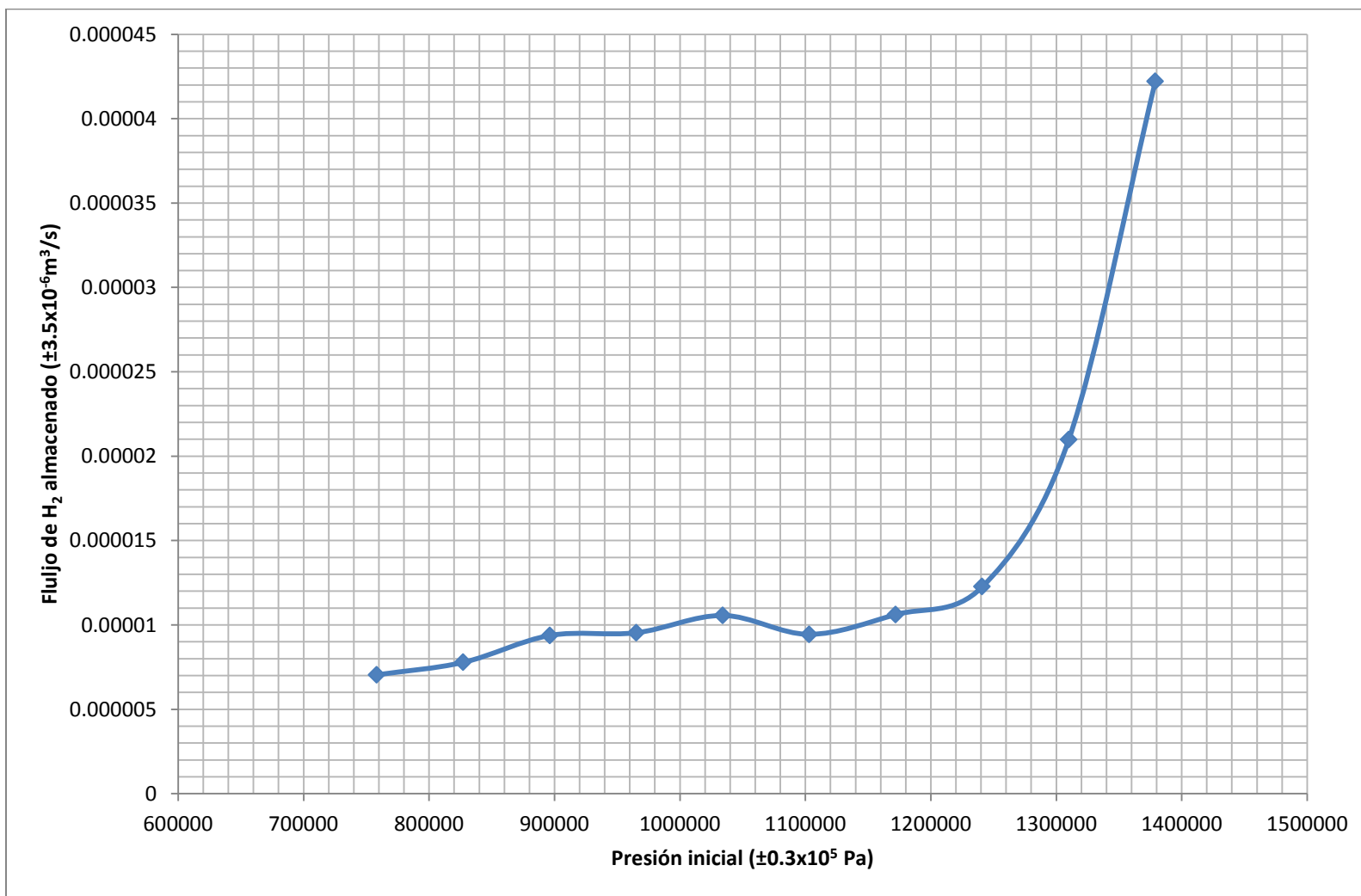
Parámetro	Dato
Hidruro	Aleación AB ₅ , intermetálico de baja temperatura; LaNi ₅
Temperatura de carga (°C)	26 ± 1, ambiente
Intervalo de presión para cargar los tanques (MPa)	0.69 a 1.31
Flujo de carga sin alcanzar la temperatura máxima, 45°C (L/min)	6.25 ± 0.42
Temperatura de descarga (°C)	26 ± 1, ambiente
Flujo de descarga máximo (L/min)*	2 – 3
Presión de descarga (MPa)	0.3

*Cuando los tanques se encuentran llenos

Gráfica No. 9: Dependencia del cambio de temperatura en la superficie de los tanques con respecto a la tasa de almacenamiento de hidrógeno

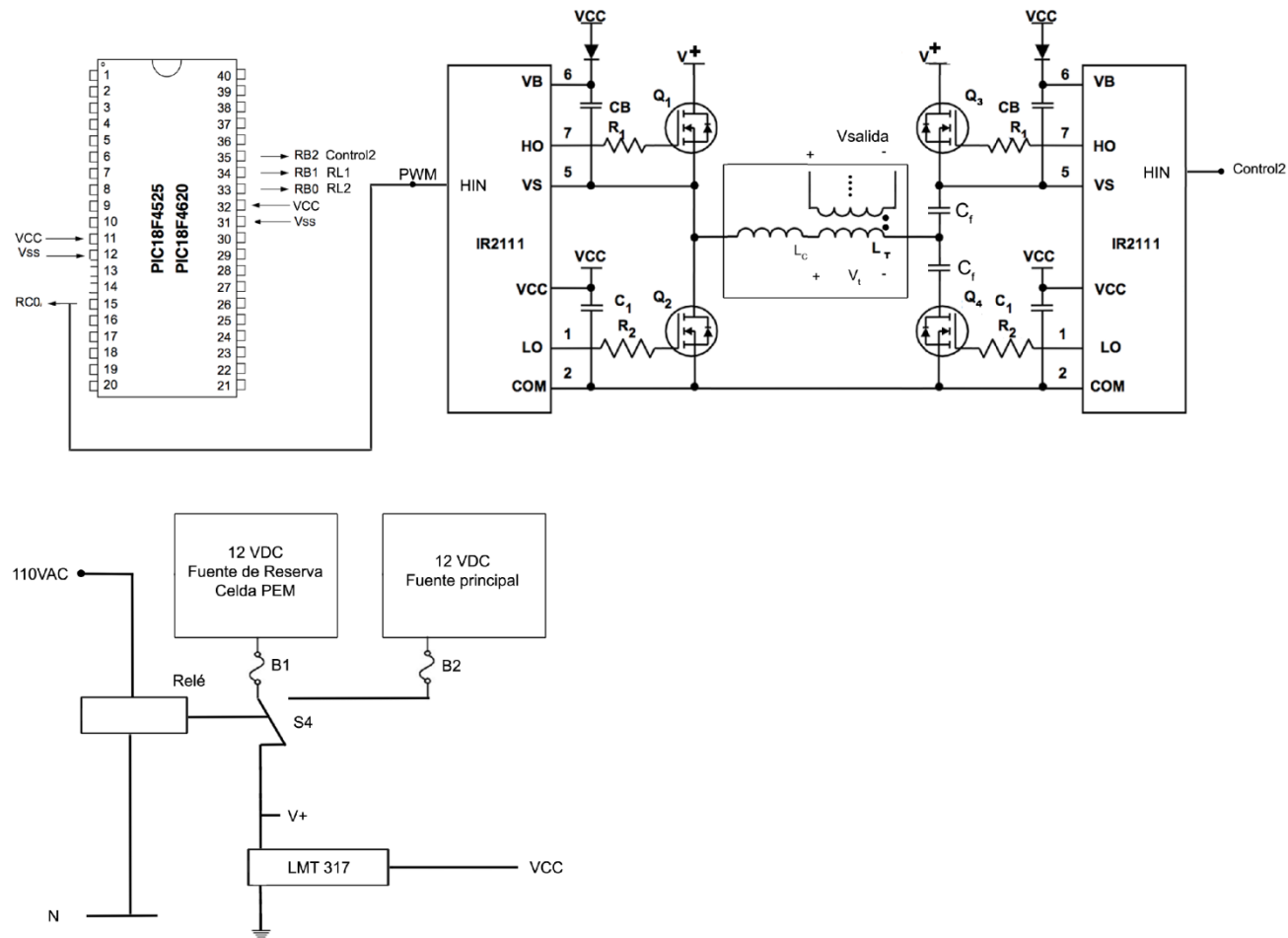


Gráfica No. 10: Variación de la tasa de almacenamiento de hidrógeno con respecto a la presión del gas alimentado



D. CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Figura No. 35: Esquemático del convertidor DC/ACV



IX. DISCUSIÓN

El objetivo principal del presente trabajo fue diseñar y construir un prototipo de una fuente ininterrumpida de energía (UPS, por sus siglas en inglés) a base de hidrógeno. Dicho prototipo está conformado por una estación de generación de hidrógeno por electrólisis, una etapa de separación y deshumidificación, una estación de almacenamiento con tanques de hidruros metálicos, una celda de combustión y un inversor de corriente.

Se diseñó y construyó un dispositivo generador de hidrógeno utilizando la electrólisis del agua como método de producción. La capacidad mínima de generación propuesta fue de 0.1 L/min a una presión de 5 MPa (725 psi) y una pureza de 99%.

El electrolizador PEM (*Proton Exchange Membrane*, PEM por sus siglas en inglés) tipo filtro prensa operó con agua desmineralizada con una resistividad promedio de 0.5 M Ω ·cm (2 μ S/cm ó 5 μ S/cm como valor máximo¹) debido a su fácil obtención en el comercio. Sin embargo, los fabricantes de los ensambles membrana-electrodos recomiendan una resistividad mínima de 1 M Ω ·cm, acortándose la vida útil de los ensambles membrana-electrodos (*Membrane Electrode Assembly*, MEA por sus siglas en inglés). Ya que la baja calidad del agua de alimentación tiene una gran influencia en el ensuciamiento y degradación de los mismos. Por lo que una propuesta de mejora al sistema es utilizar agua desionizada con una resistividad de por lo menos un M Ω ·cm e intercambiar el acero inoxidable 304 por un 316 ya que a pesar de no ser el material metálico idóneo, es más resistente a la corrosión por su mayor contenido de níquel y la presencia de molibdeno, así como su reducido costo en comparación con metales como titanio y platino, materiales idóneos para este sistema. Sin embargo, al utilizar acero inoxidable éste se debe reemplazar de manera periódica para evitar una lixiviación en exceso de cationes hierro solubles que puedan ser absorbidos por la membrana contaminándola. Incluyendo la formación de una capa de óxido en el acero, creando una resistencia adicional en el sistema.

La electrólisis del agua, en comparación con otros métodos de generación de hidrógeno, produce dicho gas con una alta pureza ya que no presenta reacciones colaterales a la generación de gas hidrógeno y oxígeno. Sin embargo, en las pruebas iniciales del electrolizador se detectó un cierto grado de mezcla entre ambos gases ya que los gases de salida en ambos separadores gas-líquido combustionaron al ser expuestos a una llama. Esta dificultad se afrontó al colocar sellante entre los ensambles membrana-electrodo forrados con Mylar y los empaques. La separación de gases alcanzada se comprobó a través de la prueba de combustión antes mencionada.

¹ Fuente: Salvavidas, S.A.

Se observó que al interrumpir el suministro de corriente directa al electrolizador, ocurre la reacción espontánea. Evidenciándose al encender un diodo emisor de luz (LED), por un tiempo limitado, al conectar sus terminales a los colectores de corriente del electrolizador. Al interrumpir la fuente de electrones hacia los cátodos del electrolizador, el equilibrio de la semi-reacción se desplaza hacia la producción de iones hidronio y electrones a partir de agua y gas hidrógeno remanente en dicha cara de la MEA. Los iones hidronio traspasan la membrana hasta alcanzar el otro extremo en donde ocurre su reducción debido al intercambio en la polaridad de las placas bipolares al apagar la fuente eléctrica. De esta manera, se genera agua y se produce la caída de voltaje suficiente para que al integrar una resistencia al sistema, fluya la corriente necesaria para encender un LED. El tiempo de encendido está relacionado directamente con la cantidad remanente de gas hidrógeno y oxígeno en los extremos opuestos de la MEA.

En la Gráfica No. 1 (ver pág.68), se observa que conforme se incrementa el voltaje consumido por el electrolizador constituido por 5 celdas, la densidad de corriente también incrementa. Comportamiento esperado ya que al mantenerse constante la resistencia del sistema, al depender únicamente del material y de las dimensiones de las placas bipolares y de los colectores de corriente, la corriente que consume el sistema debe ser mayor al mantener una relación directamente proporcional entre el voltaje y la corriente, manteniéndose constante el área activa de los ensambles. Sin embargo, la densidad de corriente a la que trabaja el electrolizador a cualquier voltaje (entre 1.5 a 2.3 V, siendo 2.5 V el voltaje máximo permisible en dichos ensambles) es mucho menor en comparación con las gráficas teóricas proveídas por el fabricante (ver Gráfica No. 11, pág.121) esto se debió a distintas causas: primero, un contacto pobre entre los ensambles membrana-electrodos y los difusores ya que los empaques cortados que enmarcan los difusores, son 0.052 cm (0.021 in) más gruesos que los difusores utilizados. Perjudicando no sólo el contacto eléctrico sino también la ruptura y difusión de las burbujas de gas. Dicha condición se mejoró al soldar cinco discos de acero inoxidable 304 tanto a los colectores de corriente como a las placas bipolares, localizados dentro del perímetro del área activa de los ensambles membrana-electrodos. Contrarrestando el espacio sobrante. Se mejoró el contacto entre el difusor y electrodo pero únicamente en el área que ocupan los distintos discos. No se alcanzó una distribución uniforme de la corriente en el electrolizador, condición deseada en el diseño inicial. Además, se debe considerar que la gráfica brindada por el fabricante establece el comportamiento de una MEA ya acondicionada y la Gráfica No. 1 (ver pág.68) fue trazada en las pruebas iniciales de funcionamiento del electrolizador. Por lo que a medida que se incrementó el tiempo de uso de los ensambles, la densidad de corriente se incrementó llegando a presentar un comportamiento similar al esperado e indicado por el fabricante. Para verificar un contacto adecuado entre los ensambles y los difusores, la impedancia en las celdas debe estar cerca de 0.07 ohm (por cm^2)². Si se encuentra por arriba de dicho valor, esto indica un contacto pobre entre dichos componentes.

² Fuente: MEA Preconditioning and Qualification Protocol, DuPont Fuel Cells. Humidification and Electrical Contact

En la Gráfica No. 2 (ver pág.69) se observó un comportamiento creciente directamente proporcional entre la densidad de corriente en el sistema y el flujo de hidrógeno producido. Además, se obtuvo una tendencia lo suficientemente lineal al presentar un coeficiente de determinación igual a 0.9989. Por lo que esto sugiere que el modelo de regresión obtenido se puede utilizar para estimar tasas de producción de hidrógeno. Sin embargo, es importante recalcar que al igual que la Gráfica No. 1, ésta fue trazada en las pruebas iniciales de funcionamiento del electrolizador, incrementándose la magnitud de la densidad de corriente a medida que aumentó el tiempo de uso de los ensambles.

Debido a que la formación de gas hidrógeno y oxígeno a partir de agua no es una reacción espontánea, es necesario suministrar trabajo eléctrico para que suceda. Por esto, es esperado que a medida que se incrementa la potencia provista, el flujo de producción de gases aumenta, comportamiento observado en la Gráfica No. 3 (ver pág.70) ya que dicha potencia está relacionada directamente con la cantidad de electrones disponibles para que se dé la reacción de reducción en el cátodo. Acelerando la producción de gas hidrógeno en el electrolizador PEM al combinarse los iones hidronio con dichos electrones. Siendo mayor el consumo energético a medida que se incrementa la potencia provista al sistema. Se observó que conforme aumenta la presión en el sistema, la potencia requerida para generar aproximadamente la misma cantidad de gases es mayor (Gráfica No. 8, ver pág.76), cambio afecto principalmente al incremento en la corriente demandada por el sistema. Esto sucede de acuerdo al principio de Le Chatelier ya que el incremento en la presión favorece la formación de agua, requiriendo una mayor cantidad de energía para desplazar el equilibrio hacia la reacción no espontánea. Siguiendo la misma línea de razonamiento, se puede incrementar la temperatura del agua de alimentación (por debajo de 80°C) para favorecer la formación de gas hidrógeno y oxígeno al brindar energía a las moléculas ocasionando un grado de agitación.

El electrolizador PEM tipo filtro prensa construido consume (30 ± 1) W con una eficiencia energética de 62%, refiriéndose a la conversión de energía eléctrica en energía química del hidrógeno. Este valor se encuentra por debajo de los valores reportados para electrolizadores PEM que es entre 73 a 84%. Sin embargo, dichos valores corresponden a sistemas que operan a temperaturas entre 80 y 150°C y a presiones de hasta 40 MPa (5,801 psi). Por lo que al ser la temperatura un parámetro más influyente en la potencia necesaria que la presión, es esperado que la eficiencia sea mayor en dichos sistemas ya que disminuye el voltaje entálpico y electrolítico debido a la agitación provocada como se mencionó anteriormente. Tomando en cuenta que el electrolizador construido trabaja a 26°C y a una presión máxima de 1.31 MPa. Además, se debe considerar que el material utilizado para las placas bipolares disminuye la eficiencia de corriente al ser de acero inoxidable, en comparación con los sistemas que utilizan titanio o acero inoxidable recubierto de metales preciosos. Incluyendo la disipación de calor hacia los alrededores debido a que los espejos incorporados también son de acero inoxidable, material con una conductividad apreciable.

La capacidad promedio de generación del electrolizador construido es de (0.101 ± 0.006) L/min, en un rango de operación entre 0.14 a 1.03 MPa (20 a 150 psi) a 26°C, alcanzando la capacidad mínima propuesta al inicio del proyecto. La presión máxima de operación del electrolizador es de 1.31 MPa (190 psi), por debajo de los 5 MPa tomados como valor objetivo debido a fugas detectadas en el sistema a presiones superiores de 1.4 MPa. Las fugas detectadas se debieron a distintos factores, entre ellos: tensión no uniforme en todo el electrolizador ya que las tuercas de cada uno de los ocho pernos fueron ajustadas con una llave de cangrejo. Así como la alineación inexacta de cada uno de los componentes favoreciendo el escape de las moléculas de gas, principalmente de hidrógeno debido a su menor tamaño molecular. Dicha condición se mejoró al acoplar y sellar cada una de las MEAs forradas con Mylar a los empaques. Otro factor que contribuyó a la falta de hermeticidad del sistema fue la deformación de los empaques al estar sometidos a presión ya que el material utilizado fue cloropreno (CR, comúnmente denominado como neopreno) con una dureza de 40 (shore A) en lugar de utilizar EPDM virgen con una dureza de 60 (shore A). La sustitución de dicho material se realizó ya que no se encontró en existencia en el mercado guatemalteco. Las empresas dedicadas a vender hule localmente cuentan con un número limitado de opciones. Además, de contar con muy poca o nula información del caucho que ofrecen. Dificultando la búsqueda del caucho más semejante al recomendado por el fabricante. La utilización de cloropreno en lugar de EPDM virgen, también ocasionó contaminación en los ensambles membrana-electrodos ya que éste contiene materiales de relleno que se fueron lavando conforme se operó el electrolizador. Esto se evidenció al desacoplar el sistema ya que el contorno no revestido de catalítico pulverizado adquirió un color amarillo. Por lo que se recomienda fuertemente utilizar EPDM virgen o TEFLONTM para evitar fugas y la degradación acelerada de la membrana, componente principal y de mayor costo en el electrolizador. Así como utilizar un torquímetro para asegurar que la tensión ejercida en el electrolizador sea uniforme.

La presión de 5 MPa propuesta al inicio del proyecto fue planteada por encima del rango sugerido de carga para los tanques de almacenamiento que es de 1.5 a 2.5 MPa. De manera que a través de la utilización de un regulador se mantuviera constante la presión de salida del módulo de generación. Sin embargo, al observar fugas por encima de 1.4 MPa se decidió evaluar la tasa de almacenamiento de los tanques de hidruro metálico a una presión menor sin riesgo de fugas. Se encontró que la tasa de absorción de los tanques es superior a la tasa de generación a temperatura ambiente por lo que un rango de operación entre 0.69 MPa y 1.31 MPa (100 a 190 psi) es adecuado para el prototipo construido. Considerando el ahorro energético que implica no utilizar un compresor para alcanzar dichas presiones. En la Gráfica No. 6 (ver pág.74), se observa que la elevación de la presión en el sistema es lo suficientemente rápida como para alcanzar los 1.31 MPa en 15 min. Esta rapidez es consecuencia del reducido volumen libre en el sistema, aproximadamente de 130 cm³. Al ser la tasa de almacenamiento de hidrógeno superior a la de generación, el tiempo de carga de los tanques de 600L se limita por el flujo de generación de gas en el electrolizador. A una tasa de generación de (0.101 ± 0.006) L/min, el tiempo de llenado de los mismos es de 3.78 días. Para

acelerar la tasa de producción se debe incrementar la densidad de corriente en el electrolizador mejorando el contacto eléctrico entre el difusor y los ensambles membrana-electrodos. O reducir el tiempo de carga de los tanques adicionando más celdas al electrolizador PEM.

En la Gráfica No. 7 (ver pág.75) se observa que el flujo de producción de hidrógeno no tiene correlación con la presión a la que se encuentra el sistema ya que éste oscila al incrementarse la presión. Dicha variación se refleja en la desviación estándar del flujo promedio calculado, siendo igual a 0.006 L/min. La dispersión no es significativa por lo que el flujo permanece lo suficientemente constante permitiendo hacer estimaciones con un nivel de confianza aceptable.

Se integró un sistema de almacenamiento de hidrógeno de una forma segura y eficiente en el prototipo. Dicho módulo consta de distintos elementos, entre ellos: un regulador que controla la presión de carga del tanque de almacenamiento, un desecador que utiliza silica gel como desecante, dos tanques de hidruros metálicos y un último regulador de presión que controla la presión de entrada hacia la celda de combustión.

Un factor importante a tomar en cuenta para el almacenamiento de hidrógeno en tanques de hidruro metálicos es la pureza de dicho gas. Al ser la electrólisis el método elegido de generación, la pureza del gas es alta como se mencionó anteriormente. Sin embargo, la humedad arrastrada luego de la generación reduce la efectividad de absorción del H₂ en los tanques ya que ocurre una oxidación de la aleación. Por esto, se planteó la incorporación de un deshumidificador previo a la etapa de almacenamiento.

El diseño del desecador se realizó a partir del contenido de humedad presente en el hidrógeno producido por la electrólisis en el módulo de generación, siendo esta igual a (27±7)% p/p. Debido a la gran capacidad de adsorción de humedad por parte de la silica gel (40% de su masa), su porosidad (alrededor de 0.6) y el bajo flujo manejado proveniente del separador gas-líquido, se puede trabajar hasta (41±5) horas en el sistema sin tener que cambiar el contenido del mismo. Además, dicho desecante puede ser regenerado utilizando el mismo gas seco de salida. Pudiendo ser reutilizado múltiples veces antes de ser desechado. Entre los parámetros considerados durante el diseño del deshumidificador fue la caída de presión que presenta dicho cartucho al circular el gas hidrógeno a través de él. Principalmente, por la velocidad lineal presentada por dicho gas, 2.38×10^{-3} m/s, dicha caída de presión es baja, siendo igual a (2,992±567) Pa. Condición muy favorable en un deshumidificador. Cabe llamar la atención que, el método por el cual se determinó la humedad del hidrógeno no es altamente confiable debido al número de veces que se realizó la prueba. Además, se utilizó un método gravimétrico poco preciso y exacto que se ve reflejado en la desviación estándar obtenida en el contenido de humedad (7%). Incluyendo que hay que considerar que la eficiencia en la adsorción no es de un 100% por lo que el contenido real de humedad en el gas generado es mayor al contenido determinado experimentalmente. Además, la capacidad de adsorción de la silica gel se reduce ya que presenta un contenido de humedad inicial, alrededor de 7%. En el cálculo del tiempo de

operación antes de requerirse la regeneración se tomó en cuenta dicho contenido inicial de humedad. Debido a que no se cuenta con la humedad final del gas generado debido a la falta de equipo adecuado para realizar la determinación, se cree que la vida útil de la aleación LaNi_5 se está reduciendo, disminuyendo los ciclos de absorción-desorción en el sistema. Que a una pureza mayor a 99.99% es de 5,000 ciclos mínimo. Entre las fuentes de error al determinar la humedad se encuentran: el tiempo que transcurrió en trasladar el desecante desde la balanza hasta el desecador, y posteriormente, su trasvase, siendo la humedad de los alrededores un fuerte factor influyente en el resultado obtenido. La humedad final del gas generado no se logró determinar.

La aleación seleccionada, LaNi_5 tipo AB₅, al ser de bajas temperaturas, la absorción y desorción se logró efectivamente a temperatura ambiente (26°C) en un rango de presión de 0.69 a 1.31 MPa. Siendo un mecanismo de almacenamiento seguro al no operar a tan altas presiones como los tanques de almacenamiento gaseoso, eficiente por su alta densidad volumétrica (64.61 kg H_2/m^3) y con un costo bajo de operación al no requerir de componentes adicionales para su funcionamiento como un sistema de enfriamiento y calentamiento adicional para facilitar la absorción y desorción, respectivamente. Sin embargo, el costo de inversión es lo suficientemente alto actualmente, debido a que la tecnología aún no es masiva.

Al observar la Gráfica No. 9 (ver pág.79), se evidencia que el cambio de temperatura registrado en la superficie de los tanques de almacenamiento es directamente proporcional a la tasa a la que el hidrógeno es almacenado. Se obtuvo un modelo de regresión lo suficientemente lineal, presentando un coeficiente de correlación de 0.9834. Por lo que a partir de dicho modelo se predijo que se puede almacenar hidrógeno a una tasa de hasta (6.25±0.42) L/min en los tanques sin necesidad de ser sometidos a un baño de agua fría o ser necesario instalar una carcasa que permita operar como un intercambiador de calor para evitar alcanzar la temperatura máxima de operación (45°C) sin dañar la aleación LaNi_5 dentro de los tanques. Al realizar dicha estimación, se tomó la temperatura final de 40°C ya que no es recomendable trabajar en el valor límite, arriesgando no sólo la integridad de la aleación sino que también la seguridad de operación ya que al incrementarse la temperatura en los tanques, la presión dentro de los mismos aumenta de manera considerable. Debido al alto flujo de almacenamiento permitido sin alcanzar la temperatura máxima de operación en comparación con la tasa de generación de hidrógeno de (0.101±0.006)L/min, se rectifica la operación a temperatura ambiente.

El flujo y la presión de descarga son directamente proporcionales a la transferencia de calor que se da entre los alrededores y la aleación a través de la superficie de los tanques. La superficie de los tanques es de acero inoxidable, presentando una conductividad aceptable facilitando el fenómeno de transferencia de calor. Dicha transferencia se da por convección, por lo que al estar llenos los tanques, se prevee un flujo de

descarga de 2 a 3 litros por minuto a una presión de 0.3MPa, a temperatura ambiente. Siendo 2.8 L/min el flujo requerido por la celda de combustión para entregar su potencia máxima de 200W.

Al observar la

Gráfica No. 10 (ver pág.80) se evidencia que la tasa de absorción o almacenamiento en los tanques de hidruro metálico se ve favorecida por las altas presiones. Sin embargo, la tasa de generación es lo suficientemente baja por lo que no es necesario trabajar a presiones de 2.0MPa para absorber el hidrógeno de manera fácil y rápida. Siendo innecesario un compresor, disminuyendo el costo eléctrico para la operación del sistema.

Con respecto a la frecuencia que se utiliza para conmutar los transistores, la frecuencia que se utiliza para conmutar los interruptores está en el rango de 10-20 kHz debido a que es un rango suficientemente alto comparado con la frecuencia de las líneas de alimentación convencionales a 60Hz lo cual hace que los armónicos se filtren en su mayoría. Además, es un valor suficientemente bajo, que permite a un generador de pulsos modificar el ciclo de trabajo de la señal al menos 10,000 veces por segundo. Lo cual será útil más adelante en este documento. Incluyendo que como punto de partida, en el proceso de iterativo del diseño, se utiliza la frecuencia de 15kHz.

El filtro tiene una frecuencia de corte de 124Hz, no existe amplificación para el rango de 0 a 100Hz y existe atenuación para el rango de 300Hz en adelante. No existe cambio de fase para el rango 0 a 700Hz. Para cumplir con el criterio que no debe eliminar las señales en el rango de los 1-100Hz., la capacitancia máxima que se puede utilizar es 7.27 μ F. Se decidió utilizar el capacitor comercial de 4.7 μ F, para una frecuencia de corte de 124Hz.

Para activar el transistor IGBT el circuito de control debe superar el umbral VGE. En el caso del Puente H, existen 2 transistores que tienen el voltaje del emisor conectado a tierra. Esto nos permite controlarlo fácilmente debido a que el VGE es igual a VG.

En el caso de los dos transistores que están del lado alto del puente H (Q1 y Q3), el voltaje VG debe estar 6.0V sobre el voltaje VE. Esto presenta un problema para activar el transistor, ya que VE es el voltaje del inductor, y este tiene una variación en el tiempo. Además, hay un momento en el cual VE llega muy cerca al voltaje de alimentación del sistema, el cual es el voltaje máximo disponible.

X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un dispositivo generador de hidrógeno por electrólisis capaz de operar a las condiciones suficientes para el almacenamiento de hidrógeno en el módulo de almacenamiento basado en tanques de absorción de hidruros metálicos recargables.
2. El dispositivo diseñado y construido es un electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM) tipo filtro prensa, con cinco celdas electrolíticas arregladas en serie.
3. El electrolizador PEM opera a las siguientes condiciones: 11.4 voltios, 2.6 Amperios, y 30 Watts de potencia, consumiendo $16765.58 \text{ KJ/m}^3\text{H}_2$.
4. El flujo promedio de producción de hidrógeno del electrolizador a las condiciones de operación es de 101.1 mL/min.
5. El electrolizador PEM puede operar en un rango de presión de 0.69 a 1.31 MPa (20 a 190 psi), rango suficiente para alcanzar la absorción de hidrógeno en el módulo de almacenamiento.
6. La eficiencia energética promedio del dispositivo es alrededor del 62%.
7. Se determinó que la eficiencia del electrolizador es inversamente proporcional al flujo de hidrógeno, debido a la lenta difusión de los gases en las superficies de los electrodos.
8. El contenido de humedad en el gas hidrógeno producido por electrólisis es de $(27 \pm 7)\%$ p/p.
9. El desecador diseñado al operar con sílica gel como desecante con una densidad aparente de $(0.6 \pm 0.1)\text{g/mL}$ puede reducir el contenido de humedad en el gas hidrógeno producido hasta por (41 ± 5) horas antes de ser requerida la regeneración.
10. La caída de presión en el desecador diseñado con sílica gel como desecante es de $(2,992 \pm 567)$ Pa.
11. La aleación tipo AB_5 , de baja temperatura, LaNi_5 es la adecuada para almacenar el hidrógeno producido mediante electrólisis de manera eficiente y segura en el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno.
12. La temperatura e intervalo de presión de carga de los tanques de almacenamiento son de $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ y de 0.69 a 1.31MPa, respectivamente.
13. El flujo máximo de hidrógeno para cargar los tanques de almacenamiento sin requerir un sistema de enfriamiento es de $(6.25 \pm 0.42)\text{L/min}$.
14. La temperatura y presión de descarga de hidrógeno en los tanques de almacenamiento es de $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ y 0.3MPa, respectivamente.
15. El flujo de descarga máximo de hidrógeno en los tanques de almacenamiento es de 2 a 3 L/min, siendo 2.8L/min el flujo requerido por la celda de combustión para generar 200W.

16. Una señal PMW de alta frecuencia y un filtro adecuado puede generar ondas sinusoidales de frecuencias específicas.
17. Para controlar un transistor IGBT con el voltaje en el emisor variable es necesario utilizar una fuente de poder extra o un capacitor flotante.
18. La variación de voltaje, transientes y armónicos del proceso de filtrar la señal PWM del convertidor DC/AC es menor al 5% de su voltaje nominal.
19. La potencia máxima entregada por el inversor DC/AC sinusoidal es de 170W, y es capaz de alimentar dispositivos que utilicen 120 VAC a 60 Hz.
20. La potencia máxima entregada por la fuente de señal cuadrada de frecuencia variable es de 180W.

B. RECOMENDACIONES

1. Utilizar otro material para los colectores de corriente y placas bipolares, con el fin de reducir la caída óhmica producida por el acero inoxidable 304 y así aumentar la eficiencia del dispositivo. Así como emplear aleaciones de metales nobles (preciosos) como oro, titanio, platino e incluso níquel. Se puede usar grafito siempre y cuando la porosidad de este no sea inconveniente.
2. Mejorar el contacto ente los difusores y la superficie de los electrodos revestidos a la membrana de intercambio de protones (PEM). De esta forma se puede garantizar el contacto uniforme entre los componentes y la completa polarización de los electrodos, y así aumentar la eficiencia del dispositivo. Se recomienda utilizar un empaque de precisión que permita la compactación justa de los componentes.
3. Utilizar empaque EPDM con el fin de proteger la integridad química de las membranas de intercambio de protones (PEM).
4. Experimentar con otros diseños de empaque que permitan realizar un ensamblado sencillo sin comprometer el mezclado de los gases de proceso.
5. Realizar la calibración del dispositivo cada vez que sufra algún cambio o modificación, con el único fin de conocer el desempeño de dispositivo, verificando cada una de sus curvas características.
6. Realizar una mayor cantidad de determinaciones del contenido de humedad en el gas hidrógeno producido mediante electrólisis.
7. Determinar el contenido de humedad del hidrógeno por un método volumétrico y uno cromatográfico, confiriéndole mayor validez al resultado obtenido.
8. Determinar el contenido de humedad final en el H₂ luego de fluir a través del deshumidificador para conocer el grado de oxidación de la aleación, así como la reducción en la cantidad de ciclos absorción-desorción en los tanques.

9. Incorporar dos termopares, cada uno en la superficie de los tanques de almacenamiento para monitorear la temperatura de los mismos tanto en el proceso de carga como de descarga y tener un panorama de la transferencia de calor que toma lugar.
10. El concepto de un convertidor DC/AC tiene muchas aplicaciones, se recomienda al diseñador de dispositivos de manejo de flujo de energía explorar el concepto de retroalimentación para obtener un flujo de energía dinámico.
11. El sistema de seguridad puede ser implementado mediante el mismo controlador, el cual puede monitorear la corriente y el voltaje. Actualmente las protecciones son fusibles simples. Se recomienda implementar sistemas de seguridad que abarquen otras variables y sean reversibles.
12. Si el convertidor DC/AC se utiliza para generación de energía, entonces debe implementarse un sistema que sincronice la frecuencia del convertidor con la de las líneas eléctricas. Actualmente el microcontrolador no dispone de un punto de inicio particular.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- A. Álvarez, G. 2009. *Cómo protegernos de los peligros de internet*. CSIC. ISBN 8400088778, 9788400088774. p.74. 120pp.
- B. Barbir, Frano. 2002. *PEM Fuel Cells Theory and Practice*. Editorial ELSEVIER. 433 páginas.
- C. Balat, M. 2009. *Possible Methods for Hydrogen Production*. Taylor & Francis Corp. Energy Sources, Part A. 31: 39 – 50. ISBN 1556 – 7036 print/ 1556 – 7230 online.
- D. Balogh, Lazlo. 2001. *Design and Application Guide for High Speed MOSFET Gate Drive Circuits*. Texas Instruments. USA. [PDF consultado 5 octubre 2011]. <http://www.ti.com/lit/ml/slup169/slup169.pdf>
- E. CHEN, P. 2007. *Effective Hydrogen Storage*. Innovation Magazine. Vol. 7. No.3. p.24 y 25.
- F. College of the Desert (COD). 2001. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technology*. Rev 0. MODULE 1: HYDROGEN PROPERTIES.
- G. Dermibas. 2007. *Storage and Transportation Opportunities of Hydrogen*. Sila Science, Universite Mahallesi. Turkey. Taylor & Francis. 10pp.
- H. Fouillé, A. 1979. *Compendio de electrotecnia*. Marcombo. ISBN 8426703607, 9788426703606. p.75. 320pp.
- I. Gallego, Nidia; Burchell, Timothy; Clark, Ashli. 2003. *Carbon Materials for Hydrogen Storage*. Oak Ridge National Laboratory. Carbon Materials Technology Group, Metals and Ceramics Division. USA. 6pp.
- J. García Pérez, J.A. 1996. *Química: teoría y problemas*. Editorial Tebar. ISBN 8473601556, 9788473601559. p.18. 424pp.
- K. Hackworth, Martin. *RL Circuits*. Course Physics for Engineering. University of Idaho. USA. [PDF consultado 12 septiembre 2011]. http://www.physics.isu.edu/~hackmart/RLcircuits_engphys.pdf
- L. Hortal, Mario. , Miranda, Ángel. 2005. *Hidrógeno, el fundamento de un futuro equilibrado*. Ediciones Díaz de Santos. ISBN 8479786817. 2005. 136 páginas.

- M. Hyperphysics. 2000. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/electrol.html>. Georgia State Univeristy. (Hyperphysics. 2000)
- N. International Rectifier. 2005. *Insulated Gate Bipolar Transistor with Ultrafast Soft Recovery Diode IRG4PH50UDPbF*. [datasheet][Consultado 10 de junio 2011]. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph50udpbf.pdf>
- O. International Rectifier. 2009. *IC Driver Application Note*. HV Floating MOG-Gate Driver ICs AN-978. USA. www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf
- P. Kassakian, John. *et al.* 1992. *Principles of power electronics*. Massachusetts Institute of Technology. United States. Addison-Wesley.
- Q. Laoun, B. *et al.* 2007. *Thermodynamics aspect of high pressure hydrogen production by water electrolysis*. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 No.3. p.435 – 444.
- R. Levine, I. 2004. *Fisicoquímica*. Volumen no.2. 5ª edición. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. España. p.633-635. 1194pp.
- S. Mantell, C.L. 1980. *Ingeniería electroquímica: información exhaustiva de la teoría y práctica de los procesos electroquímicos industriales de sus aplicaciones y productos*. Reverté. ISBN 8429179402, 9788429179408. p.21 y 22. 660pp.
- T. MapleSoft Incorporated. 2008. *Maple12 Calculator*. USA. [programa de cálculo por computadora]. Versión 12. www.maplesoft.com
- U. McCabe, W. ;Smith, J.C.; Harriott, P. 2007. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7ª edición. México. McGraw-Hill.1189pp.
- V. OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development. 2005. *Energy Technology Analysis Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*. OECD Publishing. ISBN 9264109579, 9789264109575. p.44, 45, 72 - 77. 253pp.
- W. O’Leary, D. 2000. *Hydrogen*. Encontrado en: <http://www.ucc.ie/academic/chem/dolchem/html/elem001.html>, noviembre de 2011.
- X. Platts, John., Aubyn, John. 1992. *Uninterruptible power supplies*. Institution of Electrical Engineers, IET. 150 pp.
- Y. Ruiz, Virginie F. *Initial and Final Value Theorem Some Other Signal Transformation*. Dept. of Cybernetics, Lecture Notes 2CYI6. University of Reading. London UK. [PDF consultado 15 de

septiembre,2011]

http://www.personal.rdg.ac.uk/~shs97vfr/2CYI6%20notes/Slides_LT_59_to_72.pdf

- Z. Sattar, Abdus. 2001. *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics*. IXYS Corporation. Germany. [PDF consultado 1 octubre 2011]. http://www.ixys-power.com/images/technical_support/Application%20Notes%20By%20Topic/IGBTs/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf
- AA. Sedra, Adel S., Smith Kenneth C. 2004. *Microelectronic circuits*. University of Waterloo, University of Toronto. Oxford University Press. United States.
- BB. Sequeira, C., Santos, D. 2010. *Producción de hidrógeno*. Ciencia y tecnología de materiales. ISBN 0870 – 8312 versión impresa. Scielo, Portugal. Encontrado en: http://www.scielo.oces.mctes.pt/scielo.php?pid=S087083122010000200013&script=sci_arttext, noviembre de 2011.
- CC. Skoog, D. *et al.* 2005. *Fundamentos de Química analítica*. 8ª edición. México. Thomson. 1065pp.
- DD. Soriano, M. *et al.* 2001. *Prácticas de edafología y climatología*. Editor: Ed. Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 8477219915, 9788477219910. p.33. 140pp.
- EE. Stolten, D. 2010. *Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications*. Wiley-VCH. Edición ilustrada. p.284. 908pp. ISBN 3527327118, 9783527327119. Encontrado en: http://books.google.com.gt/books?id=G5vyQqEGQoC&pg=PA284&dq=MEA+electrolysis+water+quality&hl=es&sa=X&ei=RGL9ToOjGZSDtgeR0rSGDw&redir_esc=y#v=onepage&q=MEA%20electrolysis%20water%20quality&f=false.
- FF. Strobel, R.; Garche, J.; Moseley, P.T.; *et al.* 2006. *Hydrogen Storage by Carbon Materials*. Alemania. Journal of Power Sources. Elsevier. p.781 – 801.
- GG. Treybal, R. 1988. *Operaciones de transferencia de masa*. 2ª edición. México. McGraw-Hill. 857pp.
- HH. Veira, A. F. 2005. *Adsorbedores de gases (I), Tipos y aproximaciones teóricas*. Ingeniería química. www.alcion.es. Enero 2005. p.244 a 252.
- II. Vinnicombe, Glenn. *Part IB Paper 6: Information Engineering LINEAR SYSTEMS AND CONTROL*. University of Cambridge. Department of Engineering. [PDF consultado 10 septiembre 2011]. <http://www.control.eng.cam.ac.uk/gv/p6/Handout2.pdf>

- JJ.** Waterman, N.A.; Ashby, M.F. 1997. *The materials selector*. 2a edición. Champan & Hall. Volume 3. p.510. 767pp.
- KK.** Wilson, R. J.; Burgh Griffin. 2008. *Energizing our future: rational choices for the 21st century*. Wiley-Interscience. 390pp.
- LL.** Zutell, A. 2003. *Materials for hydrogen storage*. Physics department, University of Fribourg, Pérolles.Switzerland.10pp.

XII. APÉNDICE

E. Datos originales

Tabla No. 27: Datos de curvas características del ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane

Medida no.	Voltaje (±0.5V)	Corriente (±0.05A)	Flujo de H ₂ (±0.05A mL/min)
1	1.5	0.52	4.5
2			4.5
3			4.5
1	2.0	1.00	11.5
2			11.5
3			11.0
1	2.5	1.8	20.5
2			19.5
3			20.0
1	3.0	2.8	29.0
2			28.0
3			30.0

Tabla No. 28: Datos de curvas características del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica.

Medida no.	Voltaje (±0.5V)	Corriente (±0.05A)	Flujo de H ₂ (mL/min)
1	8.2	0.5	24.0 ± 1.2
2	8.2		24.0 ± 1.2
3	8.2		24.0 ± 1.2
1	8.6	1.0	45.0 ± 2.3
2	8.7		45.0 ± 2.3
3	8.7		45.0 ± 2.3
1	9.8	1.5	69.0 ± 3.5
2	9.8		72.0 ± 3.6
3	9.8		69.0 ± 3.5
1	10.0	2.0	93.0 ± 4.7
2	10.2		93.0 ± 4.7
3	10.2		90.0 ± 4.5
1	11.6	2.5	117 ± 6
2	11.6		108 ± 5
3	11.5		111 ± 6

Tabla No. 29: Datos de curvas de desempeño del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a diferentes presiones con un volumen libre de 128ml.

Medida no.	Presión en sistema (± 5 psi)	Tiempo			Voltaje (± 0.5 V)	Corriente (± 0.05 A)
		min	S	ms		
1	20	1	12	13	11.4	2.50
2	30	2	5	19	11.4	2.50
3	40	2	55	54	11.40	2.50
4	50	3	42	48	11.40	2.50
5	60	4	38	19	11.40	2.50
6	70	5	31	60	11.39	2.60
7	80	6	17	19	11.39	2.60
8	90	7	7	72	11.39	2.60
9	100	7	57	81	11.38	2.60
10	110	8	47	98	11.38	2.60
11	120	9	34	74	11.38	2.70
12	130	10	26	89	11.38	2.70
13	140	11	17	74	11.37	2.70
14	150	12	10	93	11.32	2.70

Tabla No. 30: Determinación del contenido de humedad en el hidrógeno generado por electrólisis

Prueba no.	Tiempo de prueba	Voltaje (V)	Corriente (A)	Masa inicial silica gel y recipiente (± 0.0001 g)	Masa final silica gel y recipiente (± 0.0001 g)
1	1h 2min 4s (6 ± 1) ms	7.7 \pm 0.3	2.7 \pm 0.1	26.7160	26.8392
2	1h 6min 42s (43 ± 1) ms	7.5 \pm 0.2	2.69 \pm 0.02	26.8789	26.9789

Tabla No. 31: Volumen de hidrógeno que circuló por el lecho de silica gel en 10 segundos

Medida no.	Prueba no.1	Prueba no.2
	Volumen de H ₂ producido (± 0.05 mL)	Volumen de H ₂ producido (± 0.05 mL)
1	13.00	15.00
2	12.00	15.00
3	14.00	11.00
4	13.00	13.00
5	12.00	13.00
6	10.00	----

Tabla No. 32: Determinación de la densidad aparente de la silica gel utilizada como adsorbente

Medida no.	Masa de silica gel (± 1 g)	Volumen que ocupa la silica gel y los espacios vacíos (± 0.05 mL)
1	6	12.00
2	19	28.00

Tabla No. 33: Influencia de la tasa de almacenamiento en el incremento de la temperatura superficial de los tanques como consecuencia de la absorción de H₂ en la aleación LaNi₅

Medida no.	Temperatura superficial inicial de los tanques (±0.1°C)	Temperatura superficial final de los tanques (±0.1°C)	Presión inicial de generación de gases (±5 psi)	Presión final de generación de gases (±5 psi)	Tiempo de generación (±1ms)
1	18.9	20.3	165	108	13 s 14 ms
2	18.6	19.1	170	113	1min 2s 28ms
3	18.3	19.4	170	113	19s 28ms
4	17.1	17.5	170	113	1min 9s 31ms
5	16.9	17.5	185	128	54s 31ms

Tabla No. 34: Influencia de la presión de generación en la tasa de absorción de H₂ en los tanques de almacenamiento

Medida no.	Presión inicial (±5 psi)	Presión final (±5 psi)	Tiempo transcurrido para pasar de la presión inicial a la final (±1ms)
1	200	190	2s 16ms
2	190	180	6s 70ms
3	180	170	13s 5ms
4	170	160	21s 19ms
5	160	150	30s 28ms
6	150	140	38s 83ms
7	140	130	47s 2ms
8	130	120	56s 74ms
9	120	110	1min 7s 1ms
10	110	100	1min 19s 78ms

F. Cálculo de muestra

1. Cálculo de la densidad de corriente

Ecuación No. 30

$$\varphi = \frac{I}{S}$$

Donde I denota la corriente eléctrica en amperios que pasa por el electrolizador y S el área transversal activa de los electrodos ensamblados a la membrana (MEA) en centímetros cuadrados.

Para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

$$\varphi = \frac{0.52 A}{25 cm^2} = 0.02 A/cm^2$$

La densidad de corriente para el resto de corrientes de operación y para la calibración del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica se calculó de la misma forma previamente descrita.

2. Cálculo de la potencia eléctrica

Ecuación No. 31

$$P = I * V$$

Donde I denota la corriente eléctrica en amperios que pasa por el electrolizador y V el voltaje que se le suministra a sistema.

Para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

$$P = 0.52 A * 1.5 V = 0.78 W$$

La Potencia eléctrica para el resto de voltajes de operación y para la calibración del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica se calculó de la misma forma previamente descrita.

3. Cálculo del flujo volumétrico de hidrógeno producido en el electrolizador

Ecuación No. 32

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{v}{t}$$

Donde v denota el volumen de hidrógeno almacenado en una probeta invertida graduada y t el tiempo en minutos que toma almacenar dicho volumen de hidrógeno.

Para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{4.5 mL}{1 min} = 4.5 mL/min$$

La Flujo Volumétrico de hidrógeno para el resto de voltajes de operación y para la calibración del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica y a diferentes presiones se calculó de la misma forma previamente descrita.

4. Cálculo del consumo energético

Ecuación No. 33

$$Q = \frac{P}{\dot{V}_{H_2}}$$

Donde P denota la potencia que consume el sistema a las diferentes condiciones de operación y \dot{V}_{H_2} el Flujo volumétrico de hidrógeno que genera el sistema.

Para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

$$Q = \left(\frac{0.78 \text{ J/s}}{4.5 \text{ mL/min}} \right) * \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) * \left(\frac{1 \text{ KJ}}{1000 \text{ J}} \right) * \left(\frac{1,000,000 \text{ mL}}{1 \text{ m}^3} \right) = 10,400 \text{ KJ/m}^3 \text{H}_2$$

El consumo energético del sistema para el resto de voltajes de operación y para la calibración del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica y a diferentes presiones se calculó de la misma forma previamente descrita.

5. Cálculo de la eficiencia energética

Ecuación No. 34

$$\varepsilon = \frac{Q_p}{Q}$$

Donde Q_p denota la densidad energética del hidrógeno en estado gaseoso igual a 10,050 KJ/m³ y Q el consumo energético del sistema.

Para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

$$\varepsilon = \frac{10,050 \text{ KJ/m}^3}{10,400 \text{ KJ/m}^3} = 0.97$$

La eficiencia energética del sistema para el resto de voltajes de operación y para la calibración del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica y a diferentes presiones se calculó de la misma forma previamente descrita.

6. Cálculo de la presión ejercida por los gases en pascales

Ecuación No. 35

$$P_{Pascales} = P_{psi} * \frac{101300}{14.7}$$

Donde P_{psi} denota la presión del sistema en dimensionales de libra por pulgada cuadrada.

Para el electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a diferentes presiones:

$$P_{Pascales} = 20psi * \frac{101300}{14.7} = 137,823 Pascales$$

La presión del sistema en pascales para el resto de presiones de operación se calculó de la misma forma previamente descrita.

7. Cálculo de la cantidad de moles de H₂ producidos

Ecuación No. 36

$$n = \frac{P * V}{R * T}$$

Donde P denota la presión de operación del sistema en Pascales, V volumen libre de gas en el separador de hidrógeno en metros cúbicos, R es la constante de los gases ideales y T es la temperatura del sistema en grados Kelvin.

$$n = \frac{137,823 Pascales * 0.000085m^3}{8.314 * 299.15K} = 0.005 moles de H_2$$

8. Cálculo del consumo de agua en el electrolizador

El cálculo del consumo de agua del electrolizador se realiza utilizando la relación estequiometría entre los productos y reactivos de la reacción electroquímica, esta relación se puede apreciar en la

Ecuación No. 14 (ver pág.12) y se sabe que el flujo promedio del electrolizador es de 101.1mL/min.

$$\left(\frac{101.1mL H_2}{min}\right) \left(\frac{1m^3 H_2}{1,000,000mL H_2}\right) \left(\frac{0.089kg H_2}{1m^3 H_2}\right) \left(\frac{1000gH_2}{1kg H_2}\right) \left(\frac{1 mol H_2}{2.02 g H_2}\right) \\ \left(\frac{1 mol H_2O}{1 mol H_2}\right) \left(\frac{18.03 g H_2O}{1 mol H_2O}\right) \left(\frac{1 mL H_2O}{1 g H_2O}\right) \left(\frac{60 min}{1 hora}\right) = 4.6 mL/hora$$

9. Cálculo del flujo de hidrógeno circulado a través del lecho de silica gel

Ecuación No. 37

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{t}$$

Donde V_{H_2} denota el volumen de hidrógeno medido en mL en el tiempo t registrado en el en min.

Al trabajar con la medida no.1:

$$\frac{(13.00 \pm 0.05)mL}{(0.17 \pm 0.02)min} = (78 \pm 8) \frac{mL}{min} H_2$$

El flujo de hidrógeno circulado a través del lecho de silica gel al trabajar con las medidas no.2 a 6 de la prueba no.1 y con las medidas no.1 a 5 de la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita. Incluyendo la tasa de absorción de H₂ en los tanques de almacenamiento.

10. Cálculo del volumen total de H₂ generado al determinar su contenido de humedad

Ecuación No. 38

$$V_{T,H_2} = \overline{V}_{H_2} * t_t$$

Donde \overline{V}_{H_2} denota el flujo promedio de hidrógeno circulado a través del lecho de silica gel en mL/min y t_t el tiempo total transcurrido durante la prueba en min.

Al trabajar con la prueba no.1:

$$(74 \pm 8) \frac{mL}{min} H_2 * (62 \pm 10) min = (4.6 \times 10^3 \pm 9.2 \times 10^2) mL H_2$$

El volumen total de H₂ generado en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

11. Cálculo de la densidad del gas H₂ producido al determinar su contenido de humedad

Ecuación No. 39

$$\rho_{H_2} = \frac{PM}{RT}$$

(McCabe, 2007)

Donde P denota la presión a la que se encuentra el gas en Pa, M el peso molecular del gas en kg/mol, R es la constante de los gases (8.314 J/mol*K) y T la temperatura a la que se encuentra confinado el gas en grados Kelvin. Se tomó como cierta la aproximación de los gases ideales ya que la prueba se hizo a presión atmosférica, una presión baja, por lo que dicha simplificación es válida.

En la prueba no.1:

$$\frac{1.013 \times 10^5 Pa * \left(\frac{2.01577 \frac{g}{mol}}{1000} \right)}{8.314 \frac{J}{mol * K} * 293.15 K} = 0.083787 \frac{kg}{m^3} = 0.000084 \frac{g}{mL}$$

La densidad del gas H₂ producido en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

12. Cálculo de la cantidad de H₂ producido al determinar su contenido de humedad

Ecuación No. 40

$$m_{T,H_2} = V_{T,H_2} * \rho_{H_2}(T)$$

(McCabe, 2007)

Donde V_{T,H_2} representa el volumen total de H₂ producido en mL y $\rho_{H_2}(T)$ la densidad del gas a la temperatura de operación en g/mL.

Al trabajar con la muestra de la prueba no.1:

$$(4.6 \times 10^3 \pm 9.2 \times 10^2) \text{mL} * 0.000084 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = (0.38 \pm 0.08) \text{g H}_2$$

La cantidad de H₂ producido en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

13. Cálculo de la cantidad de humedad adsorbida a través de la silica gel como desecante

Ecuación No. 41

$$h_{ads} = m_f - m_0$$

Donde m_f representa la masa final de la silica gel junto con su recipiente y m_0 la masa inicial de la misma muestra, ambos en gramos.

Al trabajar con la muestra de la prueba no.1:

$$(26.8392 \pm 0.0001) \text{g} - (26.7160 \pm 0.0001) \text{g} = (1 \times 10^{-1} \pm 1 \times 10^{-4}) \text{g H}_2\text{O}$$

La cantidad de humedad adsorbida a través de la silica gel en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

14. Cálculo del contenido de humedad en el gas H₂ producido mediante electrólisis

Ecuación No. 42

$$\%h = \frac{h_{ads}}{m_{T,H_2}} * 100$$

Donde h_{ads} representa la humedad adsorbida por la silica gel durante la prueba y m_{T,H_2} la cantidad total de H₂ producido en el mismo lapso de tiempo, ambos en gramos.

En la prueba no.1:

$$\frac{(1 \times 10^{-1} \pm 1 \times 10^{-4}) \text{g H}_2\text{O}}{(0.38 \pm 0.08) \text{g H}_2 \text{ húmedo}} * 100 = (32 \pm 6) \% p/p$$

El contenido de humedad en el gas H₂ producido en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

15. Cálculo de la densidad aparente de la silica gel utilizada como desecante

Ecuación No. 43

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V}$$

(McCabe, 2007)

Donde m denota la masa de silica gel en g y V el volumen que ocupa dicha masa junto con los espacios vacíos del sólido en mL.

En la medida no.1:

$$\frac{(6 \pm 1)g \text{ silica}}{(12.00 \pm 0.05)mL} = (0.5 \pm 0.1) \frac{g}{mL} \text{ silica gel}$$

La densidad aparente de la silica gel en la medida no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita.

16. Cálculo del cambio en temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento

Ecuación No. 44

$$\Delta T = T_f - T_0$$

Donde T_f denota la temperatura final alcanzada en la superficie de los tanques de almacenamiento y T_0 la temperatura inicial de los mismos, ambos en °C.

En la medida no.1:

$$(20.3 \pm 0.1)^\circ\text{C} - (18.9 \pm 0.1)^\circ\text{C} = (1.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$$

El cambio de temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento en las medidas no.2 a 5 se calculó de la misma manera previamente descrita.

17. Cálculo del cambio de presión registrado

Ecuación No. 45

$$\Delta P = P_0 - P_f$$

Donde P_f denota la presión final registrada y P_0 la presión inicial, ambos en psi.

En la medida no.1:

$$(165 \pm 5)psi - (108 \pm 5)psi = (57 \pm 7)psi = (4 \times 10^5 \pm 5 \times 10^4)Pa$$

El cambio de presión registrado en las medidas no.2 a 5 se calculó de la misma manera previamente descrita. Incluyendo el cambio de presión registrado al evaluar la influencia de dicho cambio en la tasa de absorción de H_2 en los tanques de almacenamiento.

18. Cálculo del volumen libre ideal que ocupan los gases generados por electrólisis

Ecuación No. 46

$$V_{libre,gases} = \frac{\pi}{4} * (r_1^2 + r_2^2) * h_{libre}$$

Donde r_1 representa el radio del tanque separador gas hidrógeno-agua y r_2 el radio del tanque separador gas oxígeno-agua, ambos en cm. h_{libre} denota la altura libre para ambos gases en su tanque respectivo en cm.

$$\frac{\pi}{4} * [(5.5cm)^2 + (1.5cm)^2] * 5cm = 127.63 cm^3 = 0.00013 m^3$$

19. Cálculo de la cantidad total de moles de gases trabajados en el intervalo de presión registrado

Ecuación No. 47

$$\Delta n_{gases} = \frac{\Delta PV}{RT}$$

Donde ΔP denota el cambio de presión a la que se encuentran los gases en Pa, V el volumen libre que ocupan los mismos en m^3 , R la constante de los gases ($8.314J/mol*K$) y T la temperatura a la que están sometidos los gases en grados Kelvin.

En la medida no.1:

$$\frac{(4 \times 10^5 \pm 5 \times 10^4)Pa * 0.00013m^3}{8.314 \frac{J}{mol * K} * 291.15K} = (0.021 \pm 0.005)mol gases$$

La cantidad total de moles de gases trabajados en las medidas no.2 a 5 se calculó de la misma manera previamente descrita. Incluyendo la cantidad de moles de gases trabajados al evaluar la influencia del cambio de presión en la tasa de absorción de H_2 en los tanques de almacenamiento.

20. Cálculo de la cantidad de moles de H_2 generados

Ecuación No. 48

$$n_{H_2} = \frac{2}{3} * \Delta n_{gases}$$

Donde Δn_{gases} denota la cantidad total de moles de gases trabajados. Tomando que la relación estequiométrica ($2:1, H_2:O_2$) se cumple con exactitud.

En la medida no.1:

$$\frac{2}{3} * (0.021 \pm 0.005)mol gases = (0.014 \pm 0.003)mol H_2$$

La cantidad de moles de H_2 generados en las medidas no.2 a 5 como al evaluarla influencia del cambio de presión en la tasa de absorción de H_2 en los tanques de almacenamiento se calculó de la misma manera previamente descrita.

21. Cálculo del volumen de H_2 generado

Ecuación No. 49

$$V_{H_2} = \frac{n_{H_2} * M}{\rho_{H_2}}$$

Donde n_{H_2} denota la cantidad de moles de H_2 generados, M el peso molecular del H_2 en g/mol y ρ_{H_2} la densidad del gas en g/mL.

En las medidas no.2 a 5:

$$\frac{(0.014 \pm 0.003) \text{ mol } H_2 * 2.01588 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{(0.00033 \pm 0.00004) \frac{\text{g}}{\text{mL}}} = (85 \pm 23) \text{ mL } H_2 = (85 \pm 23) \text{ cm}^3 H_2$$

22. Cálculo de la densidad volumétrica de almacenamiento teórica de la aleación $LaNi_5$

Ecuación No. 50

$$\rho_{v,LaNi_5} = \frac{m_{H_2}}{V_{LaNi_5}}$$

Donde m_{H_2} representa la cantidad de hidrógeno nominal (kg) que puede almacenar la aleación por unidad de volumen V_{LaNi_5} en m^3 .

*Volumen de aleación dentro de los tanques de almacenamiento:

$$6.5 \text{ kg } LaNi_5 * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ cm}^3}{8.5 \text{ g}} * \frac{(1 \text{ m})^3}{(100 \text{ cm})^3} = 7.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3 LaNi_5$$

*Cantidad nominal de hidrógeno capaz de ser absorbido:

$$600 \text{ L } H_2 * \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} * \frac{0.082379 \text{ kg } H_2}{1 \text{ m}^3} = 0.0494274 \text{ kg } H_2$$

*Densidad volumétrica de almacenamiento:

$$\frac{0.0494274 \text{ kg } H_2}{7.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3 LaNi_5} = 64.61 \frac{\text{kg } H_2}{\text{m}^3 LaNi_5}$$

23. Cálculo del tiempo de operación del deshumidificador antes de ser necesaria la regeneración de la silica gel

*Capacidad del tanque en silica gel

$$40 \text{ mL} * \frac{(0.6 \pm 0.1) \text{ g silica gel}}{1 \text{ mL}} = (24 \pm 4) \text{ g silica gel}$$

* 80% de la capacidad del tanque

$$(24 \pm 4) \text{ g silica gel} * 0.8 = (19.2 \pm 3.2) \text{ g silica gel}$$

*Tiempo de operación antes de saturación

Tomando que la humedad inicial de la silica gel es de 7% (p/p), y el valor máximo de humedad en el hidrógeno generado: 34%.

$$(19.2 \pm 3.2) \text{ g silica gel} * \frac{0.33 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ g silica}} * \frac{100 \text{ g H}_2}{34 \text{ g H}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2}{0.082379 \text{ kg H}_2} * \frac{(100 \text{ cm})^3}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ mL}}{1 \text{ cm}^3}$$

$$= \frac{226,214.1337 \text{ mL H}_2}{(90 \pm 10) \frac{\text{mL}}{\text{min}} \text{ H}_2} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = (41 \pm 5) \text{ h}$$

24. Cálculo del área transversal del deshumidificador

Ecuación No. 51

$$A = \frac{\pi}{4} * D^2$$

Donde D representa el diámetro interno del deshumidificador en m.

$$\frac{\pi}{4} * [(0.030 \pm 0.001) \text{ m}]^2 = (7.1 \pm 0.2) \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

25. Cálculo de la velocidad superficial del hidrógeno

Ecuación No. 52

$$V_0 = \frac{\dot{V}}{A}$$

Donde \dot{V} representa el flujo volumétrico de gas en m³/s y A el área transversal del deshumidificador en m².

$$\frac{(0.101 \pm 0.006) \frac{\text{L}}{\text{min}} \text{ H}_2 * \frac{0.001 \text{ m}^3}{1 \text{ L}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}}{(7 \pm 0.2) \times 10^{-4} \text{ m}^2} = (2.4 \pm 0.1) \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

26. Cálculo de la caída de presión dentro del deshumidificador al circular H₂

Ecuación No. 53

$$\Delta P = \left(\left[\frac{150 \bar{V}_0 \mu}{\Phi_s^2 D_p^2} \right] * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \left[\frac{1.75 \rho \bar{V}_0^2}{\Phi_s D_p} \right] * \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \right) * L$$

(McCabe, 2007)

Esta ecuación se conoce como la ecuación de *Ergun*, donde V_0 denota la velocidad superficial o de torre vacía en m/s, μ la viscosidad absoluta en kg/m*s, Φ_s la esfericidad de la silica gel, D_p el diámetro de las partículas de silica gel en m, ρ la densidad del fluido en

kg/m^3 , ε la porosidad o fracción de volumen de huecos en un lecho de sólidos y L la altura total del deshumidificador en m.

$$\left(\left[\frac{150 * (2.4 \pm 0.1) \times 10^{-3} \frac{m}{s} * 0.051 \frac{kg}{m * s}}{1^2 * (1 \times 10^{-3} m)^2} \right] * \frac{(1 - 0.6)^2}{0.6^3} + \left[\frac{1.75 * 1.088 \frac{kg}{m^3} * \left((2.4 \pm 0.1) \times 10^{-3} \frac{m}{s} \right)^2}{1 * 1 \times 10^{-3} m} \right] * \frac{1 - 0.6}{0.6^3} \right) * 0.22 m = (2,992 \pm 567) Pa$$

27. Modelo de regresión que describe la relación entre el flujo de H_2 almacenado con el cambio de temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento

Ecuación No. 54

$$m = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

(Skoog, 2005)

Ecuación No. 55

$$S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

(Skoog, 2005)

Ecuación No. 56

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2$$

(Skoog, 2005)

Ecuación No. 57

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

(Skoog, 2005)

Donde m es la pendiente de la curva y b el intercepto en el eje y .

$$m = \frac{242.7 \frac{mL * ^\circ C}{min}}{80,935 \frac{mL^2}{min^2}} = (0.0030 \pm 0.0002) \frac{min * ^\circ C}{mL}$$

$$b = (0.8 \pm 0.4)^\circ C - (0.0030 \pm 0.0002) \frac{min * ^\circ C}{mL} * (182 \pm 142) \frac{mL}{min} = (0.25 \pm 0.05)^\circ C$$

Por lo tanto,

$$\Delta T = (0.0030 \pm 0.0002) \frac{min * ^\circ C}{mL} * \dot{V} + (0.25 \pm 0.05)^\circ C$$

Donde ΔT el cambio de temperatura en la superficie de los tanques de hidruro metálico en $^\circ C$ y \dot{V} la tasa de H_2 almacenado en mL/min .

28. Cálculo del flujo de carga de H₂ máximo sin alcanzar la temperatura superior de operación (45°C)

A partir del modelo de regresión:

$$\Delta T = (0.0030 \pm 0.0002) \frac{\text{min} * ^\circ\text{C}}{\text{mL}} * \dot{V} + (0.25 \pm 0.05)^\circ\text{C}$$

Siendo $\Delta T = 19^\circ\text{C}$, tomando $T_{amb} = 26^\circ\text{C}$ y $T_f = 40^\circ\text{C}$

$$\dot{V} = \frac{19^\circ\text{C} - (0.25 \pm 0.05)^\circ\text{C}}{(0.0030 \pm 0.0002) \frac{\text{min} * ^\circ\text{C}}{\text{mL}}} = (6,250 \pm 417) \frac{\text{mL}}{\text{min}} = (6.25 \pm 0.42) \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

G. Análisis de error

1. Desviación estándar de la pendiente del modelo de regresión que relaciona el flujo de H₂ almacenado con el cambio de temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento

Ecuación No. 58

$$s_r = \sqrt{\frac{S_{yy} - m^2 S_{xx}}{N - 2}}$$

(Skoog, 2005)

Ecuación No. 59

$$s_m = \sqrt{\frac{s_r^2}{S_{xx}}}$$

(Skoog, 2005)

$$s_r = \sqrt{\frac{0.74(^\circ\text{C})^2 - \left[0.0030 \frac{\text{min} * ^\circ\text{C}}{\text{mL}}\right]^2 * 80,935 \frac{\text{mL}^2}{\text{min}^2}}{5 - 2}} = 0.06^\circ\text{C}$$

$$s_m = \sqrt{\frac{(0.06^\circ\text{C})^2}{80,935 \frac{\text{mL}^2}{\text{min}^2}}} = 0.0002 \frac{\text{min} * ^\circ\text{C}}{\text{mL}}$$

2. Desviación estándar del intercepto del modelo de regresión que relaciona flujo de H₂ almacenado con el cambio de temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento

Ecuación No. 60

$$S_b = s_r \sqrt{\frac{1}{N - (\sum x_i)^2 / \sum x_i^2}}$$

(Skoog, 2005)

$$S_b = 0.06^\circ\text{C} \sqrt{\frac{1}{5 - (911)^2 / 247,033}} = 0.05^\circ\text{C}$$

3. Humedad promedio del H₂ producido mediante electrólisis del agua

Ecuación No. 61

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

(Skoog, 2005)

Donde x_i representa cada uno de los valores de x que componen el conjunto de N medidas de las réplicas.

$$\bar{x} = \frac{[(32 \pm 6) + (22 \pm 3)]\% (p/p)}{2} = (27 \pm 7)\% (p/p)$$

El flujo promedio de H₂ circulado en el deshumidificador se calculó de la misma manera previamente descrita.

4. Desviación estándar de la humedad promedio del H₂ producido mediante electrólisis del agua

Ecuación No. 62

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

(Skoog, 2005)

Donde la cantidad (x_i - \bar{x}) representa la desviación del valor x_i de la media \bar{x} y N-1 el número de grados de libertad.

$$s = \sqrt{\frac{(32 - 27)^2 + (22 - 27)^2}{1}} = 7\% (p/p)$$

La desviación estándar del flujo promedio de H₂ circulado en el deshumidificador se calculó de la misma manera previamente descrita.

5. Propagación de error en el cálculo de la cantidad de humedad adsorbida a través de la silica gel como desecante

- Tipo de cálculo: suma y resta

Ecuación No. 63

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + S_c^2 + \dots}$$

(Skoog, 2005)

Donde S_a , S_b y S_c denotan la incertidumbre de la medida a, b y c, respectivamente.

Al trabajar con la muestra de la prueba no.1:

$$\sqrt{(0.0001g)^2 + (0.0001g)^2} = 0.0001g \text{ H}_2\text{O}$$

La propagación de error en el cálculo de la cantidad de humedad adsorbida a través de la silica gel en la prueba no.2 se calculó de la misma manera previamente descrita. Incluyendo la propagación de error en los cálculos no.8 a 10 de la sección de cálculo de muestra.

6. Propagación de error en el cálculo del flujo de hidrógeno circulado a través del lecho de silica gel

- Tipo de cálculo: multiplicación y división

Ecuación No. 64

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2}$$

(Skoog, 2005)

Donde S_a , S_b y S_c denotan la incertidumbre de la medida a, b y c, respectivamente, siendo “y” el resultado de la multiplicación y/o división.

Al trabajar con la medida no.1:

$$\sqrt{\left(\frac{0.05mL}{13.00mL}\right)^2 + \left(\frac{0.02min}{0.17min}\right)^2} = 0.117709911 * 78 \frac{mL}{min} = 9 \frac{mL}{min}$$

La propagación de error en el cálculo del flujo de hidrógeno circulado en el resto de medidas de la prueba no.1 y 2 se calculó de la misma manera previamente descrita. Incluyendo la propagación de error en los cálculos 2 a 4, 6, 7 y 11 a 20 de la sección de cálculo de muestra.

7. Coeficiente de determinación del modelo de regresión que relaciona el flujo de H₂ almacenado con el cambio de temperatura en la superficie de los tanques de almacenamiento

Ecuación No. 65

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{resid}}{S_{yy}}$$

(Skoog, 2005)

Donde SS_{resid} denota la suma de los cuadrados de los residuales.

$$1 - \frac{0.012284}{0.74} = 0.9834$$

H. Datos calculados

Tabla No. 35: Curvas características del ensamblado de membrana y electrodos (MEA) seleccionado, HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane.

Medida no.	Voltaje (±0.5V)	Corriente (±0.05A)	Potencia (W)	Volumen H ₂ (±0.05mL)	Flujo de H ₂ (mL/min)	Flujo promedio de H ₂ (mL/min)	Consumo energético (kJ/m ³)	Consumo energético promedio (kJ/m ³)	Eficiencia energética	Eficiencia Promedio
1	1.5	0.52	0.78	4.50	4.5	4.5	10400.0	10400	0.97	0.97
2				4.50	4.5		10400.0		0.97	
3				4.50	4.5		10400.0		0.97	
1	2.0	1.00	2	11.50	11.5	11.3	10434.8	10593	0.96	0.95
2				11.50	11.5		10434.8		0.96	
3				11.00	11.0		10909.1		0.92	
1	2.5	1.8	4.5	20.50	20.5	20.0	13170.7	13506	0.76	0.74
2				19.50	19.5		13846.2		0.73	
3				20.00	20.0		13500.0		0.74	
1	3.0	2.8	8.4	29.00	29.0	29.0	17379.3	17393	0.58	0.58
2				28.00	28.0		18000.0		0.56	
3				30.00	30.0		16800.0		0.60	

Tabla No. 36: Curvas características del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a presión atmosférica.

Medida no.	Voltaje ($\pm 0.5V$)	Voltaje promedio ($\pm 0.5V$)	Corriente ($\pm 0.05A$)	Densidad de corriente (A/cm ²)	Volumen H ₂ (± 0.05 mL)	Flujo de H ₂ (mL/min)	Flujo promedio de H ₂ (mL/min)
1	8.2	8.2	0.5	0.02	8.00	24.0 \pm 1.2	24
2	8.2				8.00	24.0 \pm 1.2	
3	8.2				8.00	24.0 \pm 1.2	
1	8.6	8.7	1.0	0.04	15.00	45.0 \pm 2.3	45
2	8.7				15.00	45.0 \pm 2.3	
3	8.7				15.00	45.0 \pm 2.3	
1	9.8	9.8	1.5	0.06	23.00	69.0 \pm 3.5	70
2	9.8				24.00	72.0 \pm 3.6	
3	9.8				23.00	69.0 \pm 3.5	
1	10.0	10.1	2.0	0.08	31.00	93.0 \pm 4.7	90
2	10.2				31.00	93.0 \pm 4.7	
3	10.2				30.00	90.0 \pm 4.5	
1	11.6	11.6	2.5	0.1	39.00	117 \pm 6	112
2	11.6				36.00	108 \pm 5	
3	11.5				37.00	111 \pm 6	

Tabla No. 37: Continuación Tabla No. 36

Medida no.	Consumo energético (KJ/m3)	Consumo energético promedio (KJ/m3)	Potencia (W)	Potencia promedio (W)	Eficiencia energética	Eficiencia promedio
1	10225.0	10216.7	4.1 ± 0.5	4.087 ± 0.003	0.983	0.98
2	10212.5		4.1 ± 0.5		0.984	
3	10212.5		4.1 ± 0.5		0.984	
1	11493.3	11551.1	8.6 ± 0.7	8.66 ± 0.05	0.874	0.87
2	11546.7		8.7 ± 0.7		0.870	
3	11613.3		8.7 ± 0.7		0.865	
1	12782.6	12605.1	14.7 ± 0.9	14.7 ± 0.0	0.786	0.80
2	12250.0		14.7 ± 0.9		0.820	
3	12782.6		14.7 ± 0.9		0.786	
1	12903.2	13221.5	20 ± 1	20.3 ± 0.2	0.779	0.76
2	13161.3		20 ± 1		0.764	
3	13600.0		20 ± 1		0.739	
1	14871.8	15484.8	29 ± 1	28.9 ± 0.1	0.676	0.65
2	16055.6		29 ± 1		0.626	
3	15527.0		29 ± 1		0.647	

Tabla No. 38: Curvas de desempeño del electrolizador PEM de cinco celdas configuradas en serie, operando a diferentes presiones con un volumen libre de 128ml.

Medida no.	Presión en sistema (± 5 psi)	Presión en sistema ($\pm 3 \times 10^4$ Pa)	Tiempo				Voltaje ($\pm 0.5V$)	Corriente ($\pm 0.05A$)
			Min	S	ms	min		
1	20	1.38×10^5	1	12	13	1.2 ± 0.1	11.4	2.50
2	30	2.07×10^5	2	5	19	2.1 ± 0.1	11.4	2.50
3	40	2.76×10^5	2	55	54	2.9 ± 0.1	11.40	2.50
4	50	3.45×10^5	3	42	48	3.7 ± 0.1	11.40	2.50
5	60	4.14×10^5	4	38	19	4.6 ± 0.2	11.40	2.50
6	70	4.83×10^5	5	31	60	5.5 ± 0.1	11.39	2.60
7	80	5.52×10^5	6	17	19	6.3 ± 0.3	11.39	2.60
8	90	6.21×10^5	7	7	72	7.1 ± 0.1	11.39	2.60
9	100	6.89×10^5	7	57	81	8.0 ± 0.1	11.38	2.60
10	110	7.58×10^5	8	47	98	8.8 ± 0.1	11.38	2.60
11	120	8.27×10^5	9	34	74	9.6 ± 0.1	11.38	2.70
12	130	8.96×10^5	10	26	89	10.4 ± 0.1	11.38	2.70
13	140	9.65×10^5	11	17	74	11.3 ± 0.2	11.37	2.70
14	150	1.03×10^5	12	10	93	12.2 ± 0.1	11.32	2.70

Tabla No. 39: Continuación Tabla No. 38

Medida no.	Potencia (W)	Moles de H₂	Flujo de H₂ (mL/min)	Consumo energético (KJ/m³)	Eficiencia energética
1	28.50	0.005	71 ± 26	24121.5	0.42
2	28.50	0.007	96 ± 28	17754.9	0.57
3	28.50	0.009	102 ± 24	16759.7	0.60
4	28.50	0.012	109 ± 21	15741.1	0.64
5	28.50	0.014	91 ± 28	18748.0	0.54
6	29.61	0.017	96 ± 30	18461.1	0.54
7	29.61	0.019	111 ± 51	15996.2	0.63
8	29.61	0.021	102 ± 43	17421.1	0.58
9	29.59	0.024	102 ± 19	17390.5	0.58
10	29.59	0.026	102 ± 18	17393.3	0.58
11	30.73	0.028	109 ± 24	16964.1	0.59
12	30.73	0.031	98 ± 21	18783.8	0.54
13	30.70	0.033	100 ± 24	18395.6	0.55
14	30.56	0.035	96 ± 23	19045.4	0.53

Tabla No. 40: Determinación de humedad del H₂ producido a través de gravimetría

Prueba no.	Duración de prueba (min)	Humedad adsorbida en silica gel (g)	Volumen de H ₂ generado (mL)	Cantidad de H ₂ generado (g)	Humedad de H ₂ (% p/p)	Humedad promedio de H ₂ (%p/p)
1	62±10	1x10 ⁻¹ ±1x10 ⁻⁴	4.6x10 ³ ±9.2x10 ²	0.38±0.08	32±6	27±7
2	67±2	1x10 ⁻¹ ±1x10 ⁻⁴	5.4x10 ³ ±6.8x10 ²	0.45±0.06	22±3	

Tabla No. 41: Flujo de H₂ circulado en el deshumidificador de silica gel

Medida no.	Flujo de H ₂ (mL/min)	
	Prueba no.1	Prueba no.2
1	78.0±7.8	90.0±9.0
2	72.0±7.2	90.0±9.0
3	84.0±8.4	66.0±6.6
4	78.0±7.8	78.0±7.8
5	72.0±7.2	78.0±7.8
6	60.0±6.0	*

*No se realizó dicha medición

Tabla No. 42: Determinación de la densidad aparente de la silica gel utilizada como adsorbente en el deshumidificador

Medida no.	Densidad aparente de la silica gel utilizada (g/mL)	Densidad aparente promedio de la silica gel (g/mL)
1	0.5±0.1	0.6±0.1
2	0.7±0.1	

Tabla No. 43: Cambio de temperatura registrado en la superficie de los tanques de hidruro metálico al llevarse a cabo el almacenamiento

Medida no.	ΔT en la superficie de los tanques (±0.1°C)	Presión inicial de gases (±34,474Pa)	Presión final de gases (±34,474Pa)	ΔP (±5x10 ⁴ Pa)	Tiempo de almacenamiento (min)
1	1.4	1,137,635	744,634	4x10 ⁵	0.22±0.02
2	0.5	1,172,109	779,198		1.03±0.04
3	1.1	1,172,109	779,198		0.32±0.01
4	0.4	1,172,109	779,198		1.15±0.04
5	0.6	1,275,531	882,529		0.90±0.03

Tabla No. 44: Continuación de Tabla No. 43

Medida no.	Cambio de moles en gases, Δn	Densidad de H ₂ (g/mL)	Moles de H ₂ almacenados	Volumen de H ₂ (mL)	Flujo de almacenamiento de H ₂ (m ³ /s)
1	0.021±0.005	0.00033±0.00004	0.014±0.003	85±23	(7±2)x10 ⁻⁶
2					1x10 ⁻⁶ ±4x10 ⁻⁷
3					(4±1)x10 ⁻⁶
4					1x10 ⁻⁶ ±3x10 ⁻⁷
5					2x10 ⁻⁶ ±5x10 ⁻⁷

Tabla No. 45: Efecto de la presión de generación en la tasa de almacenamiento de H₂ en los tanques de hidruro metálico

Medida no.	Presión inicial de gases ($\pm 34,474\text{Pa}$)	Presión final de gases ($\pm 34,474\text{Pa}$)	ΔP ($\pm 5 \times 10^4\text{Pa}$)	Tiempo de almacenamiento (min)
1	1,378,952	1,310,004	7×10^4	0.034 ± 0.002
2	1,310,004	1,241,057		0.101 ± 0.001
3	1,241,057	1,172,109		0.217 ± 0.043
4	1,172,109	1,103,162		0.350 ± 0.018
5	1,103,162	1,034,214		0.500 ± 0.018
6	1,034,214	965,266		0.635 ± 0.008
7	965,266	896,319		0.783 ± 0.392
8	896,319	827,371		0.935 ± 0.013
9	827,371	758,424		1.117 ± 1.117
10	758,424	689,476		1.318 ± 0.017

Tabla No. 46: Continuación de la Tabla No. 45

Medida no.	Cambio de moles en gases, Δn	Densidad de H ₂ (g/mL)	Moles de H ₂ almacenados	Volumen de H ₂ (mL)	Flujo de almacenamiento de H ₂ (m ³ /s)
1	0.004 ± 0.006	0.00006 ± 0.00004	0.002 ± 0.004	85 ± 132	$4 \times 10^{-5} \pm 8 \times 10^{-6}$
2					$2 \times 10^{-5} \pm 4 \times 10^{-6}$
3					$1 \times 10^{-5} \pm 2 \times 10^{-6}$
4					$1 \times 10^{-5} \pm 2 \times 10^{-6}$
5					$9 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6}$
6					$1 \times 10^{-5} \pm 2 \times 10^{-6}$
7					$1 \times 10^{-5} \pm 1 \times 10^{-6}$
8					$9 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6}$
9					$8 \times 10^{-6} \pm 1 \times 10^{-6}$
10					$7 \times 10^{-6} \pm 9 \times 10^{-7}$

I. Anexos

Gráfica No. 11: Curva característica teórica de Voltaje vs. Densidad de corriente, proveída por el fabricante para el ensamblado de membrana y electrodos (MEA): HYDRion™ N117, 25cm² Water Electrolysis Membrane:

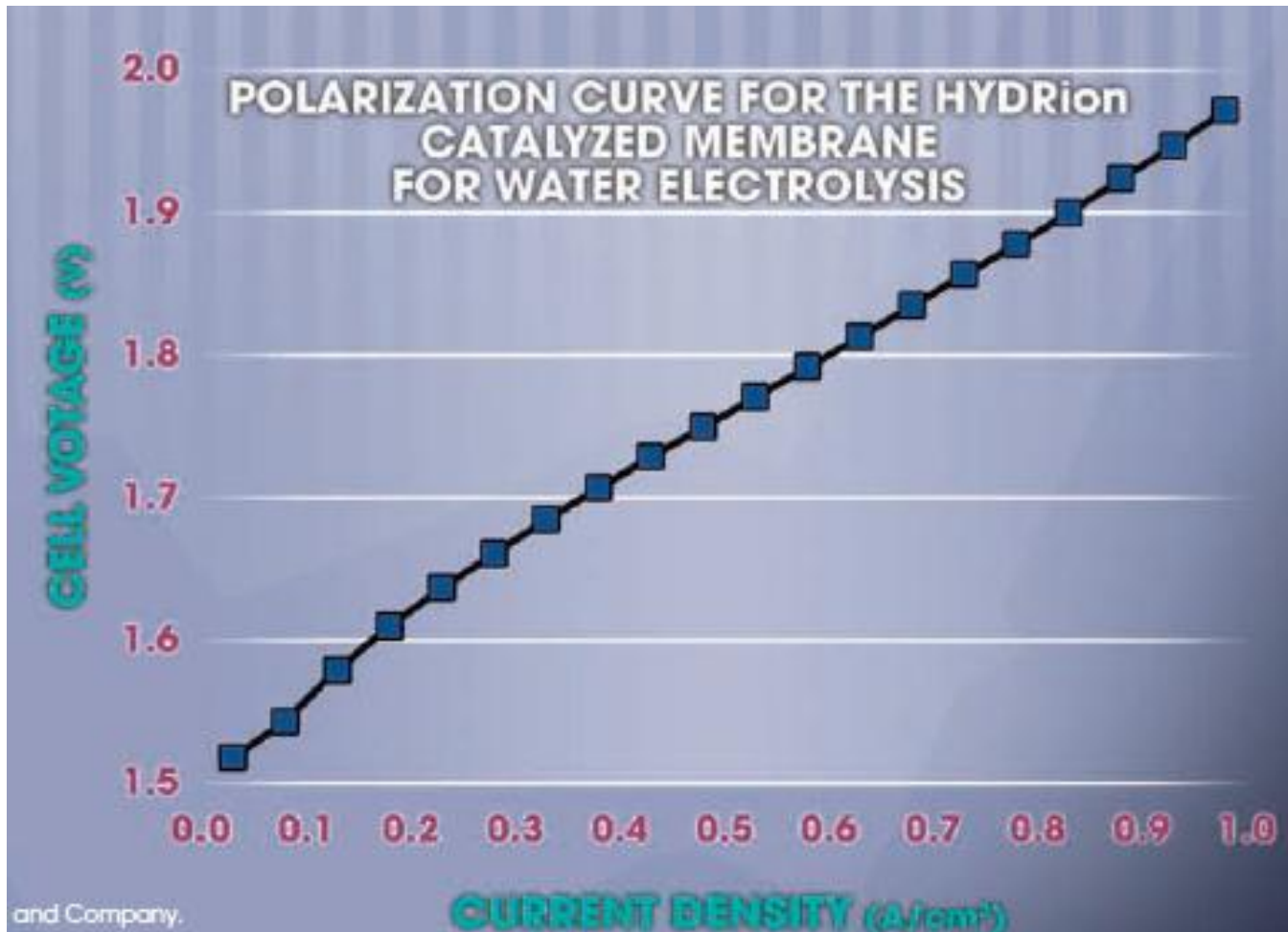


Figura No. 37: Hoja técnica para para ensamblado de membrana y electrodos (MEA) HYDRion™

HYDRion™ APPLICATION NOTE 1.1

Membrane orientation and storage:
 The HYDRion™ catalyst coated membranes have two distinctly different catalyst coatings that can not be interchanged in use. When cutting the membrane with razor blade or scissors, care must be taken to maintain the identity of the hydrogen evolution side of the membrane. When product is shipped it is either marked by "Sharpie" pen on the perimeter exposed membrane or by the use of a notch orientation as shown in the figure to the right.

Storage of the membrane should be kept in sealed polyethylene shipping bag, in a room temperature location away from solvent fumes and vapors. Wet shipped membranes should be kept wet by adding deionized water or distilled water to the shipping bag monthly

Cell Hardware:

Graphite: Graphite can be used on Hydrogen side of the cell, Oxygen side of the cell will cause corrosion of the graphite to CO₂ at a slow rate and thus is not recommended.

Titanium: Titanium has excellent corrosion resistance in the cell, and thus is the material of choice for the metal components. However oxide build-up over time will introduce significant contact resistance when it is used in the cell current path. Thus these contacts should be Pt Plated, or spot welded.

Stainless Steel: In general stainless steel should be avoided for concern over iron leaching and oxide layer build-up.

Plastics : In general most plastics can be used, however care should be taken with plastics such as PVC that frequently contain filler materials that can leach out into the water and foul the membrane

Seals: As with plastics, some rubbers contain filler materials that can leach out and cause membrane contamination, virgin EPDM, or TEFLON™ or some silicones can be used.

Materials to avoid: Copper, Aluminum, Iron, and any Group I or Group II metals. These metals readily form soluble cations that can be adsorbed into the membrane causing membrane fouling readily.

Cell Mounting and use:
 The electrical contact on the membrane should be made over the entire face with contact points spaced no more than 1 mm, 0.1 mm is preferred. The contact force should be in the 50 to 100 psi range. Only De-ionized water with resistivity over 1 M-Ohm should be used, low resistivity water will result in membrane fouling and shortened membrane life. Operating temperature can be from 10 – 80° C. Cell voltage should be maintained under 2.5 V, and cells can be stacked in series in order to build higher stack voltages. Current should be maintained under 3 Amp/cm²

Figura No. 38: Hoja técnica de los difusores PLATion™

Product Information Sheet for PLATion™

printed: 28th of October 2009revised: 28th of October 2009**1. PRODUCT DETAILS****Trade name:**

PLATion™ - Platinum coated Titanium Screen Packs

Product description:

4 pieces of 0.254 mm Titanium Expanded Metal welded on a 0.051 mm thick Platinum coated Titanium Expanded Metal.

Application:

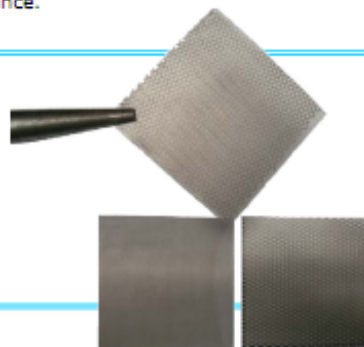
It is designed as a diffuser for use with HYDRion™ water electrolysis membranes, however PLATion™ can be used as a diffuser for other electrochemical applications. Material can handle extreme conditions; it has an excellent corrosion resistance.


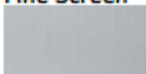
2. PRODUCER / SUPPLIER**Ion Power, Inc**720 Governor Lea Road
New Castle, DE 19720 USA

Phone: (302) 832-9550

Toll Free: (877) 345-9198

Fax: (302) 832-9551

**3. PHYSICAL PROPERTIES**

	Opening Dimension (Length x Width)	Material Thickness	Strand Width	Weight
Coarse Screen 	1.270 mm x 3.175 mm	0.254 mm	0.305 mm	0.050 g/cm ²
Fine Screen 	0.470 mm x 0.787 mm	0.051 mm	0.099 mm	0.009 g/cm ²

- Overall thickness of screen pack: 1.067 mm

Ion Power Incorporated
720 Governor Lea Road
New Castle, DE 19720 U.S.A.

www.ion-power.com
www.nafionstore.com

tel (302) 832 9550
toll-free (877) 345 9198
fax (302) 832 9551

info@ion-power.com

Ion Power, Inc
customized NAFION® products

DU PONT
Official Distributor

NAFION® is a registered Trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company and is used under license by Ion Power, Inc.

Figura No. 39: Diagrama de dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

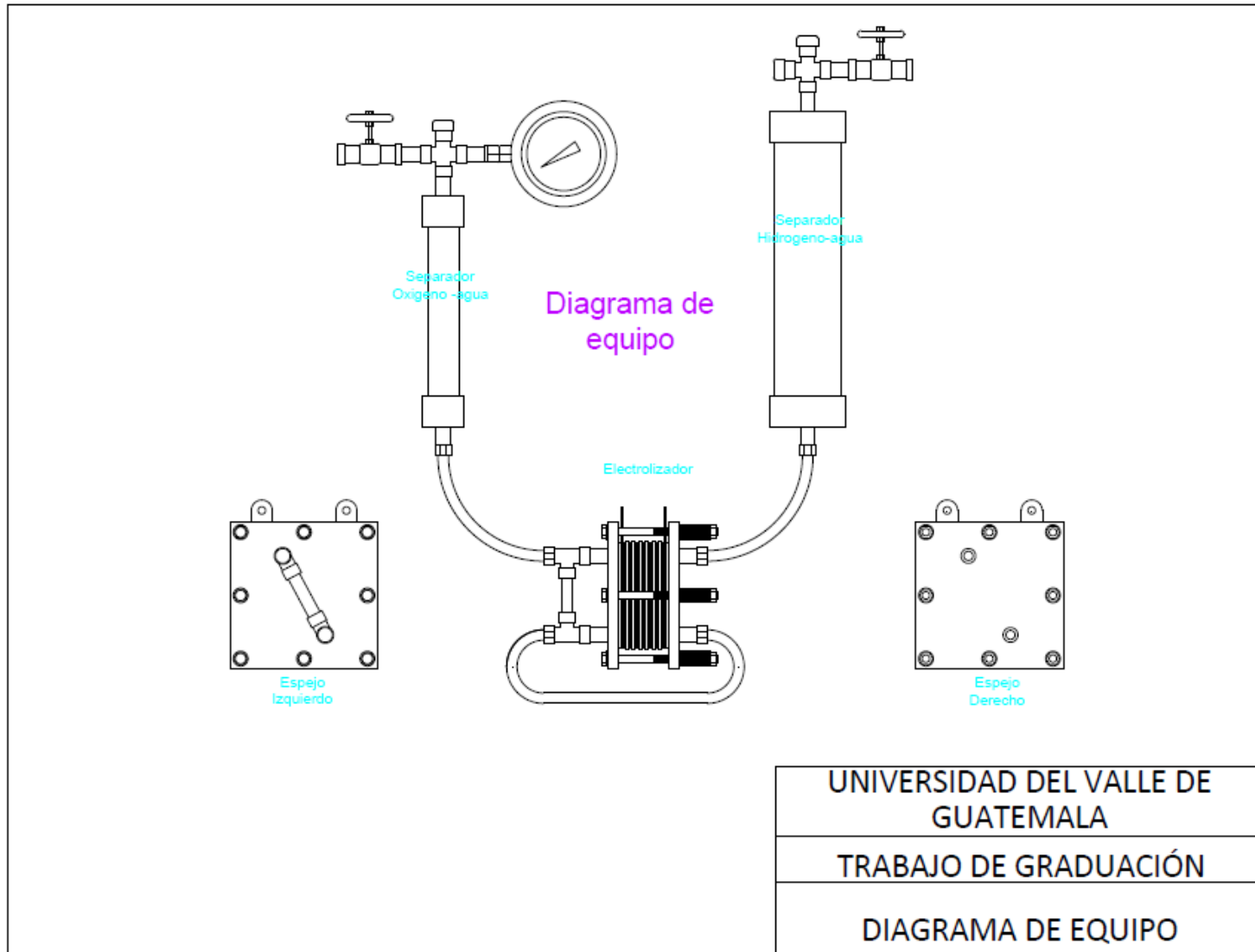


Figura No. 40 : Componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

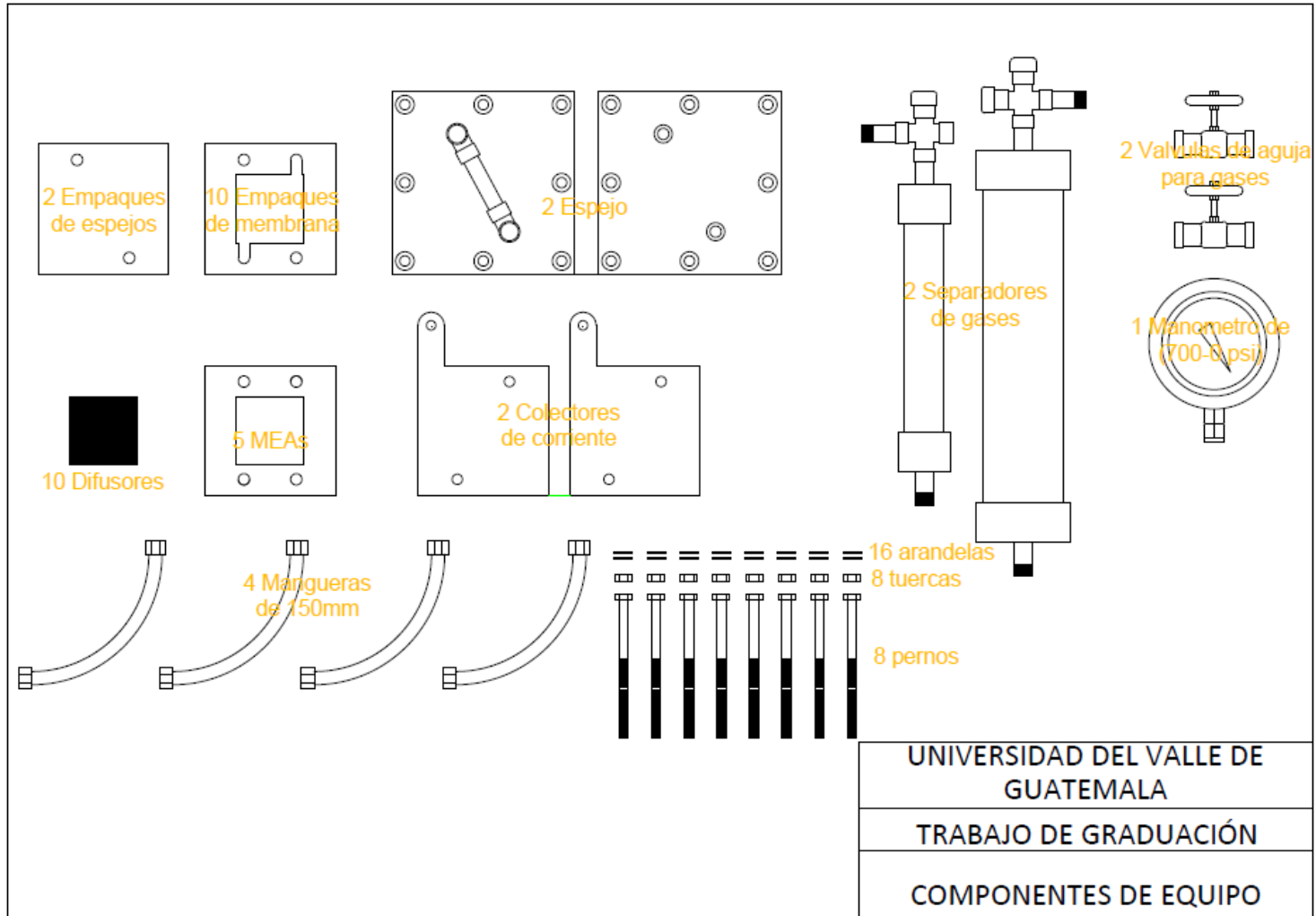


Figura No. 41 : Diagrama de espejos del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

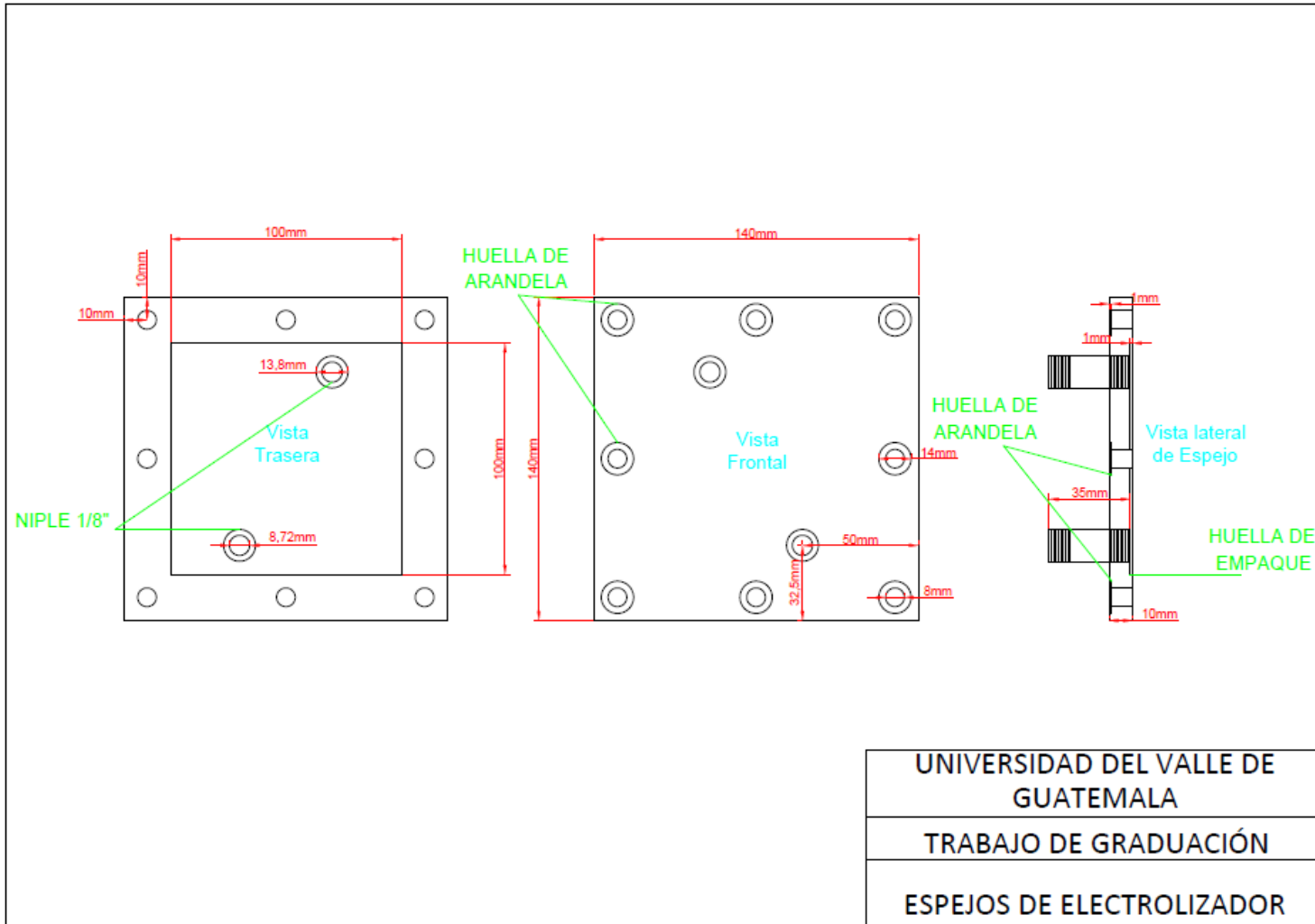


Figura No. 42 : Diagrama de tanques separadores del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

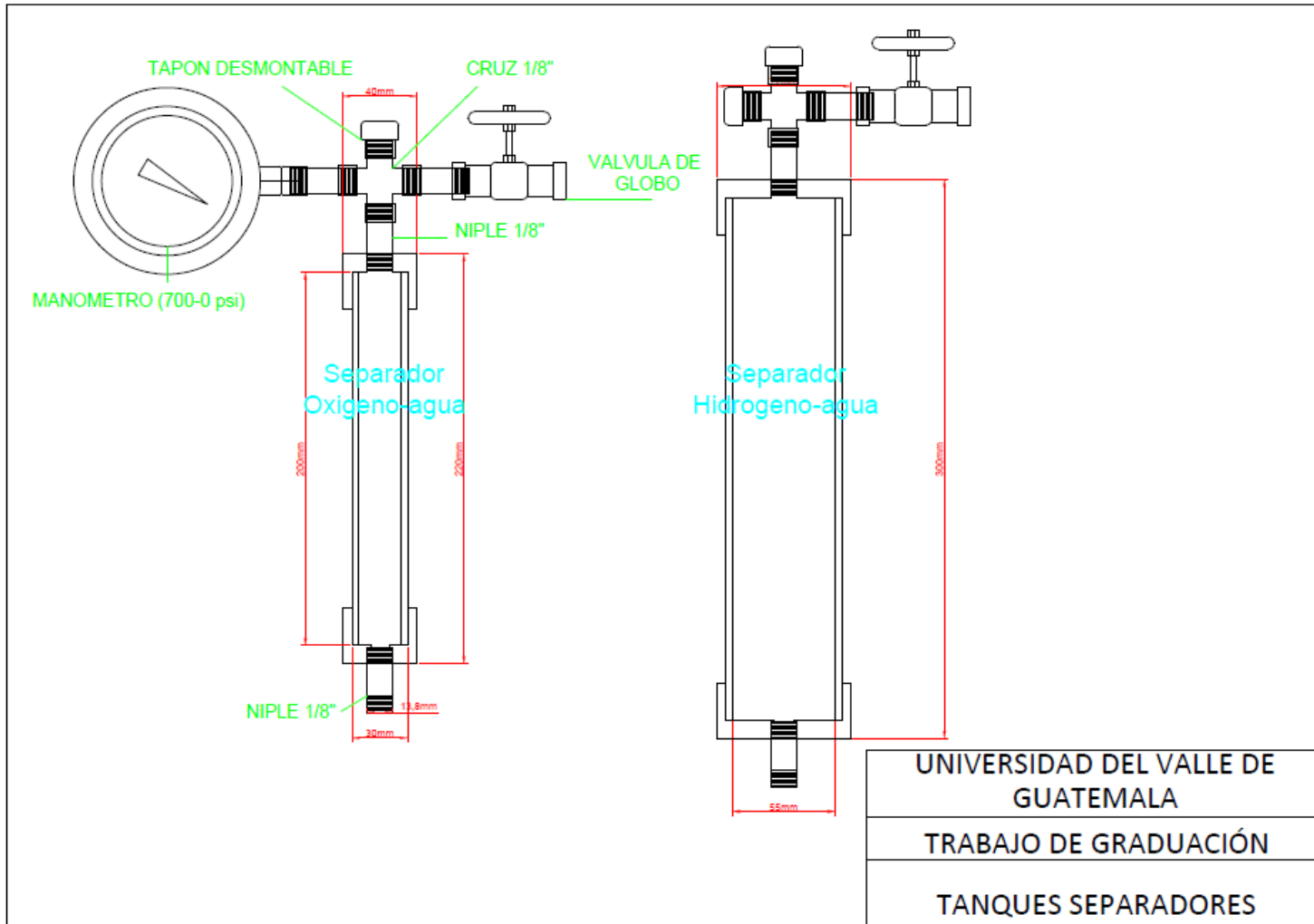
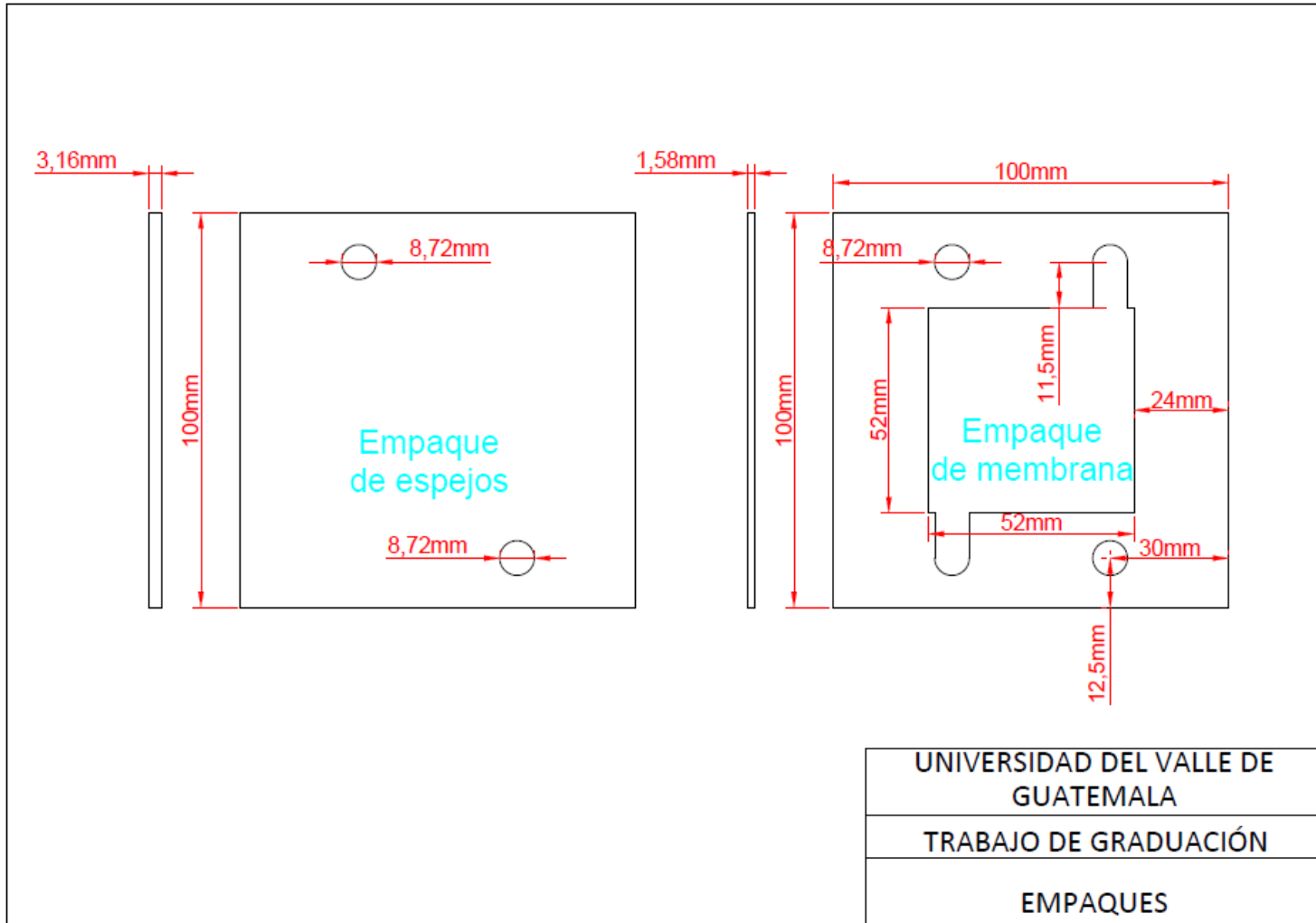


Figura No. 43 : Diagrama de empaques de dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
TRABAJO DE GRADUACIÓN
EMPAQUES

Figura No. 44 : Diagrama de otros componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

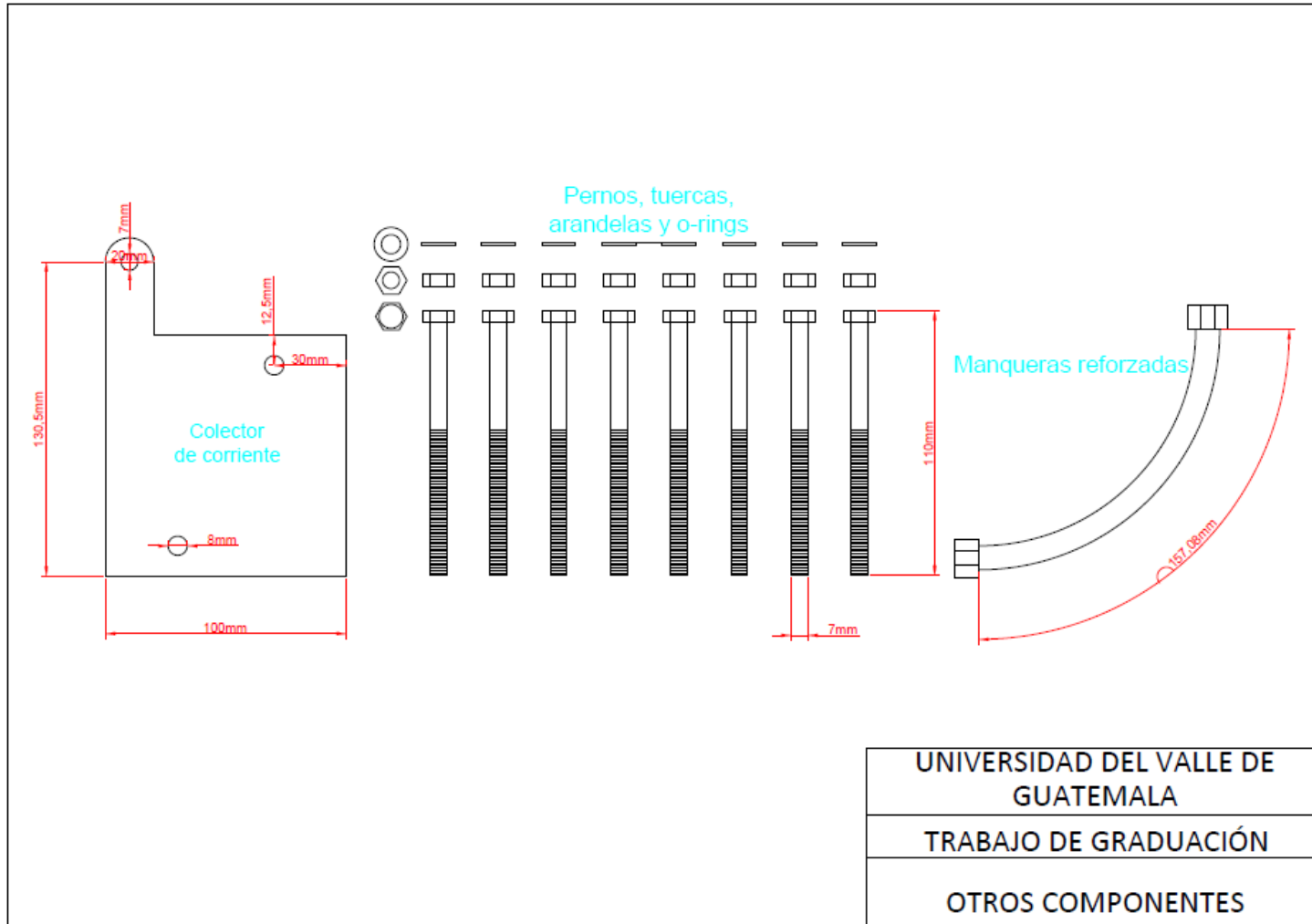


Figura No. 45 : Arreglo de los componentes del dispositivo generador de hidrógeno (Electrolizador PEM).

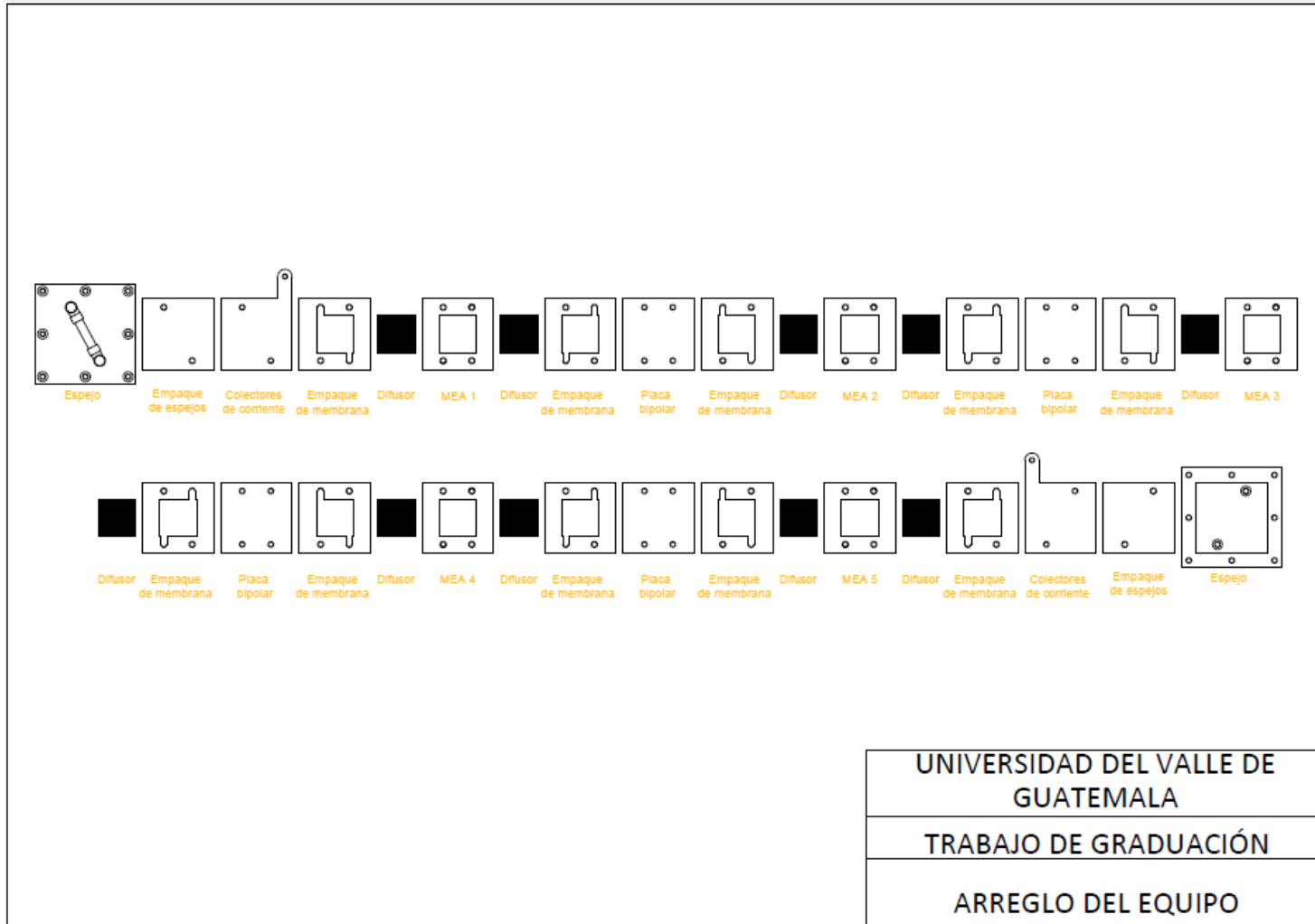


Figura No. 46: Módulo de almacenamiento confinado para el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno

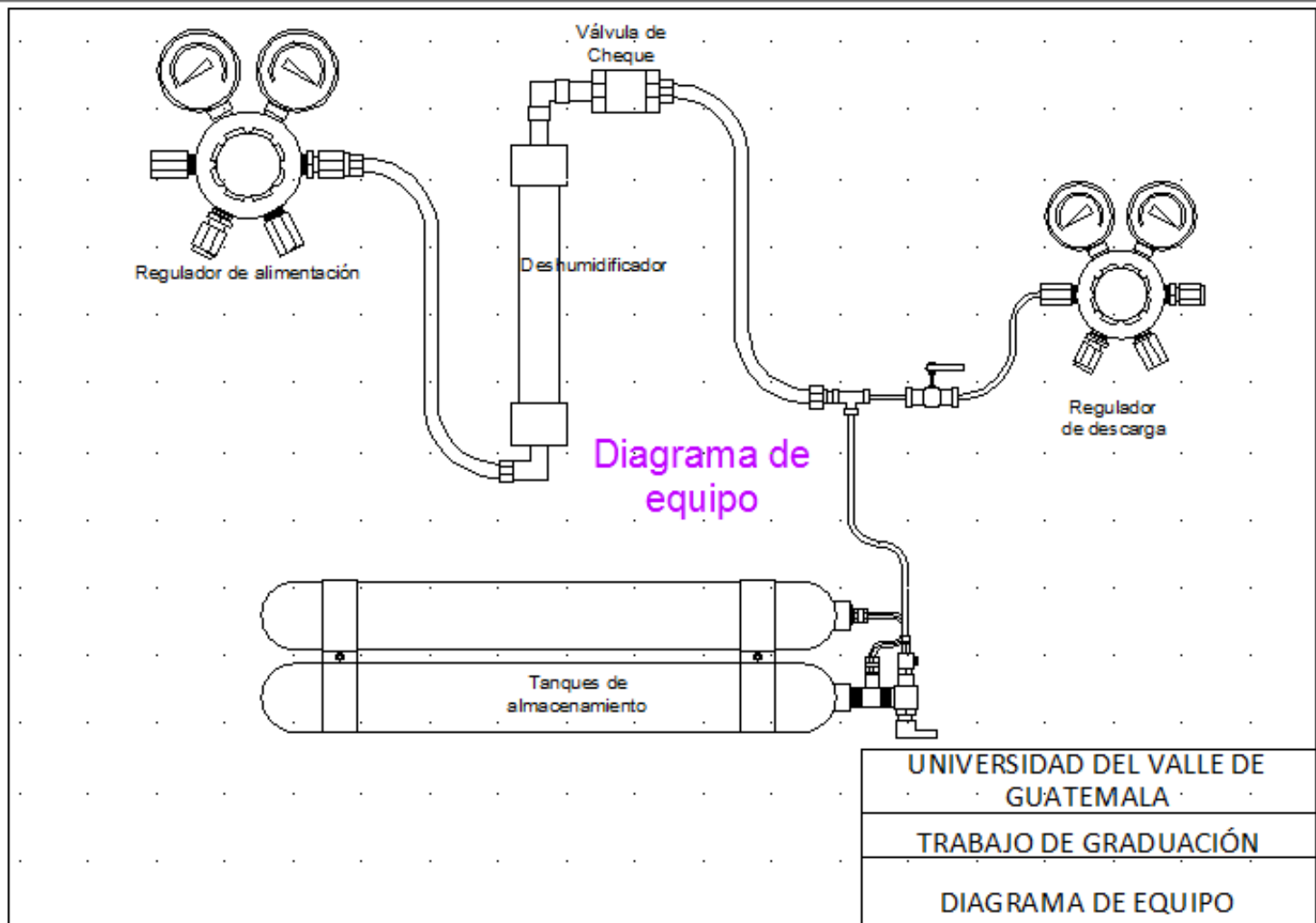


Figura No. 47: Deshumificador diseñado como etapa previa al almacenamiento del gas hidrógeno

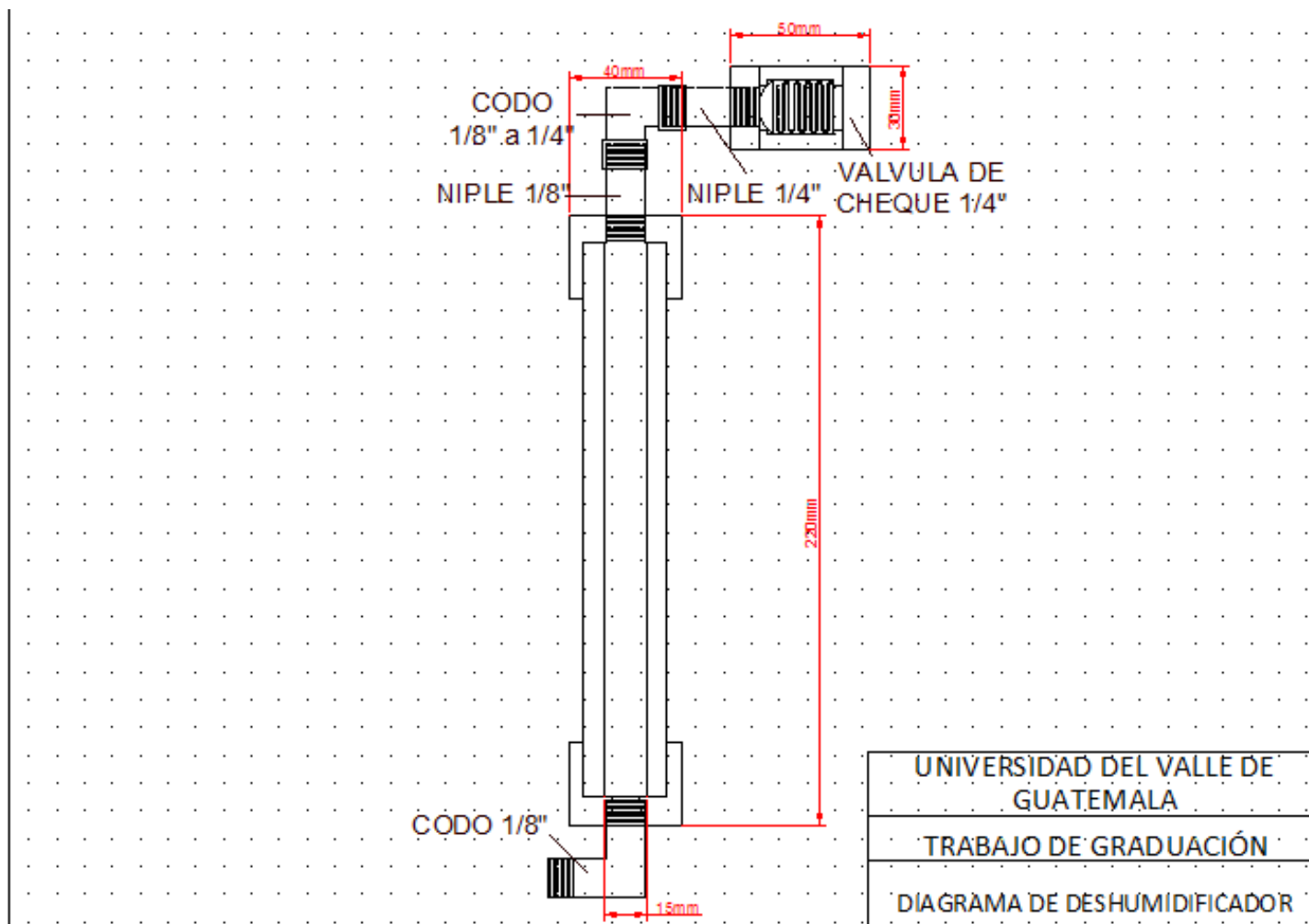


Figura No. 48: Reguladores utilizados para el control de la presión de alimentación a los tanques de almacenamiento y de descarga hacia la celda de combustión

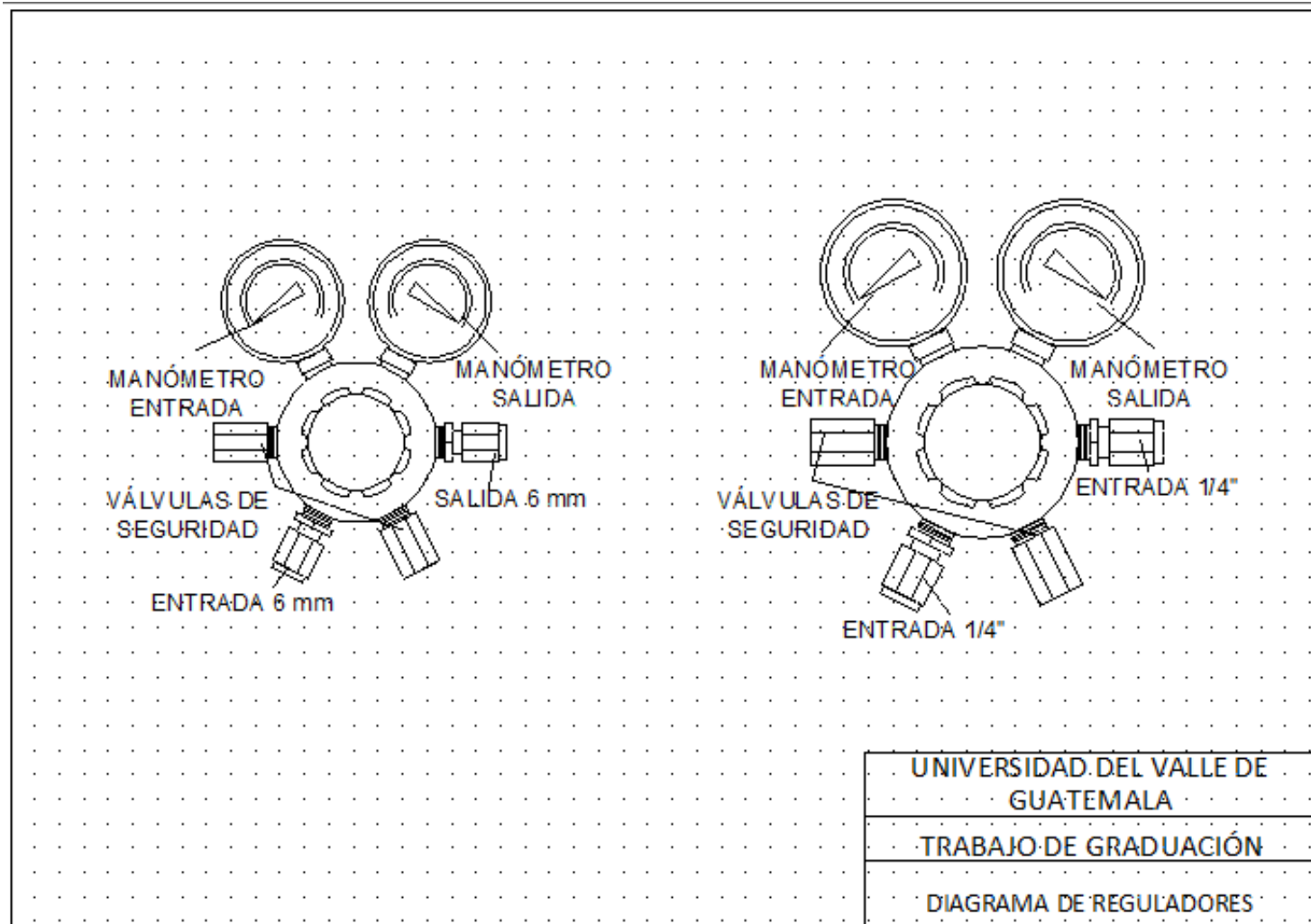


Figura No. 49: Tanques utilizados para el almacenamiento sólido del hidrógeno generado por electrólisis

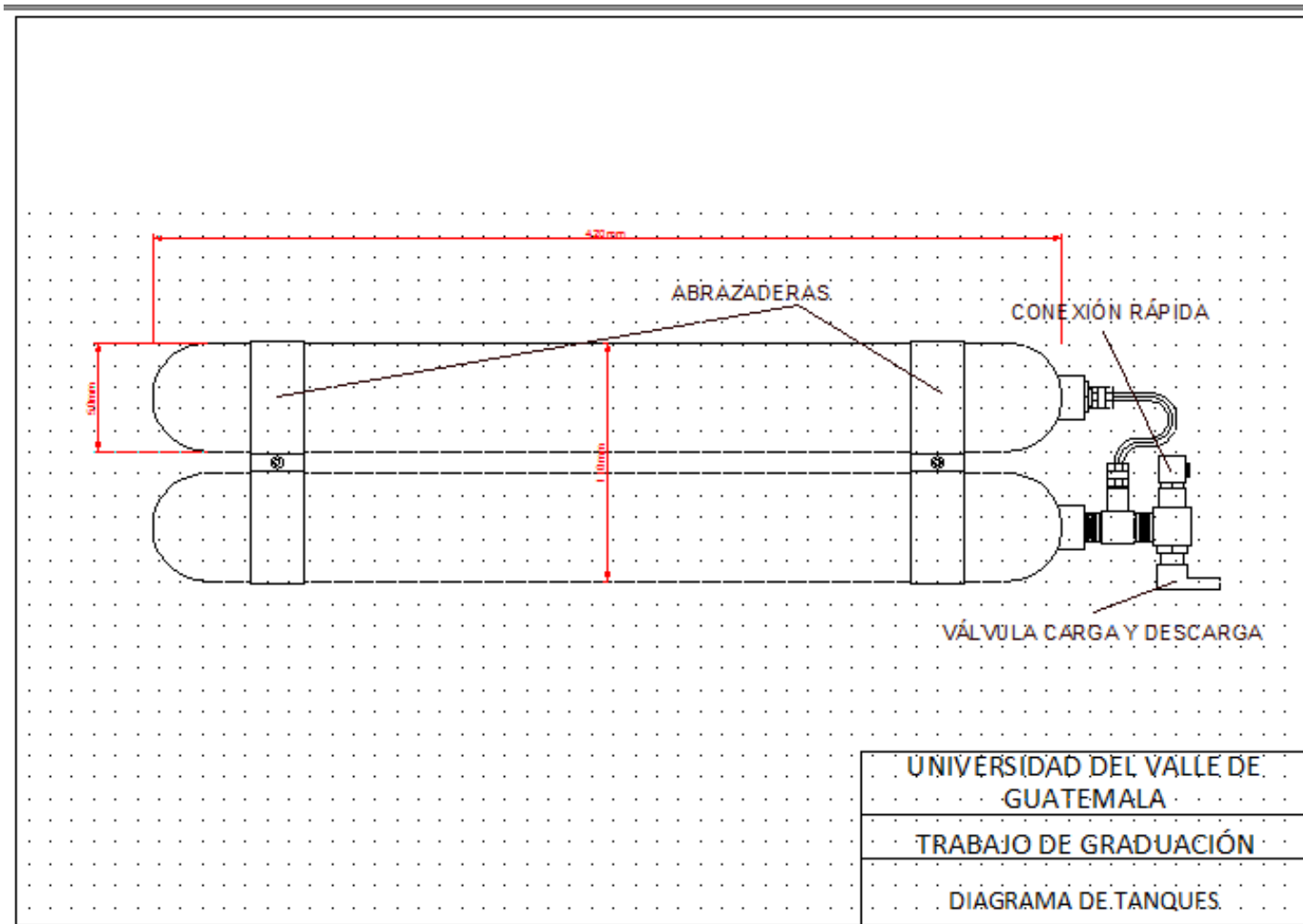


Figura No. 50: Resto de partes que conforman el módulo de almacenamiento en el prototipo de una fuente ininterrumpida de energía a base de hidrógeno

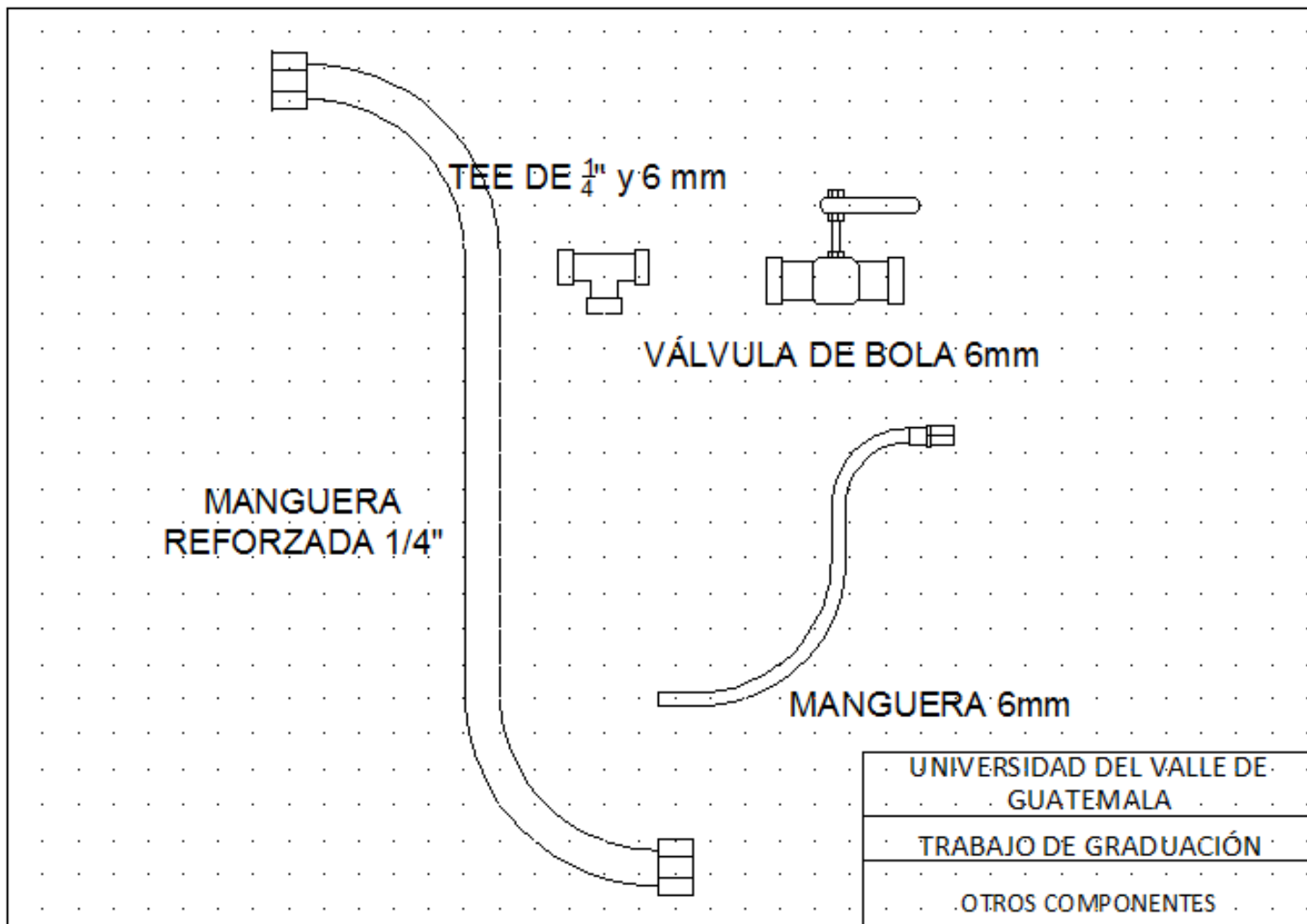


Figura No. 51: Deshumidificador y tanques de almacenamiento de hidruro metálico LaNi_5



Figura No. 52: Regulador de presión que controla la presión de alimentación al tanque de almacenamiento



Figura No. 53: Regulador de presión que controla la presión de alimentación a la celda de combustión



Tabla No. 47: Métodos de control para un transistor en lado alto

Table I		
Method	Basic Circuit	Key Features
Floating Gate Drive Supply		<ul style="list-style-type: none"> • Full gate control for indefinite periods of time • Cost impact of isolated supply is significant (one required for each high side MOSFET) • Level shifting a ground referenced signal can be tricky. Level shifter must sustain full voltage, switch first with minimal propagation delays and lower power consumption • Opto isolators tend to be relatively expensive, limited in bandwidth and noise sensitive
Pulse Transformer		<ul style="list-style-type: none"> • Simple and cost effective but limited in many respects • Operation over wide duty cycles requires complex techniques • Transformer size increases significantly as frequency decreases • Significant parasitics create less than ideal operation with fast switching waveforms
Charge Pump		<ul style="list-style-type: none"> • Can be used to generate an "over-rail" voltage controlled by a level shifter or to "pump" the gate when MOSFET is turned on • In the first case the problems of a level shifter have to be tackled • In the second case turn on times tend to be too long for switching applications • In either case, gate can be kept on for an indefinite period of time • In efficiencies in the voltage multiplication circuit may require more than two stages of pumping
Bootstrap		<ul style="list-style-type: none"> • Simple and inexpensive with some of the limitations of the pulse transformer; duty cycle and on-time are both constrained by the need to refresh the bootstrap capacitor • If the capacitor is charged from a high voltage rail, power dissipation can be significant • Requires level shifter with its associated difficulties
Carrier Drive		<ul style="list-style-type: none"> • Gives full gate control for an indefinite period of time but is somewhat limited in switching performance. This can be improved with added complexity

Fuente: International Rectifier. *IC Driver Application Note*

XIII. GLOSARIO

- A. **Adsorbato:** Gas, vapor o líquido adsorbido. (Veira, 2005)
- B. **Adsorbente:** Medio sólido sobre el que se realiza la adsorción. (Veira, 2005)
- C. **Adsorción:** Proceso en el que una sustancia experimenta una unión física a la superficie de un sólido. (Skoog, 2005)
- D. **Cromatografía:** Término que se aplica a los métodos de separación que se basan en el reparto de las especies de analito entre una fase estacionaria y una móvil. (Skoog, 2005)
- E. **Densidad aparente:** Relación que existe entre la masa del sólido y el volumen total ocupado por el sólido y por el espacio libre. (Soriano, 2001)
- F. **Hidruros:** Compuestos binarios del hidrógeno con cualquier otro elemento metálico o no metálico. (García, 1996)
- G. **Porcentaje en peso (p/p):** Proporción de la masa de un soluto y la masa de su disolución multiplicado por cien. (Skoog, 2005)
- H. **UPS:** *Uninterrupted Power Supply*, por sus siglas en inglés. Suministro continuo de energía eléctrica que permite que un equipo eléctrico continúe operando sin suministro eléctrico durante un tiempo que suele oscilar entre cinco minutos y dos horas en función del UPS y del consumo de los equipos protegidos. (Álvarez, 2009)