



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**ACONDICIONADOR DE ENERGÍA PARA APLICACIÓN PORTÁTIL DE  
UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM**

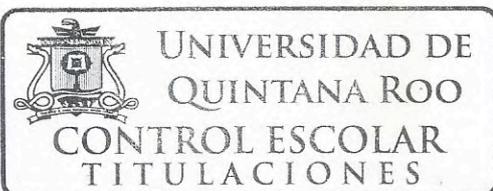
**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE**

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**PRESENTA  
ALEXIS RAFAEL RUIZ ARQUETA**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA**

**ASESORES  
DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC  
DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES  
DRA. EDITH OSORIO DE LA ROSA**





# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

## DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO  
"ACONDICIONADOR DE ENERGÍA PARA APLICACIÓN PORTÁTIL DE UNA CELDA DE  
COMBUSTIBLE TIPO PEM"

ELABORADO POR  
ALEXIS RAFAEL RUIZ ARQUETA

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

### COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

ASESOR:

  
DR. GLISERIO ROMEL BARBOSA POOL

ASESOR:

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESORA:

  
DRA. BEATRIZ ESCOBAR MORALES

ASESORA:

  
DRA. EDITH OSORIO DE LA ROSA



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, AGOSTO DE 2018

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
<b>2.1. ENERGÍA RENOVABLE.</b>	<b>2</b>
<b>2.2. EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO</b>	<b>6</b>
<b>2.3. CELDAS DE COMBUSTIBLE</b>	<b>7</b>
<b>2.3.1. CELDAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1. ENERGÍA DISPONIBLE Y VOLTAJE A CIRCUITO ABIERTO.</b>	<b>12</b>
<b>2.4. MODELOS ELÉCTRICOS</b>	<b>14</b>
<b>2.5. SISTEMAS PORTÁTILES</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE CONVERTIDORES DE POTENCIA Y SELECCIÓN DE LA TOPOLOGÍA.</b>	<b>24</b>
<b>3.1. ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA.</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1. CONVERTIDORES CD-CD</b>	<b>24</b>
3.1.1.1. CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)	25
3.1.1.2. SUPERCAPACITORES	28
3.1.1.3. CALCULO DE CAPACITANCIA EN SUPERCAPACITORES.	31
3.1.1.4. COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS DE LOS CONVERTIDORES DE POTENCIA.	33
3.1.1.5. APLICACIONES DE LOS CONVERTIDORES CD-CD.	34
<b>3.2. RIZADO DE CORRIENTE DE ENTRADA.</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y SELECCIÓN DE TOPOLOGÍA.</b>	<b>36</b>
<b>4.1. PRUEBAS Y PARÁMETROS DE APILAMIENTO DE CC.</b>	<b>37</b>
<b>4.2. BOOST</b>	<b>39</b>
<b>4.3. BOOST CON SUPERCAPACITOR</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL CONVERTIDOR SELECCIONADO.</b>	<b>46</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>51</b>



## **Capítulo 1. Introducción**

En nuestro país las energías renovables y su aplicación mediante diferentes tecnologías como las transformadas mediante módulos fotovoltaicos, sistemas eólicos, hidráulica, sistemas híbridos y las fuentes de biomasa ocupan un porcentaje en la generación de energía más alto al paso del tiempo comparado con los sistemas convencionales. En Quintana Roo, según Damien Guilbert y colaboradores[1] no figura en la generación de energía de ninguna forma, lo que refiere a un problema energético. Una de las oportunidades viables para la región de generar su propia energía son las celdas de combustible debido a su alta densidad de potencia en menor espacio y su amigable incorporación al medio ambiente. Sin embargo, estos sistemas no operan por si solos, es necesario contar con subsistemas periféricos que conviertan la potencia eléctrica producida por las celdas de combustible a una potencia utilizable, para ello se emplean los acondicionadores de energía.

Un acondicionador de energía es una pieza clave en cualquier fuente de energía. Su función consiste en elevar la tensión de una fuente de energía que produce una tensión demasiado baja para ser utilizada y que además no puede ser conectado directamente a una carga eléctrica por la incapacidad de proporcionarle niveles adecuados de corriente y tensión sin el apoyo de un convertidor de energía. En este proyecto de investigación, se analiza y propone un acondicionador de energía para un conjunto de celdas de combustible de intercambio protónico (PEM) que garantice la máxima eficiencia en la aplicación del convertidor. Las topologías que se estudian y analizan son el convertidor CD-CD Boost y el Boost involucrando un sistema de supercapacitores.

Los convertidores Boost son los más conocidos y los más aplicados para acondicionar la energía de las celdas de combustible. Sin embargo, para comparar la máxima eficiencia entre distintos tipos de topologías (boost convencional y el boost con supercapacitor) se simulará y se someterá a pruebas experimentales con

las condiciones de operación de corriente y voltaje del conjunto de celdas de combustible. Su uso estará enfocado en la portabilidad del sistema, lo que requerirá componentes de bajo volumen y alto desempeño.

### **Objetivo General**

Analizar, evaluar y proponer un convertidor electrónico de potencia para el acondicionamiento de energía generada por una celda de combustible tipo PEM de baja potencia (Max. 5 W).

### **Objetivos Específicos**

- Análisis y comparación de convertidores electrónicos para el acondicionamiento de energía de la celda de combustible de baja potencia.
- Simulación del convertidor seleccionado.
- Evaluación experimental de las etapas de potencia del acondicionador de energía.
- Generar conocimiento del convertidor más adecuado como acondicionador de energía para CC de baja tensión.

## **Capítulo 2. Antecedentes**

### **2.1. Energía renovable.**

El uso de la energía juega un papel importante para el bienestar y desarrollo de una nación. Sin embargo, el uso excesivo de los recursos naturales, tanto renovables como no renovables no solo amenaza este desarrollo, sino que también afecta a nuestro medio ambiente, la salud humana y el progreso económico, siendo estos aspectos muy importantes en una nación.

Los gases de efecto invernadero en el mundo pueden desglosarse por actividades económicas que conducen a la producción de estos gases. En la Figura 2.1. se muestran las emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector económico, donde la quema de carbón, petróleo y gas natural para la electricidad y

producción de calor es la principal fuente de emisiones de dichos gases. Además, la agricultura, el transporte y los sectores industriales también representan una fuente de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial [1].

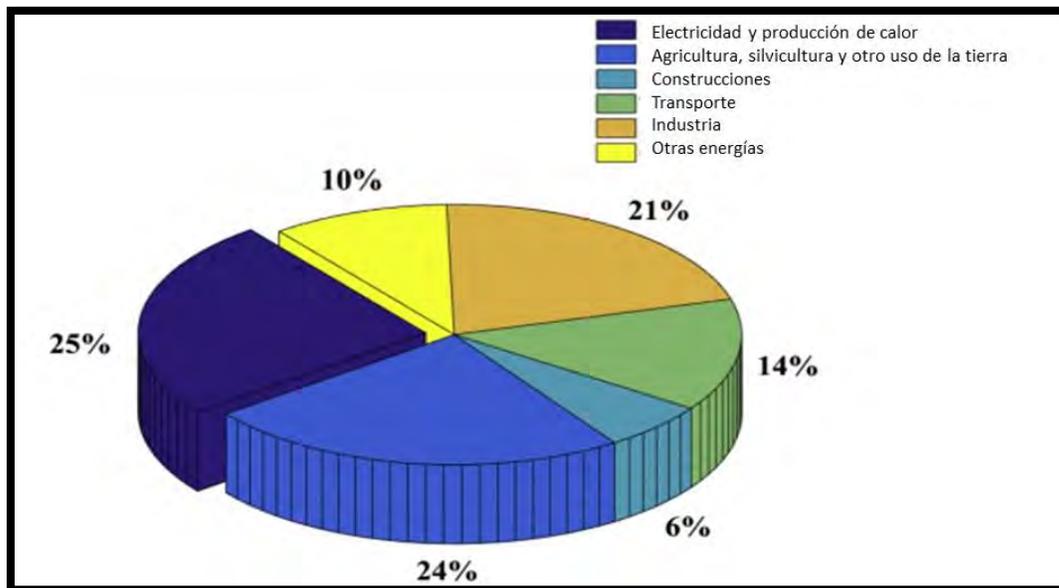


Figura 2.1. Emisión de gases de efecto invernadero por sectores económicos en 2015 (Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) [1].

Respecto a la generación de la energía en México, en la Figura 2.2., se observa que el 57% de la energía es generada por el gas natural, 12.9% por hidroeléctricas y el 11.1% por carbón, quedando las energías renovables (ER) con 3% del global de la generación. Considerando que el aumento de la demanda de energía anual es del 3.4% la generación de energía renovable es baja.

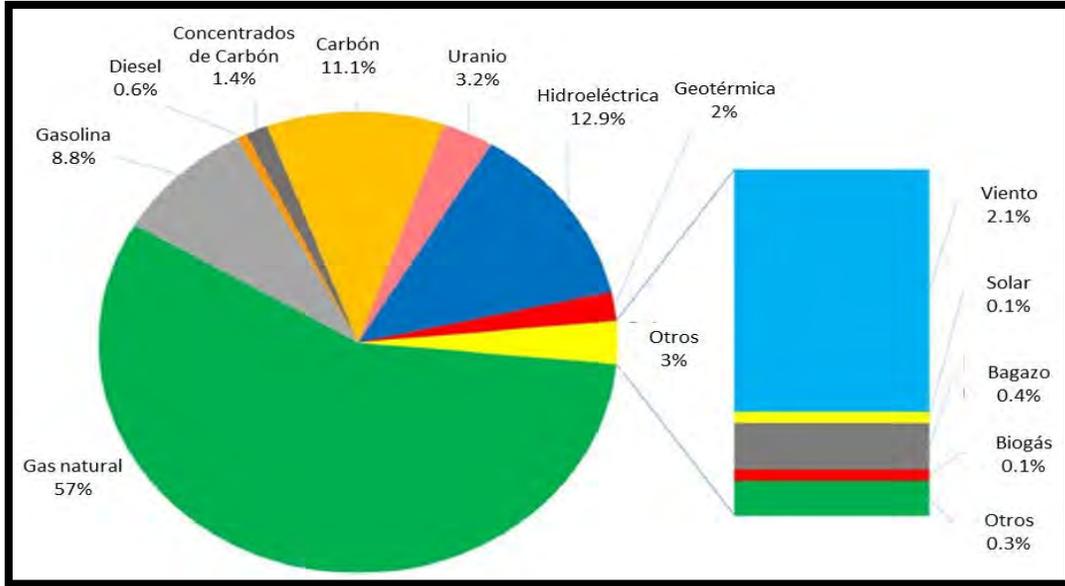


Figura 2.2. Generación de energía a partir de distintas fuentes en México en 2014 [2].

La investigación científica respecto a las ER, abordan temas principales como la energía solar, biomasa, eólica y otras que apenas suman el 10% del total como se muestra en la Figura 2.3.

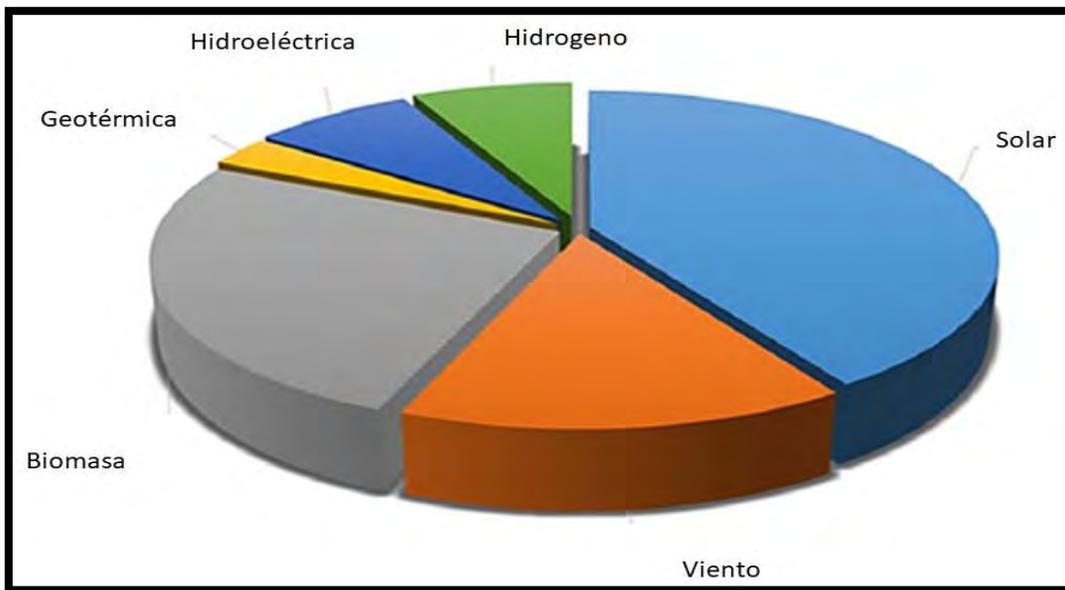


Figura 2.3. Porcentaje de temas de investigación acerca de las ER [2].

En México las ER se han impulsado en los últimos años, sin embargo, existen estados más desarrollados en este aspecto que otros. El estado de Chihuahua

ocupa el primer lugar nacional en la generación de energía solar con un 23%, seguido muy de cerca por Sonora con un 22%. En el caso de energía eólica es Coahuila quien tiene la mayor producción con 20%, quedando Oaxaca con un 11% del total. En cuanto a la biomasa el Estado de México encabeza la producción con un 47% nacional. Finalmente, el principal productor de energía geotérmica es Baja California con un 64% [2]

De acuerdo con estos datos, la producción de ER en la península de Yucatán es prácticamente inexistente, lo que implica que los recursos renovables no están siendo aprovechados como se debería. La Península de Yucatán tiene un potencial importante en las ER. Es posible el desarrollo de proyectos que impulsen la generación de energía eléctrica a través de energía solar, eólica y biomasa que permitan en un corto plazo el crecimiento sostenible y ordenado de la región. El gobierno mexicano tiene propuesto diversas estrategias para el desarrollo de tecnologías de ER y aplicarlas en el país con un plazo de desarrollo de 30 años, también incluyen una componente de planeación de mediano plazo para un periodo de 15 años que se debe actualizar cada tres años.

Se planea para el año 2030 contar con 37.5% de generación con energías limpias, y sucesivamente en 2050 ya tener el 50% como se muestra en la tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1. Metas energéticas del gobierno mexicano [3].

Meta del Gobierno Mexicano de Energías Limpias	
2030	37.5 %
2050	50 %

En México, el hidrógeno se ha convertido en uno de los portadores de ER más prometedoras del país, esto con el objetivo de descentralizar la producción energética actual basada en el petróleo. Su versatilidad con nuevas aplicaciones, su alto valor calorífico y el hecho que puede ser usado como combustible, son ejemplo claro de su importancia en nuestro país.

Otra de las razones principales por las cuales es una fuente tan prometedora es la cantidad de fuentes de producción, debido a que el hidrógeno puede ser extraído de microalgas, bacterias, microorganismos fotosintéticos, fermentación de materia orgánica que pueden ser utilizados en celdas de electrolisis microbiana (MEC). En la Península de Yucatán, en el cual se presentan problemas recurrentes con el sargazo en las playas en los principales centros turísticos, este puede ser utilizado como electrodos de carbón para sistemas de generación y almacenamiento de energía [4].

## **2.2. El hidrógeno como vector energético**

El sistema energético y de transporte hoy en día se basa en su mayoría en combustibles fósiles, esto no se puede considerar sostenible con una población y una industria creciente en los próximos años. Al mismo tiempo existe un consenso mundial referente al aumento de los gases de efecto invernadero, que consiste en la mitigación de estos [5]. Durante toda la historia de las civilizaciones humanas se han llevado a cabo diferentes transiciones o revoluciones energéticas, una de las más actuales corresponde a la transición de los sistemas híbridos. Estos sistemas que combinan varias tecnologías, por lo general unas tecnologías maduras con otras novedosas e incipientes en los mercados, serán las que dominen, para dar paso a tecnologías más eficientes, como lo son las celdas de combustible (CC) y el hidrógeno [6]. El hidrógeno es un combustible prometedor, al que también se le están dedicando muchos esfuerzos de investigación. Sin embargo, no es un combustible más. Por una parte, tiene propiedades físicas y químicas diferentes a otros combustibles; por otra, no es un recurso natural, es decir, no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, es decir, se encuentra combinado en otros compuestos, como por ejemplo el agua. Además, este elemento es uno de los más abundantes en la tierra que tiene otras ventajas; una de ellas consiste en convertir su energía química en energía eléctrica de manera directa haciendo uso de CC evitando así utilizar el accionamiento térmico de algún ciclo de potencia. Con la utilización de la CC, la energía generada puede emplearse tanto con fines estacionarios, transporte y portátiles [7]. Dada su versatilidad con respecto al rango

de posibles áreas de aplicación, al hidrógeno también se conoce como un "vector energético".

En México, la producción de hidrógeno es un campo poco explorado, sin embargo, las principales áreas de investigación que se desarrollan se muestran en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Principales áreas de investigación para la producción de hidrógeno en México [8].

### 2.3. Celdas de combustible

Las CC son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química en energía eléctrica. La conversión de energía química en electricidad es completamente electroquímica, es decir, sin ningún movimiento [9]. Estos dispositivos también ofrecen muchas ventajas si se comparan con los sistemas "tradicionales" de conversión de energía, tales como: confiabilidad, modularidad, funcionamiento silencioso, adaptabilidad del combustible (H, CO, metano), y niveles bajos de emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> (óxidos de azufre y nitrógeno) [10].

Debido a la variedad de tipos de CC y su modularidad, las celdas de combustible tienen la capacidad de cubrir una amplia gama de aplicaciones de suministro de energía, desde una vivienda unifamiliar hasta un hospital completo [11].

Las características más destacadas de una CC son como se había mencionado anteriormente, el sistema de conversión de energía es limpio y eficiente, son compatibles con otras fuentes de energía renovable, se ofrecen en distintos tamaños, producen casi cero de emisiones de efecto invernadero si trabaja con otras fuentes de energía renovable, son silenciosas y pasan desapercibidas. Comparado con los sistemas de combustión interna, carecen de partes mecánicas y móviles a excepción de algunas bombas o compresores en algunos tipos de aplicación de la celda, pero estos últimos son básicamente sistemas periféricos.

Existen limitaciones para el rápido desarrollo de esta tecnología, como por ejemplo el alto costo para todos los mercados en la que podría ser aplicada, el envenenamiento del electrolito o la degradación del catalizador, la baja densidad de potencia por volumen, la menor accesibilidad y la menor durabilidad son algunos desafíos para el desarrollo de la celda de combustible [12]. Las principales ventajas y desventajas del uso de estas celdas son descritas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de una celda de combustible [12].

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño altamente ajustable.</li> <li>• Capaz de casi alcanzar las cero emisiones de efecto invernadero.</li> <li>• Trabaja con diferentes tipos de fuentes de combustible.</li> <li>• No contiene partes móviles.</li> <li>• Recarga rápida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto Costo.</li> <li>• Degradación del catalizador.</li> <li>• Requiere periféricos adecuados para algunas funciones lo que incrementa su costo.</li> <li>• Requiere un sistema de almacenamiento.</li> </ul>



Para realizar el proceso de conversión de energía de una celda, se requiere el combustible, algunos utilizados son el hidrógeno, el gas natural, hidrocarburos ligeros, etc. Sin embargo, el hidrógeno gaseoso es el único que podría ser el de mayor aplicación porque tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, y en caso de accidente se dispersa rápidamente.

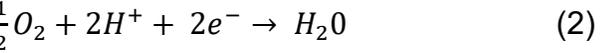
El hidrógeno puede producirse de una gran variedad de fuentes de energía tales como: electrólisis del agua, gas natural, biomasa, etc. y se puede almacenar como gas comprimido, licuado a muy bajas temperaturas, como compuesto líquido (metanol o amoníaco) o como sólido en forma de hidruro metálico.

Es importante conocer cada una de las partes que constituyen una celda con el objetivo de entender más a fondo su funcionamiento. Las celdas están constituidas por las siguientes partes:

- Electrodo: El ánodo, que suministra los electrones al circuito externo, y el cátodo, que los recibe del circuito externo. Los electrodos separan al combustible y al oxidante del electrolito como se muestra en (1), y están hechos de materiales porosos para incrementar el área sobre el cual ocurre la reacción.



Por su parte el cátodo, recibe el oxígeno involucrando además lo obtenido en (1). Posteriormente a esta reacción se produce agua como se muestra en la ecuación (2).



- Electrolito: El tipo de electrolito usado clasifica a las celdas de combustible, y determina el flujo de iones y la temperatura de operación de la celda; puede ser ácido, transportando iones positivos, o alcalino, transportando iones negativos. Puede ser, además de acuoso, líquido y también sólido, que son los adecuados para celdas que funcionan a elevadas temperaturas. [13].

- **Ensamble Membrana Electrodo (MEA):** Es la pieza clave para el bajo costo y buena durabilidad de la CC. La reacción electroquímica sucede alrededor de ambos lados, por lo tanto, el protón es conducido internamente a través de la membrana [14].

### **2.3.1. Celdas de Combustible Tipo PEM**

Las celdas de combustible de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) de manera general utilizan una base de agua, una membrana de polímero ácido como electrolito y electrodos catalizados por platino. Utiliza hidrógeno puro eliminando por completo el monóxido de carbono. Su temperatura de operación se mantiene por debajo de los 100°C [15].

Consisten en un ánodo, cátodo y una membrana polimérica como electrólito. Durante el proceso de conversión de energía, el hidrógeno se oxida en el ánodo y el oxígeno se reduce en el cátodo. Los protones se transportan desde el ánodo al cátodo a través de la membrana y los electrones se transportan sobre un circuito externo. En el cátodo, debido al proceso de reducción del oxígeno este reacciona con protones y electrones, produciendo así calor y generando agua como consecuencia, dicho proceso se ilustra en la Figura 2.8.

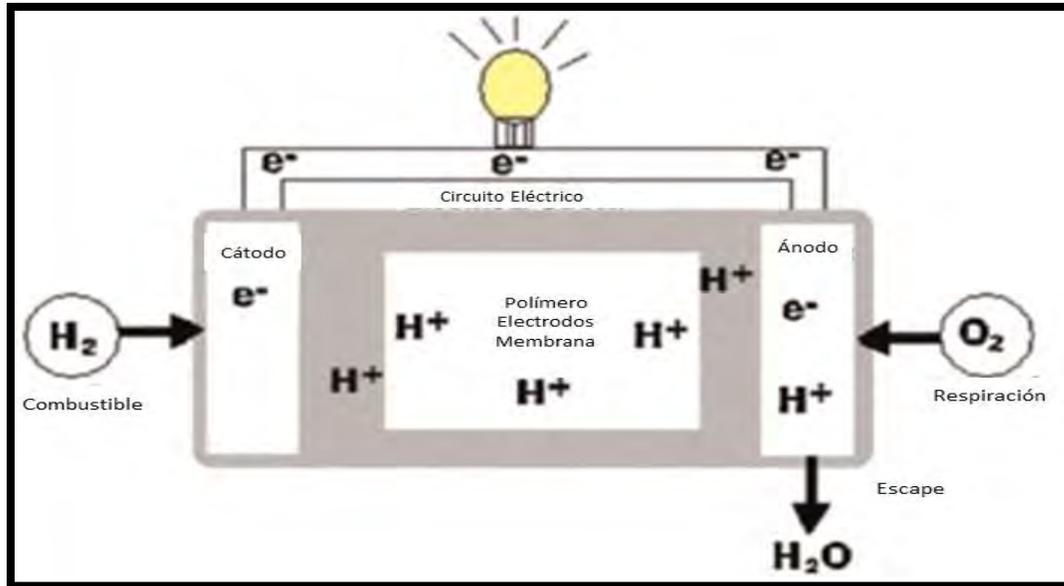


Figura 2.8. Diagrama del proceso electroquímico en una PEMFC [12].

Las PEMFC pueden ser distinguidas mediante su temperatura de operación. Si la temperatura se encuentra en el intervalo de 60-80°C, es llamada de baja temperatura. Si esta temperatura se encuentra en un intervalo superior, 110-180°C, se le llama de alta temperatura [12].

Entre los materiales para la manufactura de una celda “estándar” (baja temperatura) se encuentra la membrana, que utiliza como electrolítico un compuesto con teflón patentado por la empresa Dupont llamado Nafion que fue desarrollado para aplicaciones espaciales alrededor de 1960. En cambio, para las celdas de alta temperatura se utiliza otro compuesto que recibe el nombre Nafion-Polibenzimidazol (PBI) dopado con ácido fosfórico.

Uno de los componentes principales de este tipo de celdas, es la membrana de intercambio protónico por el cual se le da el nombre.

Sin embargo, el Nafion presenta algunos problemas como son los altos costos, alta permeabilidad al combustible y propiedades restringidas bajo las condiciones de operación más estrictas. Por consecuencia de los problemas que se presentan, se han dedicado grandes esfuerzos para el desarrollo de otros materiales que mitiguen

dichas dificultades y se preparen membranas con rendimiento mejorado a temperaturas elevadas y con mejor control de humedad relativa [16].

### 2.2.1. Energía disponible y voltaje a circuito abierto.

Teóricamente, a condiciones controladas de 1 atm, y 25°C la CC otorgará como voltaje a circuito abierto la tensión de 1.229 V. Sin embargo, esto disminuye cuando se le conecta una carga y esta va demandando mayor corriente a la CC. Usualmente el rango de operación de una celda de combustible suele estar entre 0.6 a 0.7 V. La caída de voltaje es causada por varios factores, como, por ejemplo, reacciones electroquímicas lentas que ocurren tanto en el ánodo como en el cátodo, conocidas como sobrepotencial de activación. Mientras que las pérdidas por resistencia en la membrana causada por el paso del hidrógeno y el cortocircuito de electrones a través de la membrana son denominadas sobrepotenciales óhmicos. Finalmente, las pérdidas por transporte de masa que ocurre por la saturación de oxígeno y de agua en la MEA se establecen como sobrepotenciales por concentración. Las pérdidas se ilustran en la Figura 2.9 [17].

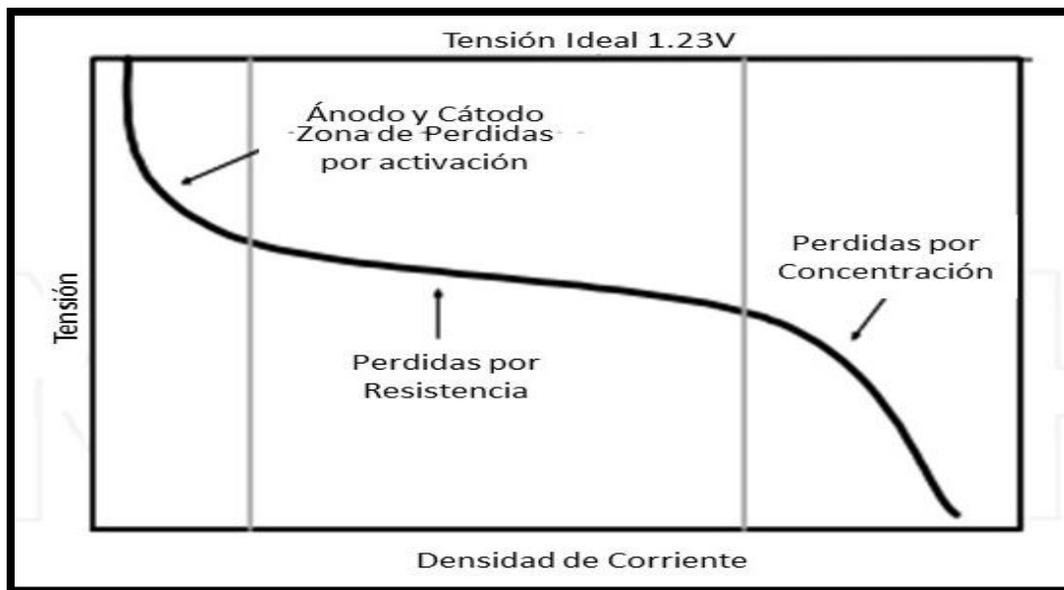


Figura 2.9. Curva de polarización de una celda de combustible [18].

La tensión a circuito abierto teórica (open circuit voltage, OCV), puede ser calculada mediante la ecuación (3); en donde la parte negativa de la ecuación representa la potencia del ánodo a una temperatura T, mientras que la parte positiva representa el potencial del electrodo.

$$V_{cell}^{OCV} = E_{O_2/H_2O}^r - E_{H_2/H^+}^r \quad (3)$$

La ecuación anterior puede ser representada por:

$$V_{cell}^{OCV} = E_{O_2/H_2O}^o - E_{H_2/H^+}^o + 2.303 \frac{RT}{2F} \log\left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{0.5}}{a_{H_2O}}\right) \quad (4)$$

En la ecuación (4) los términos  $a_{O_2}$ ,  $a_{H_2}$  y  $a_{H_2O}$ , pueden ser reemplazados por las presiones parciales  $P_{O_2}$ ,  $P_{H_2}$  y  $P_{H_2O}$  respectivamente para realizar el cálculo del voltaje a circuito abierto.

Cuando una densidad de corriente  $I_{cell}$  pasa a través de la celda, el voltaje  $V_{cell}$  puede ser expresado como en (5).

$$V_{cell} = E_c - E_a - I_{cell}R_m \quad (5)$$

En donde  $E_c$ , es el potencial en el cátodo,  $E_a$  el potencial en el ánodo de la celda, y  $R_m$  es la resistencia en la membrana.

Considerando las pérdidas mencionadas con anterioridad y para obtener un valor más cercano al real de la tensión a circuito abierto, se utiliza (6).

$$V_{measured}^{OCV} = V_{cell}^{OCV} - \Delta V_{H_2-xover} - \Delta V_{PtO-mixed} \quad (6)$$

Donde  $V_{measured}^{OCV}$  es el voltaje medido a circuito abierto,  $\Delta V_{H_2-xover}$  es la caída de voltaje causada por el paso del hidrógeno del ánodo al cátodo y  $\Delta V_{PtO-mixed}$  es la caída de voltaje causada por la superficie de potencial mezclado del cátodo [19].

Utilizando un potencióstato la CC se somete a distintos flujos y condiciones de operación, permitiendo saber su tensión e intensidad de corriente en cada caso.

Las pruebas pertinentes pueden ser realizadas con un potencióstato. En la Figura 2.10, se muestran un ejemplo de las conexiones con una CC.

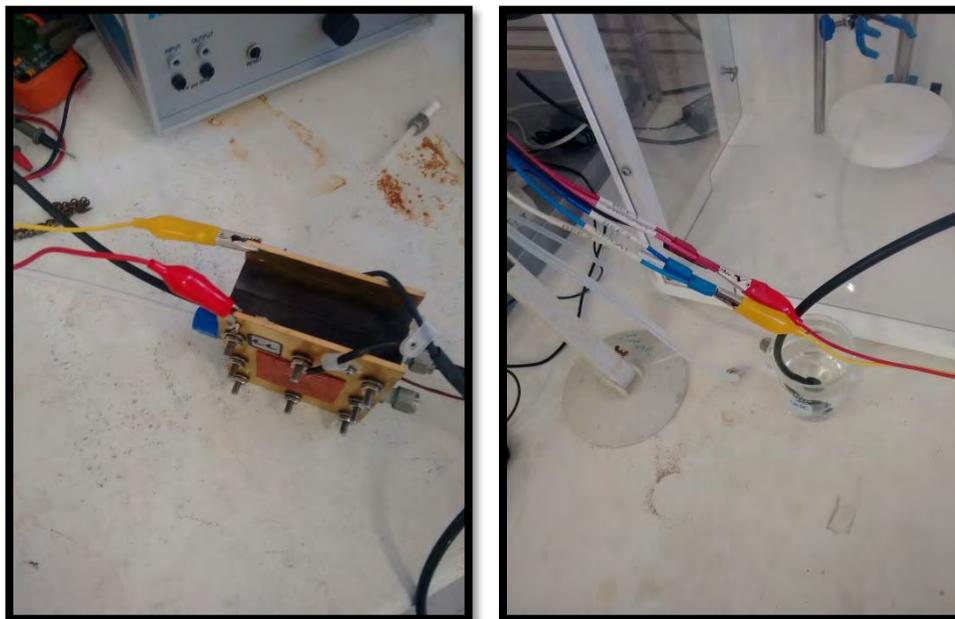


Figura 2.10. CC en pruebas a circuito abierto.

#### 2.4. Modelos eléctricos

En teoría los componentes, tanto el ánodo como en el cátodo de una CC tipo PEM deben ser simétricos alrededor de la membrana. La conducción eléctrica en cualquier material es el movimiento de partículas cargadas eléctricamente a través de un medio de transmisión. Este movimiento forma una corriente eléctrica en respuesta a un campo eléctrico. La ecuación que define la transferencia del electrón a través de la capa de difusión de gases, platos bipolares y los protones a través de la membrana puede ser evaluada por la ecuación de Laplace.

$$\nabla * (\sigma \nabla \rho) = 0 \quad (7)$$

Donde  $\rho$  es el potencial eléctrico. La conductividad eléctrica/protónica  $\sigma$  para los electrones y protones es el inverso de la resistividad eléctrica/protónica [20].

$$\sigma = \frac{1}{\rho_e} \quad (8)$$

En una CC, la capa del electrolizador, la capa de difusión de gases (CDG), los circuitos de flujo, colectores de corriente y las terminales de conexión contribuyen al potencial óhmico en una PEMFC. El potencial óhmico es dividido en dos: resistencia iónica y eléctrica. La resistencia iónica se debe al flujo de electrones a través de la membrana. La componente eléctrica, es la resistencia de los componentes de CC eléctricamente conductores al flujo de electrones. La resistencia eléctrica es usualmente causada debido al contacto no apropiado entre los difusores de gas, platos bipolares y otras conexiones.

El sobrepotencial óhmico es (por definición) linealmente proporción a la corriente:

$$E_{ohm} = R_{cell}I \quad (9)$$

Donde  $R_{cell}$  es la resistencia óhmica efectiva de la CC la cual puede ser sustituida por la suma de resistencia de los de componentes de la celda.

$$E_{ohm} = (R_{el} + R_{pl} + R_{mem})I \quad (10)$$

Donde  $R_{el}$ ,  $R_{pl}$  y  $R_{mem}$  son la resistencia de los electrodos, platos bipolares y la membrana respectivamente.

La resistencia de la corriente que atraviesa el electrodo y el plato de flujo, fueron modelados por Marr y Li [22], en términos de la efectividad resistiva del electrodo  $\rho_{eff}$  Figura 1.11.

$$R_{el,pl} = \rho_{eff} \frac{l}{A} \quad (11)$$

Donde  $l$  y  $A$  son el largo y la sección transversal del conductor [22].

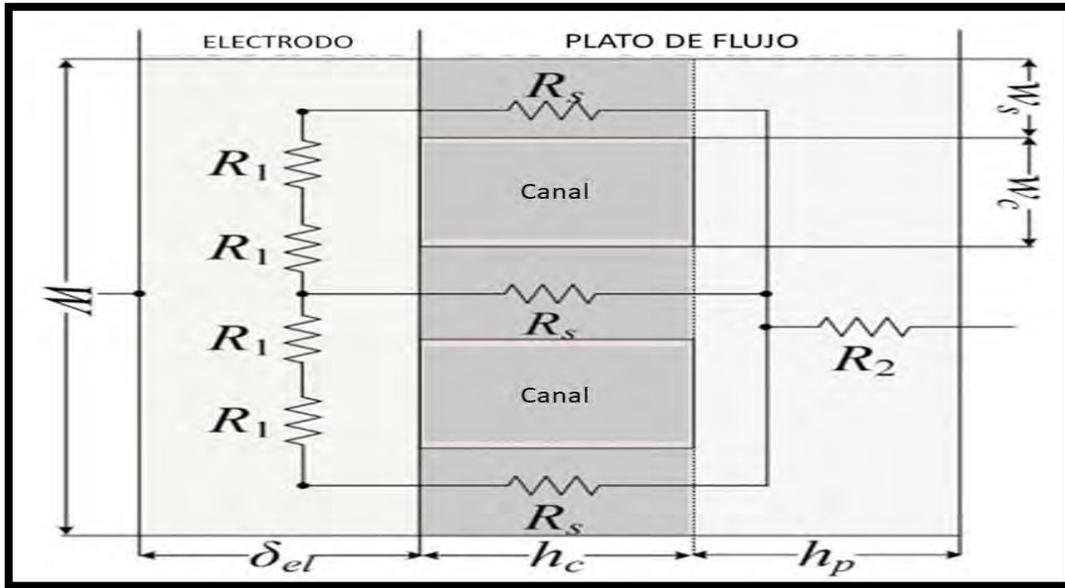


Figura 2.11. Modelo de un circuito eléctrico de la resistencia en el electrodo y el plato bipolar [23].

De manera general podemos obtener un circuito equivalente de una celda de combustible tipo PEM. El modelo que se muestra en la Figura 1.12, proporciona una respuesta precisa para el estado estable, así como para el estado dinámico de la CC, además es uno de los circuitos equivalentes que vinculan las reacciones químicas con los parámetros eléctricos. Con los años se han propuesto diferentes modelos de circuitos equivalentes.

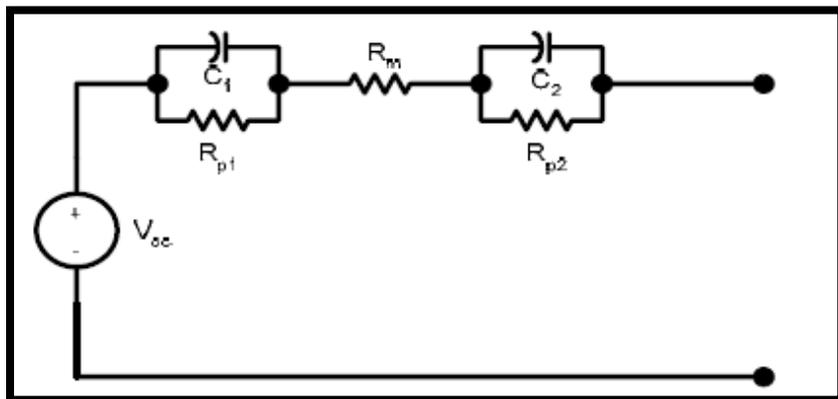


Figura 2.12. Circuito equivalente de una PEMFC [24].

En el circuito equivalente  $R_m$  corresponde a la resistencia de la membrana que está relacionado con la resistencia electrolítica. El modelo también contiene dos resistencias y dos capacitores en paralelo ( $R_{p-1} - C_1$  y  $R_{p-2} - C_2$ ) que se refieren a las constantes de tiempo de cada electrodo y están ligadas con los fenómenos de transporte de electrones en el ánodo y cátodo. Los parámetros anteriores se pueden calcular en términos de los parámetros químicos de la CC [24].

## 2.5. Sistemas portátiles

Actualmente, los dispositivos portátiles son indispensables día a día, por lo que su demanda de fuentes de energía de calidad, durabilidad y bajo costo ha ido en incremento. En este mercado es importante la calidad y desempeño al menor costo posible. Para la demanda de este tipo de mercado las CC son la mejor opción debido a sus prestaciones, como densidad de energía, durabilidad, diseño simple, bajo costo y la llegada de los tanques de hidruros metálicos que permiten almacenar por largos periodos de tiempo. El sistema de una celda de combustible es representado en la Figura 2.13.

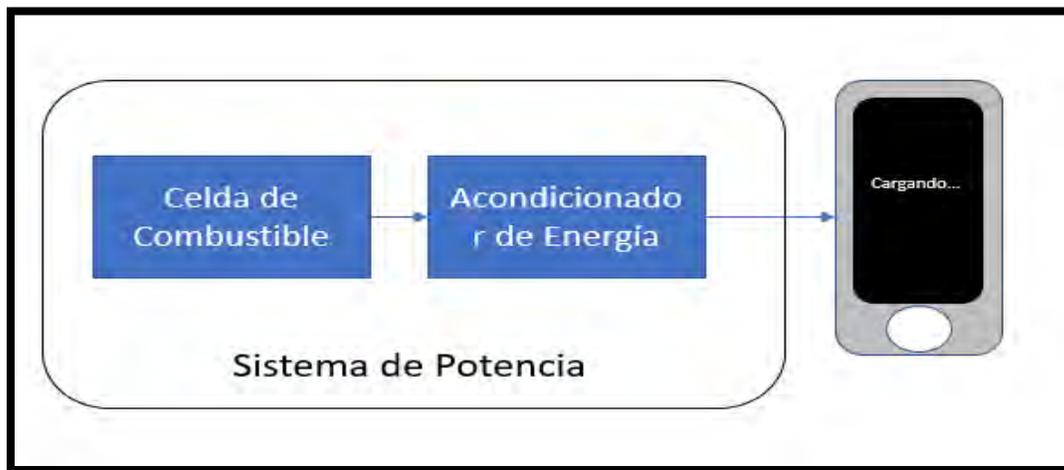


Figura 2.13. Esquema de potencia de una CC [25].

Las CC están principalmente enfocadas en dos categorías como se muestra en la Figura 2.14. La primera categoría engloba a los dispositivos que nos proporcionan energía fuera de casa como es el caso de las baterías portátiles para recargar

teléfonos celulares y otros dispositivos, lámparas de mano, sistemas de respaldo de energía cuando nos encontramos en la intemperie. La segunda categoría incluye a los dispositivos electrónicos como laptops, celulares, GPS, radios, etc. es decir cualquier dispositivo que necesita una batería para funcionar. Por su modularidad y la alta densidad de energía, las CC son una opción viable para este tipo de aplicaciones [26].

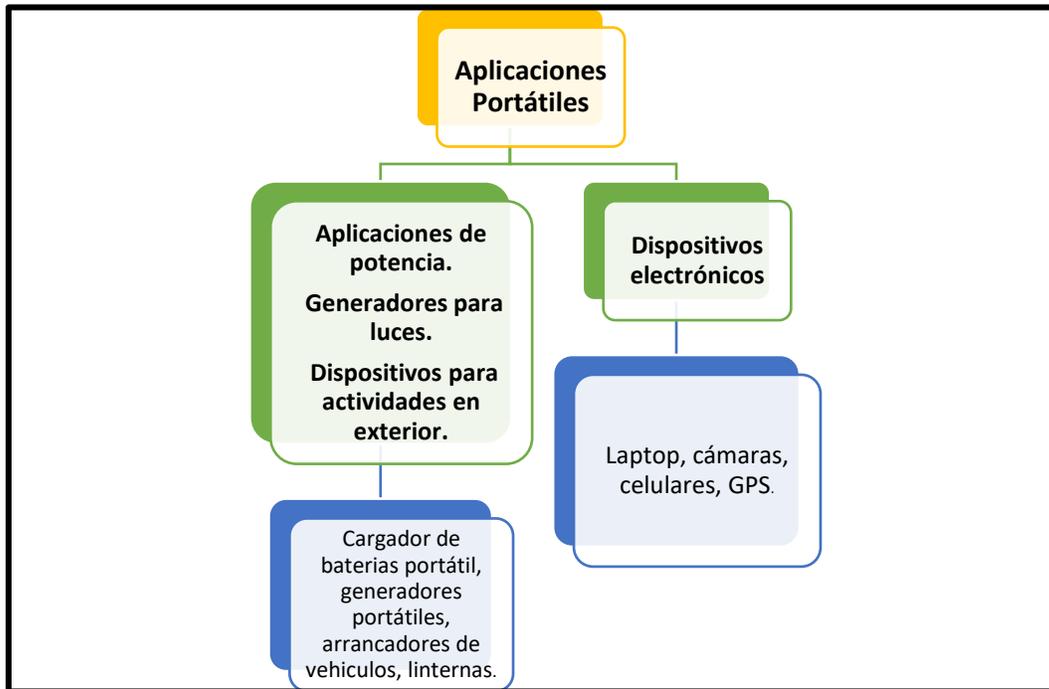


Figura 2.14. Clasificación de aplicación de las CC [26].

Los dispositivos de energía portátil de fácil recarga son importantes para los dispositivos electrónicos enfocados en los respaldos de energía.

Es necesario revisar que condiciones requiere cada aplicación de una CC para elegir la adecuada.

Para aplicaciones como las unidades de poder auxiliares (APU) que requieren operar a alta temperatura es recomendable utilizar las CC de alcohol [27].

Una ventaja que poseen las celdas de combustible frente a las “tradicionales” baterías de ion litio, es que no poseen un ciclo de carga y descarga, además frente

a otros tipos de baterías, las CC pueden operar a bajo nivel de capacidad, en otras palabras, con carga eléctrica muy baja sin ser dañadas [28].

Si se compara una CC con una batería, se encuentran varias ventajas, entre ellas, es la ausencia de “memoria” que tiene una batería tradicional cuando es recargada. Tienen una mejor aplicación en sistemas pequeños por no reducir su capacidad por la degradación al ser usada.

Una PEMFC es ideal para aplicaciones portátiles gracias a su baja temperatura de operación.

Actualmente se pueden encontrar dispositivos en el mercado que utilizan una CC como batería. Un ejemplo es un cargador portátil llamado Intelligent Energy’s Upp 5W que se muestra en la figura 2.15, fue lanzado a finales del 2013. Utiliza una CC, la compañía ha vendido más de 50,000 unidades [29].



Figura 2.15. Cargador portátil a base de una CC [29].

Para que una CC sea aprovechada totalmente se requiere administrar su energía con un acondicionador de energía, que provea de alta eficiencia y sea capaz de mantener una tensión nominal que puede ser superior, igual o inferior a la tensión de salida de la CC.

Los convertidores Buck (reductor) y boost (elevador) son convertidores de potencia comúnmente son usados en aplicaciones portátiles por su buena eficiencia y bajo costo, pero tienen un problema, generan alto nivel de ruido por conmutación. Algunos convertidores no son recomendados para aplicaciones portátiles (solo de baja tensión), debido a que requieren un transformador para ser aislados, lo que provoca un incremento de tamaño en el circuito integrado (CI), aumento de peso considerable, aumento en el costo de fabricación y su eficiencia es baja [25]. Otra opción que se puede implementar para poder aprovechar niveles de tensión bajos es incorporar supercapacitores al convertidor boost.

Algunos dispositivos que requieren niveles de tensión estables conforme la demanda de corriente se incrementa debido a que algunos son dispositivos sensibles a la variación de tensión, entre ellos la aplicación médica por ejemplo el marcapasos donde es de vital importancia que dichos sistemas carezcan o sean nulas las fallas.

Es importante saber que los dispositivos portátiles pueden requerir desde  $\mu\text{W}$  hasta  $\text{W}$ , por ejemplo, la tabla 2.3 muestra algunos dispositivos y sus características.

Tabla 2.3. Propiedades eléctricas de dispositivos portátiles [29].

Clase	Dispositivo	Requerimientos de potencia	Densidad potencia (Wh /l)	Autonomía
Implante médico	Marcapasos	25 $\mu\text{J}$ /pulso	300	5-7 Años
Implante Médico	Audífono de ayuda	5 mA + 15 mA por pulso (100 ms)	1260	300 hrs.
Electrónico portátil	Teléfono inteligente	2 W	600	6 hrs.
Electrónico portátil	Laptop	40 W	235	6 hrs.

Electrónico portátil	Videocámara	7 W	270	1 hr.
Juguetes	Aeroplano	110 W/kg	15	0.3 hrs.

En la actualidad, ya han sido desarrollados sistemas de PEMFC portátiles. Algunas soluciones consisten en dos convertidores Boost para elevar la tensión a 5 V, mientras que el otro convertidor lo eleva a 12 V. En esta configuración, el convertidor de 5 V se encarga de proveer voltaje a la carga en la salida, provee al segundo convertidor, al controlador del ventilador y así misma después de arrancar. El segundo convertidor además de otorgar potencia a la carga proporciona energía a los ventiladores que suministran aire al sistema [31]. En la figura 2.16 se muestra un esquema general del sistema y se muestra operando en la figura 2.17.

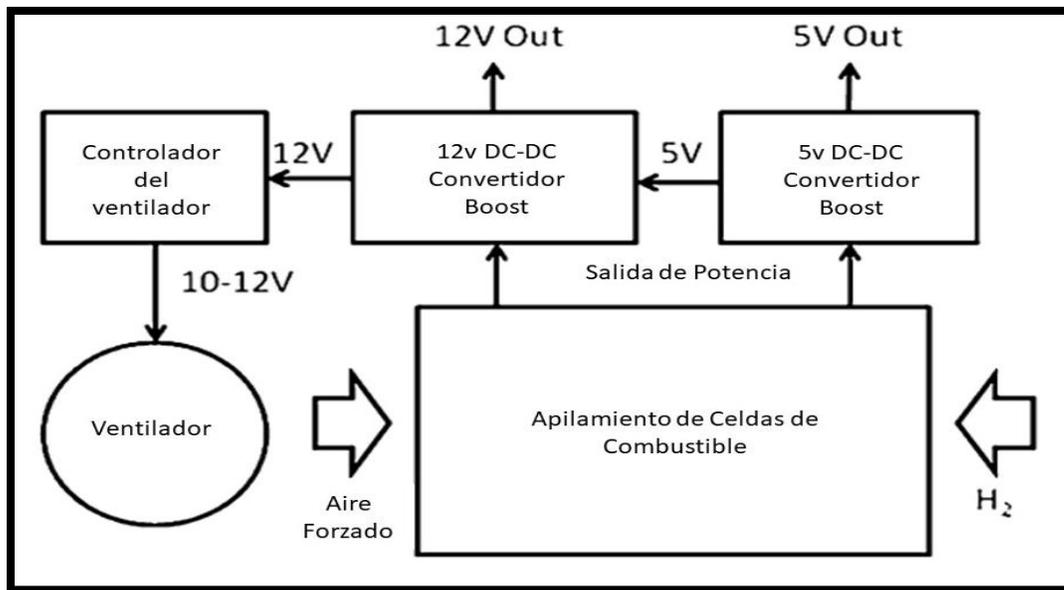


Figura 2.16. Esquema general del sistema [30].

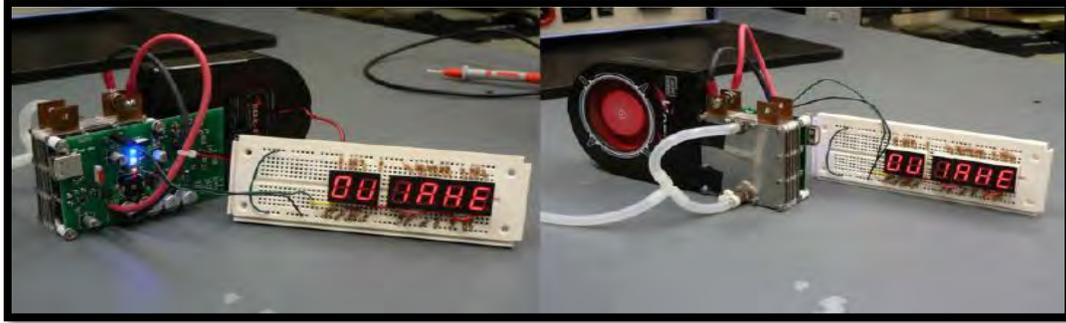


Figura 2.17. Sistema de CC en funcionamiento alimentando una carga electrónica [30].

Otro ejemplo es el prototipo que desarrollo J.J. Brey, et al [24], que reúne características como pequeños componentes para ser aplicado en sistemas portátiles, sin dejar atrás la eficiencia para aprovechar al máximo el combustible suministrado. La potencia que se suministra es de 100 W nominales, corriente de 13.3 A nominal con un rizo de corriente debajo del 2% de la corriente de entrada. El esquema del convertidor es mostrado en la Figura 2.18, en donde se muestra un esquema general del sistema. El convertidor final se muestra en la Figura 2.19.

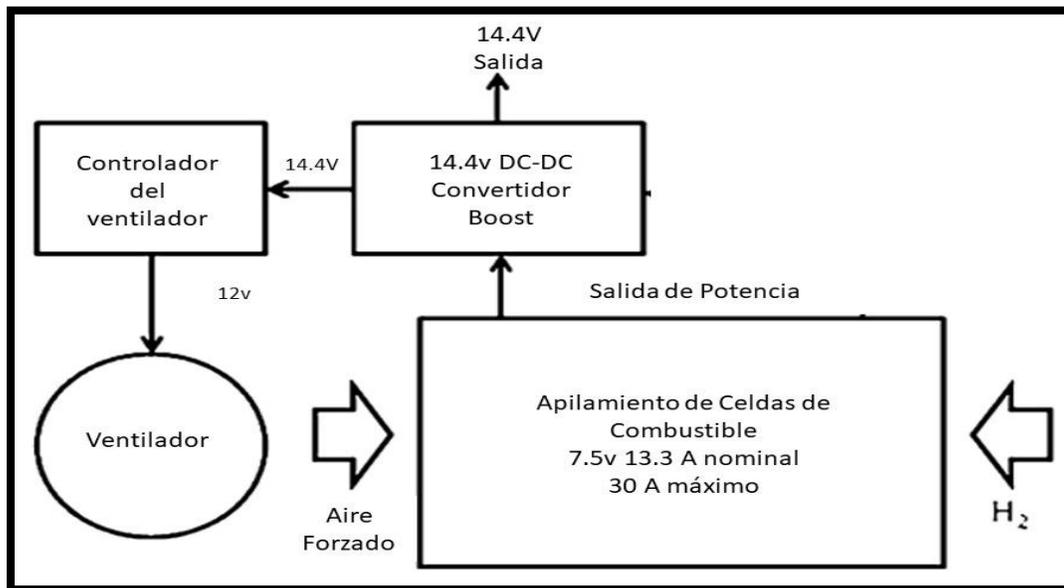


Figura 2.18. Esquema general del sistema.

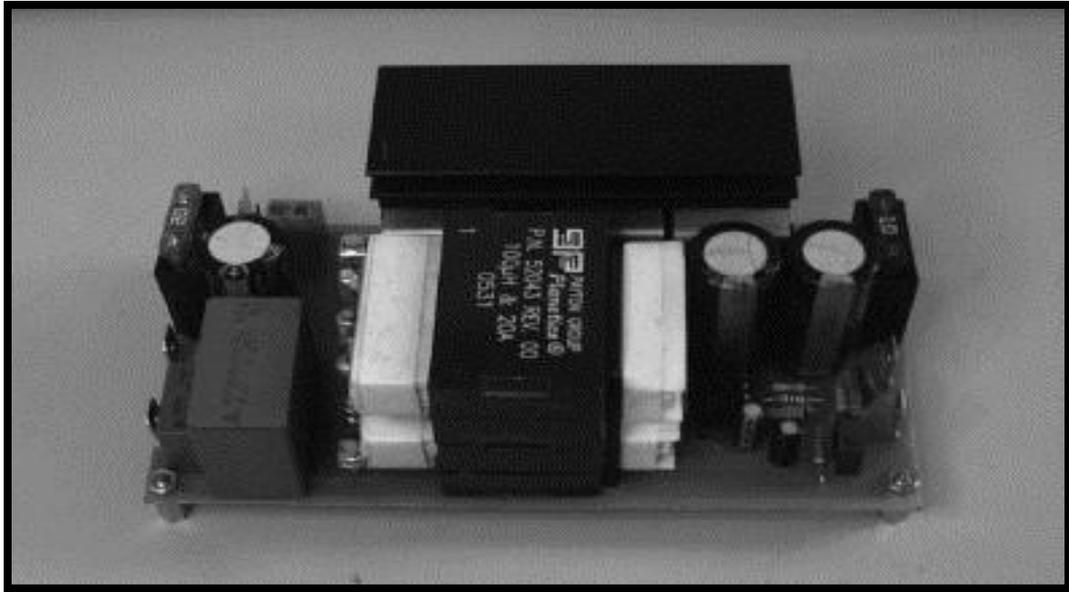


Figura 2.19. Convertidor elevador de 100 W para aplicaciones portátiles [24].

## **Capítulo 3. Estudio de convertidores de potencia y selección de la topología.**

### **3.1. Acondicionamiento de potencia.**

El interés en los acondicionadores de potencia ha ido creciendo en la industria, ya que es una opción eficiente en la aplicación de media/alta potencia. Los acondicionadores de potencia han avanzado de manera efectiva en la industria y, por lo tanto, pueden tenerse en cuenta como una tecnología madura y demostrada. Su aplicación es variada, puede ser utilizado en CC, sistemas fotovoltaicos, generadores eólicos, vehículos eléctricos, sistemas de poder, alimentación de telecomunicaciones, instrumentos de barcos entre otros [32].

En aplicaciones de CC de combustible portátil, el acondicionador de energía tiene un trabajo muy importante para siempre tener el valor de tensión deseado.

Por si solas, las CC tiene una baja tensión de salida (0.6 V aprox. a carga máxima), por lo tanto, se requiere de un apilamiento de CC en serie para incrementar el voltaje. Sin embargo, este apilamiento requiere sistemas de control más complejos. También, la tensión de salida de la CC disminuye a medida que la demanda de la carga aumenta, por tal motivo se requiere regular la tensión de salida al valor deseado mediante un acondicionador de energía [25].

#### **3.1.1. Convertidores CD-CD**

Un convertidor CD-CD, es descrito de manera general como un circuito en cuyo puerto de entrada se extrae energía de una fuente primaria (CC, batería, módulo FV) para suministrarla a una cierta carga en el puerto de salida según sea los requerimientos.

El convertidor CD-CD realiza la transformación de la energía de entrada en forma de tensión no regulada (variable, muy baja o muy alta)  $V_{in}$ , en energía de salida en forma de tensión regulada  $V_{out}$ . Se consigue la regulación reduciendo el error de

tensión de la salida con respecto a un valor de tensión deseado mediante un controlador cuya salida constituye la entrada de control  $V_c$  de un modulador de ancho de pulso (PWM) configurado para un ciclo de trabajo adecuado para alcanzar las características propuestas del convertidor [33].

### 3.1.1.1. Convertidor elevador (Boost)

Un convertidor elevador, llamado también convertidor Boost (CB), es un dispositivo que tiene una tensión de entrada menor a la tensión de salida utilizando componentes básicos como un inductor, diodo, capacitor y un interruptor. Este convertidor puede elevar la tensión de salida sin un transformador. Como el convertidor boost tiene un solo transistor, tiene alta eficiencia. La corriente de entrada es continua. Sin embargo, por el transistor de potencia debe pasar un gran pico de corriente. La tensión de salida es muy sensible a los cambios de ciclo de trabajo  $k$  y podría ser difícil estabilizar el regulador [33].

La operación del convertidor boost se basa en el circuito mostrado en la Figura 3.1, donde se encuentran elementos básicos como un interruptor, diodo, capacitor, y un inductor.

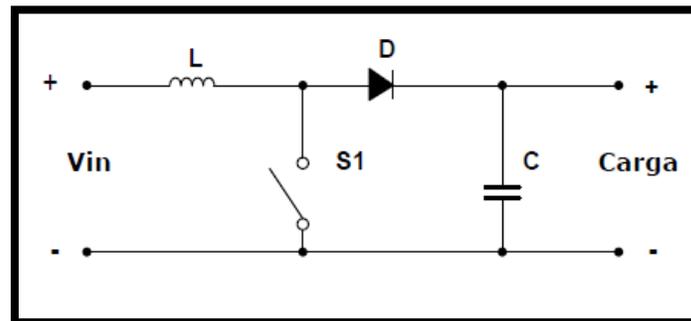


Figura 3.1. Circuito de un convertidor elevador [33].

El funcionamiento del circuito se puede dividir en dos modos. El modo 1 comienza cuando se cierra el interruptor  $s_1$  cuando  $t=0$ . La corriente de entrada, pasa por el inductor  $L$  y el interruptor  $S_1$  Figura 3.2a. Durante este modo el inductor almacena energía. El modo 2 comienza cuando el interruptor  $S_2$  se abre cuando  $t = t_1$ . La corriente que pasaba por el interruptor  $s_1$  ahora pasa por el inductor  $L$ , el capacitor

C, la carga y el diodo D. La corriente el inductor disminuye hasta que se cierra de nuevo el interruptor, en el ciclo siguiente. La energía almacenada en el inductor L pasa a la carga Figura 3.2b [33].

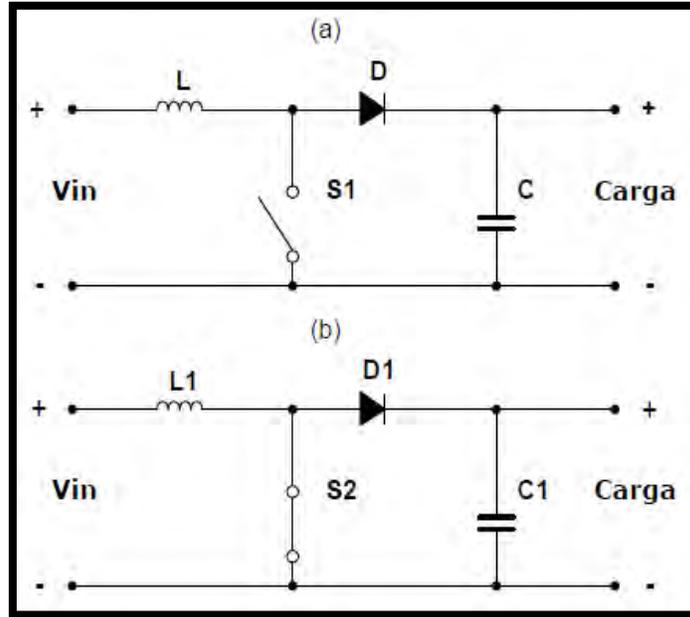


Figura 3.2. (a) Modo 1 en funcionamiento del circuito. (b) Modo 2 en funcionamiento del circuito [33].

El convertidor boost tiene dos modos de operación dependiendo de la forma de onda de corriente del inductor. Estos modos se les llama conducción continua o conducción discontinua.

En la conducción continua la corriente del inductor es mayor a cero todo el tiempo, en cambio, en la conducción descontinua la corriente del inductor cae a cero después de cada ciclo de interrupción [24].

El cálculo de la tensión de salida se determina mediante (11).

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (11)$$

Donde  $D$  es el ciclo de trabajo,  $V_{out}$  es la tensión de salida del convertidor y  $V_{in}$  es la tensión de entrada (fuente) del convertidor.

La corriente promedio de salida  $I_O$  con base a la potencia de salida propuesta del convertidor, se muestra en (12).

$$P = V_{out} * I_O \quad (12)$$

Donde P es la potencia propuesta del convertidor, y donde  $I_O$  es la corriente de salida del convertidor. Si despejamos  $I_O$  de (12) podemos obtener la expresión de corriente promedio de salida mostrada en (13).

$$I_O = \frac{P}{V_{out}} \quad (13)$$

Con base en (13) la corriente de entrada del convertidor es descrita por (14).

$$I_{in} = \frac{I_O}{1-D} \quad (14)$$

Donde  $I_{in}$  es la corriente calculada a la entrada del convertidor.

Con la finalidad de dimensionar los componentes del convertidor, es necesario definir un rizado de corriente en el inductor y el cual se establece a partir de (15).

$$\Delta I = I_{in} * \% \quad (15)$$

Donde % es el porcentaje deseado para el rizo de corriente en el inductor. La relación del rizado de corriente deseado con el valor del inductor del convertidor es descrita por (16).

$$\Delta I = \frac{V_{out} * D}{f * l} \quad (16)$$

Donde l es el valor de inductor. Despejado el valor de l de (16) obtenemos (17).

$$l = \frac{V_{out} * D}{f * \Delta I} \quad (17)$$

Para calcular el valor del capacitor, se propone un porcentaje de rizado de tensión  $\Delta V$ . Para calcular dicho valor se utiliza (17)

$$\frac{\Delta V}{V_{out}} = 0.01 \quad (19)$$

Despejando de (19) obtenemos (20).

$$\Delta V = 0.01 * V_{out} \quad (20)$$

Se utiliza la expresión (21) para obtener el valor del capacitor de salida.

$$C = \frac{I_O * D}{\Delta V * f} \quad (21)$$

Es importante realizar los cálculos de los componentes del convertidor boost tomando en cuenta el comportamiento de la fuente de entrada. Es recomendable establecer un rango de operación de la fuente de entrada para realizar los cálculos en los límites del rango. El valor del inductor cambiará debido a que la corriente de entrada se verá afectada. Es recomendable utilizar el de mayor tamaño. Por otro lado, el capacitor se mantiene debido a que la tensión de salida será la misma que se propuso.

Teóricamente, el convertidor boost tiene una relación de conversión alta, ya que de acuerdo con (11) pueden proporcionar valores de tensión infinitos, sin embargo, en la realidad están limitados por limitaciones físicas. Además, al operar el convertidor a ciclos de trabajos muy altos genera problemas como una corriente alta de rizado, esfuerzos muy altos del dispositivo, mayores pérdidas de conducción y por lo tanto reducción drástica de la eficiencia. Existen soluciones para mitigar dicho problema, una de ellas consiste en la conexión de dos CB en cascada [35].

#### 3.1.1.2. Supercapacitores

El supercapacitor es un capacitor electroquímico con valores de capacitancia en Faradios. Los supercapacitores tienen características tanto de un capacitor tradicional como de las baterías electroquímicas. Una fotografía de un capacitor de 500 F y 2.7 v, es mostrado en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Fotografía de una Supercapacitor.

La diferencia entre las baterías electroquímicas y el supercapacitor, es que no existe una reacción química dentro de ellos. Esto aumenta el número de ciclos entre carga y descarga.

En el supercapacitor, la relación energía/volumen es mucho mayor que en un capacitor tradicional lo cual puede llegar a 5Wh/kg y algunas veces alcanzar 15Wh/Kg [35].

El costo de estos dispositivos es alto, pero el tiempo de descarga es mayor. Para analizar profundamente podemos basarnos en sus ventajas y desventajas que se enlistan en la tabla 3.1.

Los costos en México son de aproximadamente \$220 MXN por unidad, con características de 500F a una tensión de 2.7v.

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas del supercapacitor como almacenaje de energía [35].

**Ventajas**

**Desventajas**

- Capacidad para mas ciclo de carga y descarga que una batería recargable tradicional.
- Relación energía/volumen mayor a baterías.
- Tiempo de descarga prolongado (dependiendo de la capacidad)
- Su eficiencia de almacenamiento tiene como un máximo de 95%.
- Debido a sus prestaciones puede ser utilizado en aplicaciones portátiles.
- Tiempo de vida prolongado, entre 8-10 años.
- Tensión por unidad baja (2.5-3v en unidades con 1500F).
- Alto costo por unidad.
- Tiene un 5% de descarga por día teniendo así que usar de manera rápida la energía almacenada.

De manera general para entender exactamente por qué los supercapacitores son diferentes a uno común, es útil considerar el capacitor clásico como un dispositivo para almacenamiento de carga eléctrica. La capacidad máxima expresada en faradios de un capacitor clásico no alcanza ni siquiera el 1F cosa que en un supercapacitor lo supera sin problemas algunos pueden llegar a tener valores de cientos o miles de Faradios [36].

Se puede realizar una comparación entre los supercapacitores y las baterías de Ion Litio que usualmente utilizan los teléfonos celulares por mencionar algún dispositivo. Comparar estas tecnologías nos puede proporcionar una idea de costo-beneficio para aplicaciones portátiles y estacionarias. La comparación se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comparación de los supercapacitores vs tecnología Ion Litio [37].

Función	Supercapacitores	Ion Litio
<b>Tiempo de recarga</b>	1 – 10 Segundos	10-60 minutos
<b>Ciclo de vida</b>	30,000 hrs	500 o mayor
<b>Tensión por unidad</b>	2.3 a 3v	3.6v
<b>Energía que Almacena (Wh/Kg)</b>	5	120 - 240
<b>Potencia (W/Kg)</b>	Arriba de 10,000	1000 - 3000
<b>Costo por kwh</b>	\$10,000 Dólares	\$250 – 1000 Dólares
<b>Temperatura durante recarga</b>	-40 a 65°C	0 a 45° C
<b>Temperatura durante descarga</b>	-40 A 65°C	-20 a 60°C

Las aplicaciones del supercapacitor son múltiples tal y como el de una batería, sin embargo, se debe tener en cuenta que su energía almacenada debe ser usada de manera rápida debido a su rápida descarga por día como se mencionó anteriormente. Algunas aplicaciones son mencionadas en la Tabla 3.3.

La capacitancia equivalente que se obtiene en conexión en serie se determina de forma similar a un capacitor tradicional como se muestra en (22).

$$C = \frac{C_{unidad}}{n} \quad (22)$$

Donde  $n$  es el número de capacitores conectados y  $C_{unidad}$  es la capacitancia de cada unidad.

Para saber el valor de la capacitancia en serie basta con multiplicar la capacitancia por unidad y el número de unidades conectadas como en (23).

$$C = C_{unidad} * n \quad (23)$$

3.1.1.3. Cálculo de Capacitancia en Supercapacitores.

Para saber que capacitancia necesitamos en nuestra aplicación podemos basarnos de la Figura 3.4.

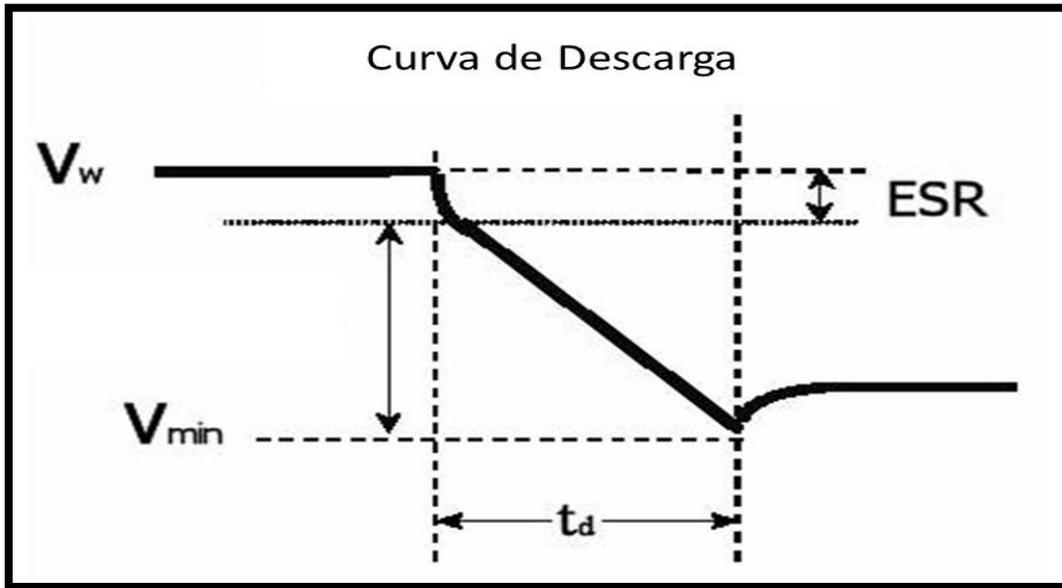


Figura 3.4. Curva de descarga de un supercapacitor.

Para saber la caída total de tensión entre  $V_w$  y  $V_{min}$  se utiliza la expresión (24).

$$DV_{Total} = \frac{i * td}{C} + i * ESR \quad (24)$$

Donde  $i$  es la corriente que suministra el capacitor al ser descargado,  $C$  es la capacitancia del supercapacitor,  $td$  es el tiempo en segundos para descargar el capacitor de  $V_w$  a  $V_{min}$  como se muestra en la Figura 3.4. El ESR es la resistencia serie equivalente también señalada en la Figura 3.4.

Para saber la capacitancia requerida podemos aplicar la ecuación (25).

$$C = \frac{i * td}{DV_{Total}} \quad (25)$$

Una vez obtenido la capacitancia requerida, podemos proceder a calcular cuántos supercapacitores necesitamos según la tensión requerida como se muestra en (26).

$$n = \frac{V_{max}}{V_{req}} \quad (26)$$

Donde  $n$  es el número de capacitores necesarios,  $V_{max}$  es la tensión máxima por unidad (suelen ser como máximo 3v) y  $V_{req}$  es la tensión requerida para la aplicación.

Entonces podemos calcular la capacitancia total como se muestra en (27).

$$C_{Total} = C * n \quad (27)$$

Con dichos valores obtenidos mediante los cálculos correspondientes se puede elegir un supercapacitor de la capacidad requerida o uno de mayor capacitancia según este disponible.

#### 3.1.1.4. Comparación de topologías de los convertidores de potencia.

Los convertidores mencionados son perfectos para la PEMFC, sin embargo, presentan ciertas ventajas uno frente a otro, por lo que se describen de manera resumida en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Comparativa entre diferentes topologías [33, 38, 39].

Boost	Boost con Supercapacitor
-------	--------------------------

- Eficiencia entre el 60% y 90%
- Pequeñas dimensiones
- Alta eficiencia
- Costo moderado
- Simplicidad de diseño
- Puede ser utilizado para aplicaciones portátiles.
- Carece de necesidad de mantenimiento.
- Dependiendo de los componentes utilizados, puede tener larga vida de operación.
- Mismas características que un boost tradicional.
- Cuenta con un sistema de almacenamiento (supercapacitor).
- Debido al almacenamiento de energía este permite otorgar una mayor corriente a la salida
- Costo más alto.
- Tiempo de recarga relativamente mayor.
- Su eficiencia es mayor comparado con sistemas de almacenamiento tradicionales (baterías, volantes de inercia, etc) ronda el 93% entre ciclo de carga y descarga.
- No necesita mantenimiento y su vida de operación es extensa.

La tabla 3.1 contiene características principales o esenciales de cada convertidor.

El convertidor adecuado debe ser elegido con base al costo moderado, alta eficiencia y el menor espacio disponible.

#### 3.1.1.5. Aplicaciones de los convertidores CD-CD.

Los convertidores CD-CD se basan principalmente en conmutaciones de dispositivos semiconductores de potencia. Los convertidores han encontrado un

firme lugar en la tecnología moderna y se usa en un sin número de dispositivos como por ejemplo los mostrados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Aplicaciones de los convertidores CD-CD [34].

Aplicaciones	
Puertas de cochera	Ignición electrónica
Puertas eléctricas	Horno
Aceleradores de partículas	Lavadoras
Accionamientos de motor	Licadoras
Acondicionamiento de aire	Máquinas de coser
Alarmas	Molinos
Alarmas antirrobo	Aplicaciones de minería
Amplificadores de audio	Semáforos
Amplificadores RF	Reguladores
Arranques de turbinas de gas	Refrigeradores
Arranques de máquinas síncronas	Relevadores en general
Aspiradoras	Ventiladores
Circuitos de TV	Trenes
Elevadores	Imprentas
Bombas de agua	Imanes
Controles de hornos	Relojes
Cargador de baterías	Smartphones
Automóviles	Laptops

### 3.2. Rizado de Corriente de entrada.

Uno de los puntos importantes para el diseño de un convertidor CD-CD es conocer cuánto rizo de corriente puede ser inyectado a la CC sin degradar su rendimiento. Si se define demasiado alto el valor del rizado de corriente esta puede generar EMI (o también llamado interferencia electromagnética) lo que causa reducción en el

rendimiento del sistema y un valor demasiado bajo puede causar inestabilidad en el controlador. Una regla que siguen varios autores es asignar un valor que se encuentre entre el 20 al 40% de la corriente de entrada [39] mientras que otros recomiendan no exceder el 2% de la corriente nominal de entrada [25]. Uno de los efectos del rizo de corriente en algunos prototipos se refleja en el consumo de hidrógeno [24], como el mostrado en la Figura 3.5.

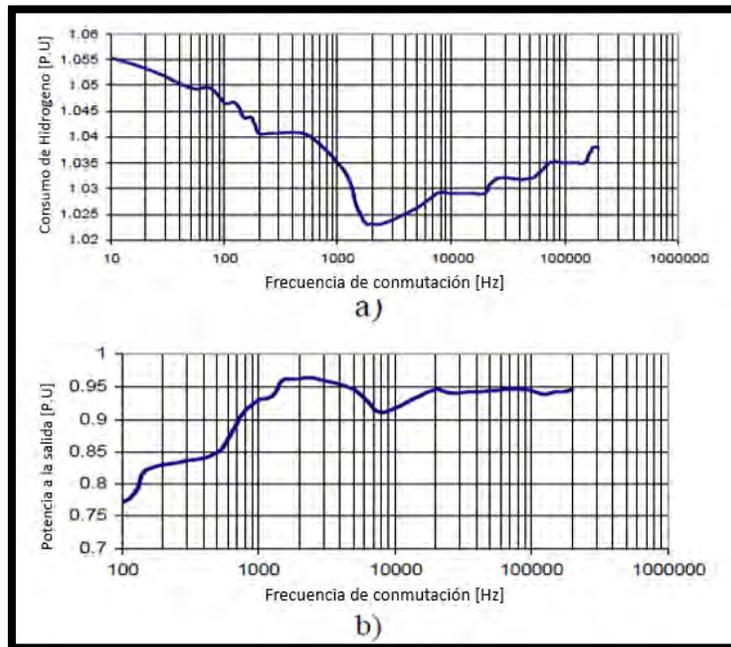


Figura 3.5. El consumo de hidrógeno (a) y la potencia de salida (b) para una celda de combustible de 20 W en función de la frecuencia del rizo de carga [24].

Es importante definir el valor correcto para el rizado para extender la vida útil de la CC, y también incrementar la eficiencia, reduciendo el consumo de hidrógeno a un punto óptimo. La figura 3.5 otorga una idea para elegir de manera correcta la frecuencia de conmutación, este puede hacerse tomando en cuenta parámetros básicos como potencia de salida y la frecuencia de conmutación en el convertidor boost.

## **Capítulo 4. Diseño, simulación y Selección de topología.**

#### 4.1. Pruebas y parámetros de Apilamiento de CC.

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas experimentales para determinar los parámetros del apilamiento de celdas de combustible disponible para realizar las pruebas pertinentes sobre el acondicionador de energía. El apilamiento o stack de CC evaluado se muestra en la Figura 4.1.

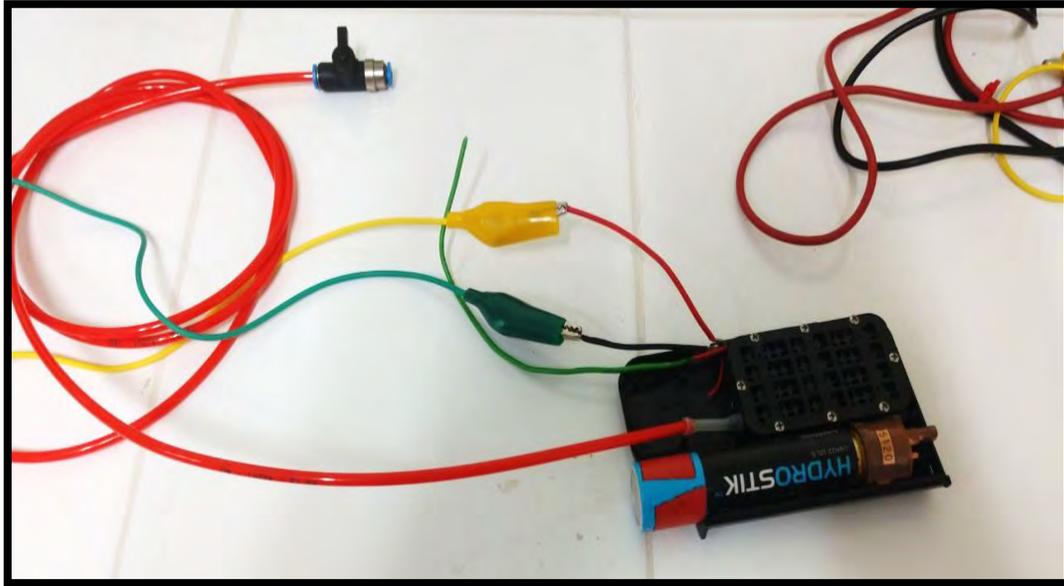


Figura 4.1. CC de combustible utilizada para pruebas.

El equipo utilizado es una carga electrónica DC programable de la Marca BK Precisión modelo 8500. Una de las pruebas realizadas en la cual se conectó a la carga electrónica para poder obtener la curva de potencia cuando la celda está en operación se muestra en la Figura 4.2.

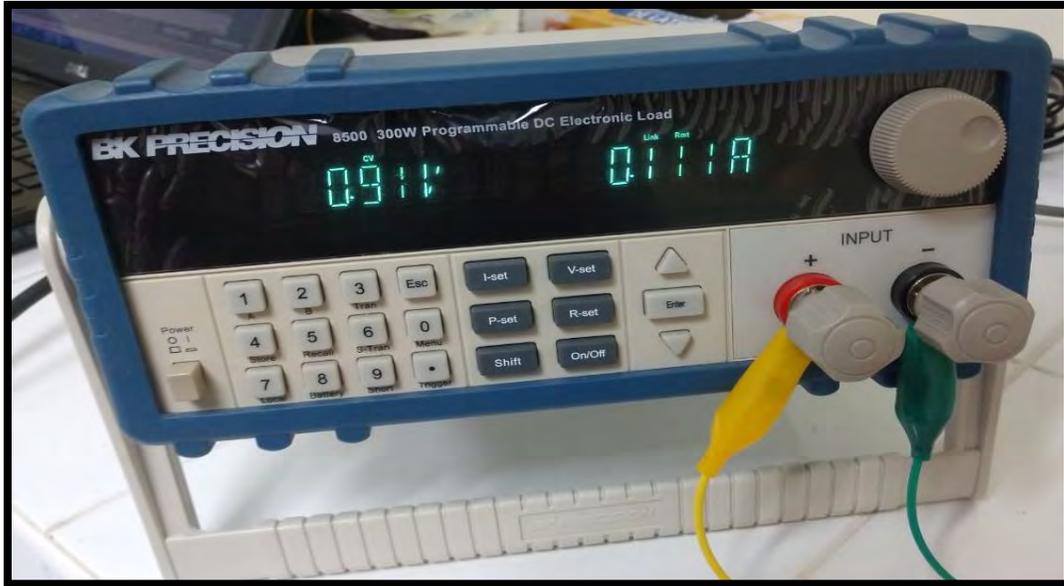


Figura 4.2. Equipo de pruebas y valor obtenido a circuito abierto de la CC.

Con los resultados obtenidos de las pruebas las cuales consistieron en ir variando la tensión en el equipo de pruebas. Esto nos proporcionó un consumo de corriente en el stack CC. Con base al procedimiento anterior se obtuvo la curva de polarización del stack de CC como se muestra la Figura 4.3. En la cual se observa que la corriente máxima del stack de CC es de 365 mA.

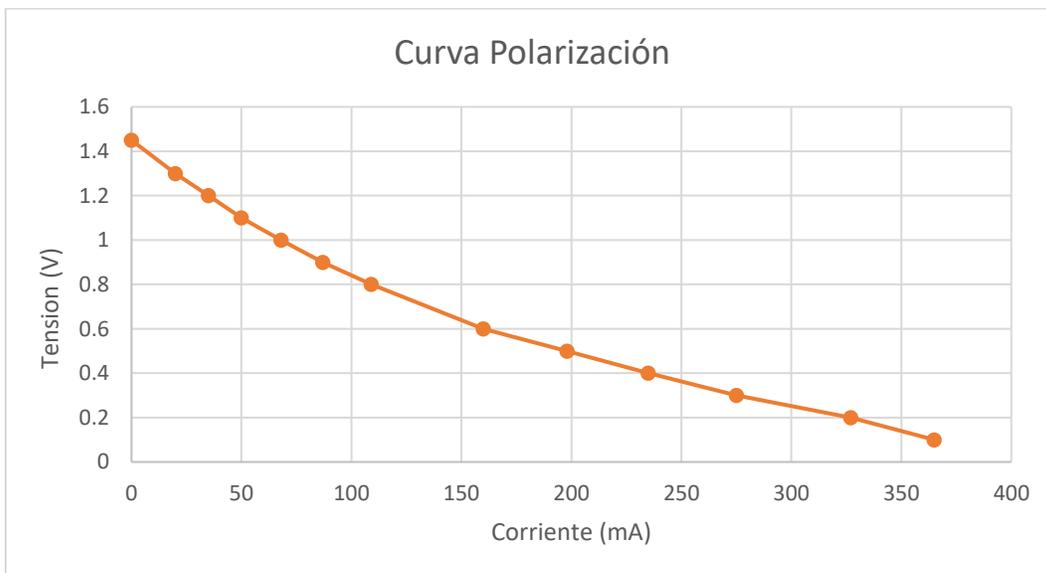


Figura 4.3. Curva de polarización del apilamiento de CC.

Una vez recopilado los datos correspondientes durante las pruebas se obtuvo una curva de potencia como se muestra en la Figura 4.4. En dicha curva se observa un punto de máxima potencia. La máxima potencia otorgada por la CC es de 99mW lo cual se presenta a 0.5v y 198 mA. Este punto es el apropiado para utilizar durante la operación del stack del CC para obtener la mayor cantidad de energía.

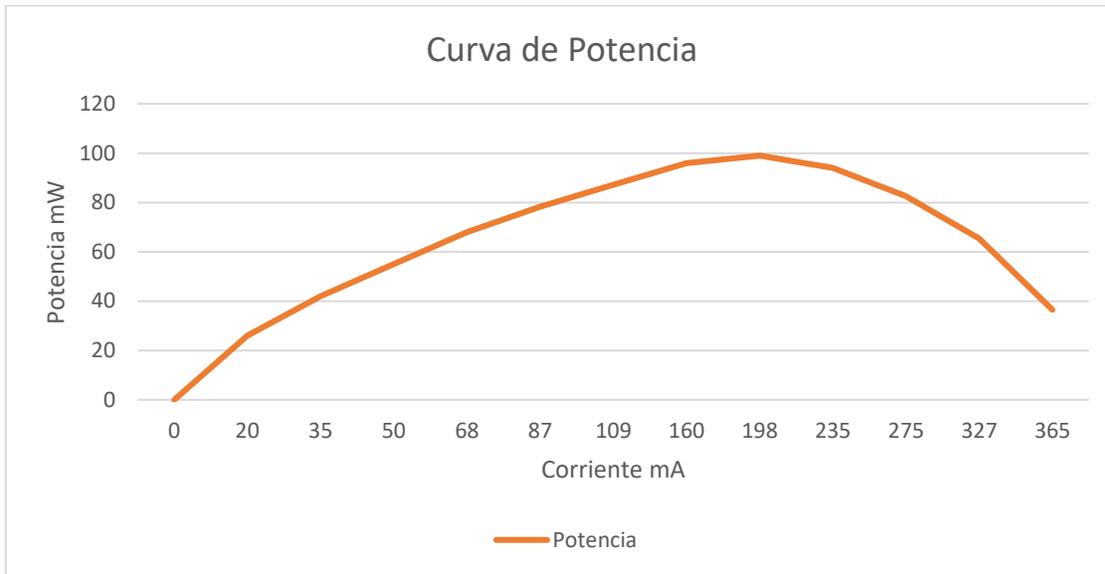


Figura 4.4. Curva de Potencia del apilamiento de CC.

De acuerdo con las características mencionadas y los parámetros del apilamiento de CC, se evaluó el convertidor Boost con un controlador LM2735 y un convertidor que emplea la topología boost utilizando super capacitores con un controlador LTC3108.

#### 4.2. Boost

Primero se diseñó y probó la topología BOOST mediante la simulación del circuito mostrado en el Figura 4.3 utilizando la herramienta que proporciona la compañía Texas Ins. llamada Webench® Designer [41] y el chip LM2735.

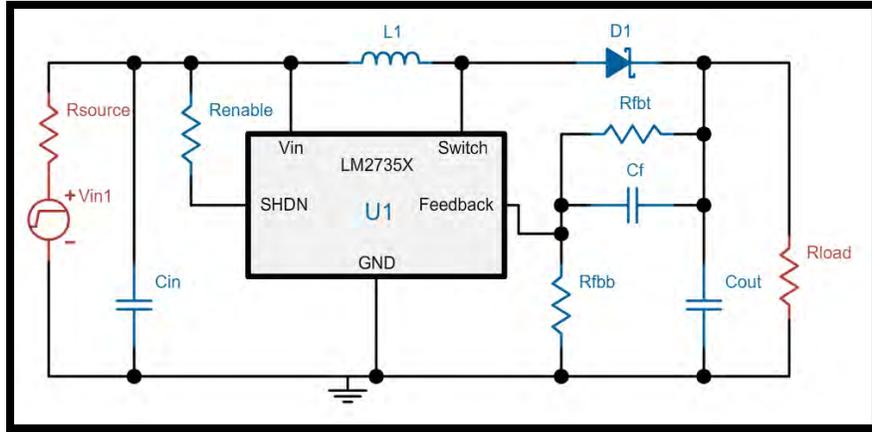


Figura 4.3. Topología del convertidor Boost evaluado.

Los componentes se seleccionaron con base a las tensiones de salida que además equilibraran el costo del dispositivo total sin sacrificar la eficiencia del dispositivo. Los dispositivos seleccionados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Componentes del circuito.

Nombre de Parte	Manufactura	Numero Parte	Propiedades
<b>Cf</b>	Kemet	C0805C152J5GACTU	1.5nF
<b>Cin</b>	MuRata	GRM188R61A335KE15D	3.3uF
<b>Cout</b>	MuRata	GRM188R60J106ME47D	10uF
<b>D1</b>	Fairchild Semiconductor	MBR1020VL	
<b>L1</b>	Bourns	SRN3015-4R7M	4.7uH
<b>Renable</b>	Vishay-Dale	CRCW040210K2FKED	10.2kOhm
<b>Rfbb</b>	Susumu Co Ltd	RR1220P-103-D	10kOhm
<b>Rfbt</b>	Yageo America	RC0603FR-0730KL	30kOhm
<b>U1</b>	Texas Instruments	LM2735XMF/NOPB	Driver

La simulación fue realizada en la plataforma antes mencionada y se obtuvieron valores a máxima potencia de salida con el valor de tensión menor en la entrada de

3V. En la Figura 4.4 se muestra el rizado de tensión de la salida y entrada del convertidor a su máxima potencia de operación.

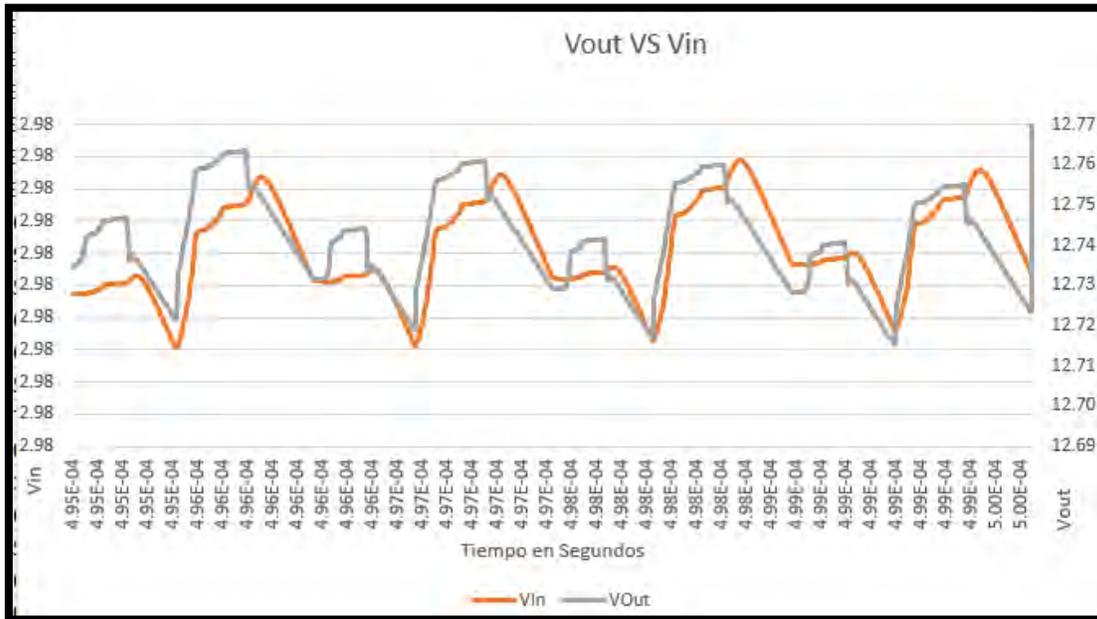


Figura 4.4. Rizo de tensión a la salida y a la entrada del convertidor en 5ms y su máxima potencia de salida de 4.7 W.

En la Figura 4.4 fue necesario utilizar un ciclo de trabajo de 68% con un rizo de tensión a la salida de 40mV.

Se obtuvieron resultados de eficiencia para tres valores de tensión de entrada distintos y a diferente corriente de salida como máximo 300 mA. Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 4.5.

Algunos parámetros del convertidor boost con el controlador LM2735 son mostrados en la tabla 4.2

Tabla 4.2. Parámetros del convertidor Boost con LM2735

Parámetro	Valor
Tensión de Salida	12v
Corriente Max.	300mA
Frecuencia Conmutación	1.6 MHz

<b>Tensión Entrada Min.</b>	2.7 v
<b>Tensión Entrada Max.</b>	5.5v

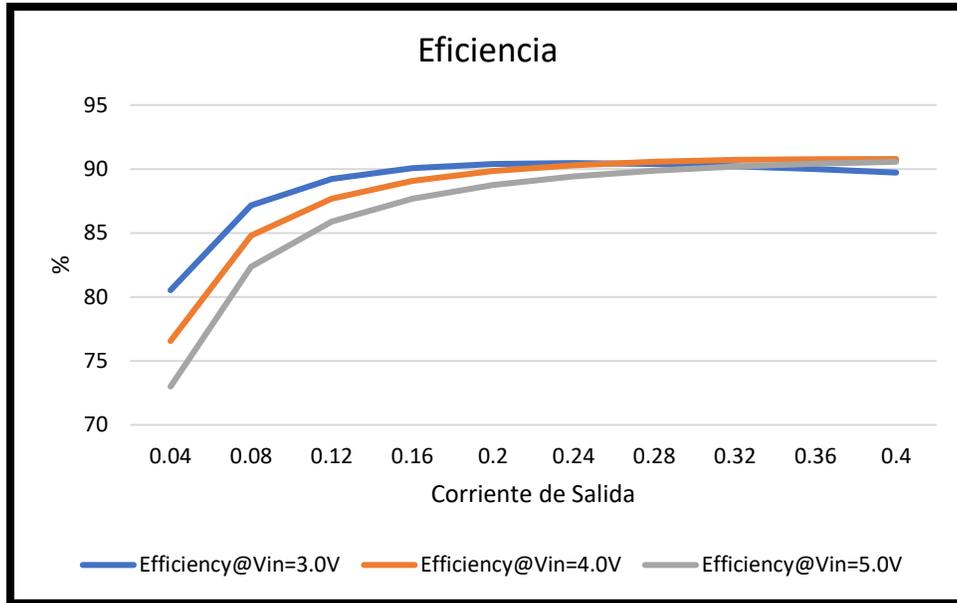


Figura 4.5. Eficiencia obtenida con diferentes valores de tensión de entrada y corriente de salida.

Otro aspecto importante del comportamiento del convertidor boost para analizar es el ciclo de trabajo debido a que si este es mucho mayor implica en un trabajo mayor por el convertidor para alcanzar el objetivo final de tensión, este es mostrado en la Figura 4.6.



simulado con una fuente igual a la topología anterior. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Parámetros de operación.

Parámetro	Valor
Tensión de Salida	5v
Corriente Max.	50mA
Frecuencia Conmutación	100kHz
Tensión Entrada Min.	20 mV
Tensión Entrada Max.	3v

La simulación del circuito con parámetros de 3v de entrada lineal y de 5v de salida, se obtuvo que se necesitan 176ms aproximadamente para alcanzar la tensión de salida debido a que se requiere recargar los supercapacitores. La figura 4.8 muestra el proceso para alcanzar la tensión deseada.

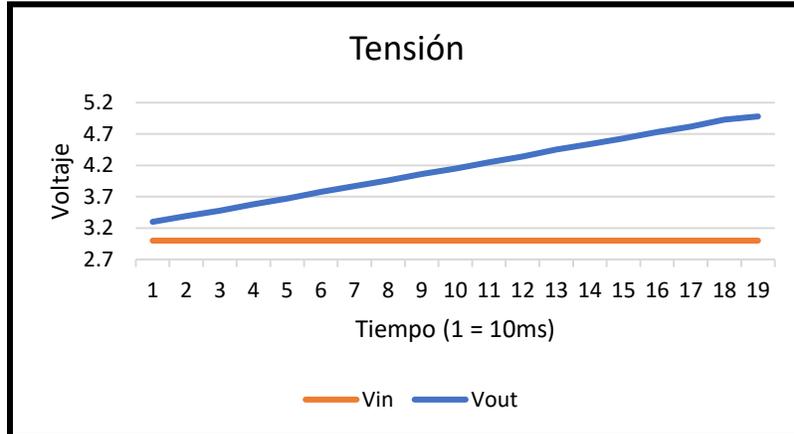


Figura 4.8. Comportamiento del módulo simulado.

La eficiencia obtenida en el convertidor simulado alcanza como máximo un 80% y ciertamente muy poco variable con un mínimo de 70% de eficiencia, con una carga de corriente de 400mA máxima igual que el convertidor anterior. La curva de eficiencia se muestra en la Figura 4.9.

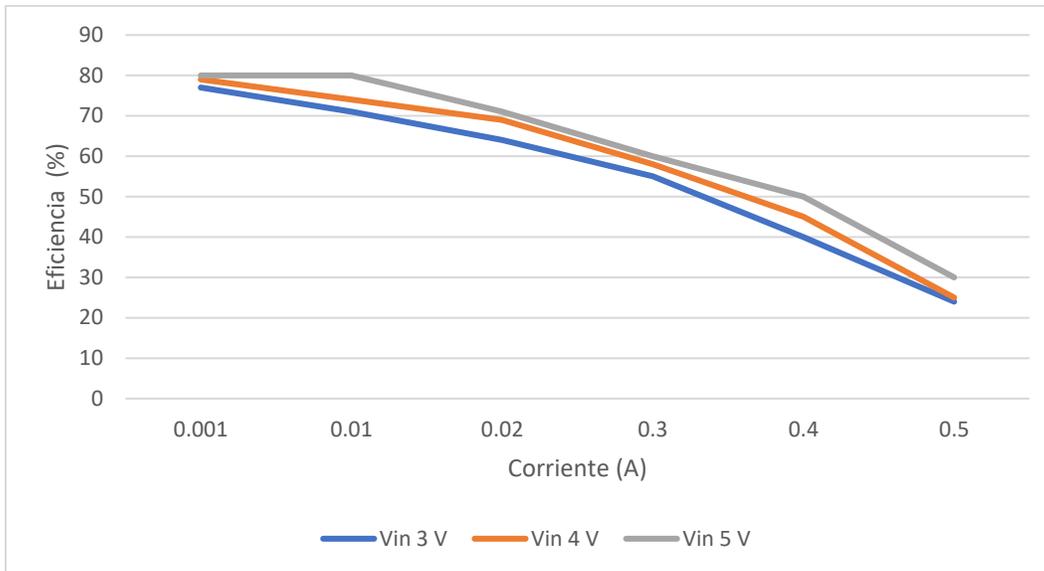


Figura 4.8. Curva eficiencia del módulo.

Debido a los datos obtenidos en la simulación se procedió a evaluar de manera experimental al convertidor boost que involucra el controlador LM2735 de Texas Ins. Finalmente se seleccionó este convertidor por sus prestaciones entre ellos su mayor tensión con una buena eficiencia.

## **Capítulo 5. Pruebas experimentales del convertidor seleccionado.**

Para comprobar los resultados obtenidos en simulación del convertidor boost, se sometió a las mismas condiciones de simulación a la tarjeta experimental mostrada en la Figura 5.1.



Figura 5.1. Tarjeta de Prueba del LM2735.

El equipo utilizado para las pruebas del modulo esta descrito en la Tabla 5.1. Se muestran las conexiones del modulo a la carga resistiva en la Figura 5.2.

Tabla 5.1. Equipo de laboratorio utilizado para la evaluación.

Equipo	Marca
Fuente de Poder DC regulada 1621A	BK Precision
Osciloscopio TDS 1001B 40 MHz	Tektronix
Puntas 10x	Tektronix
Multímetro 420	Extech

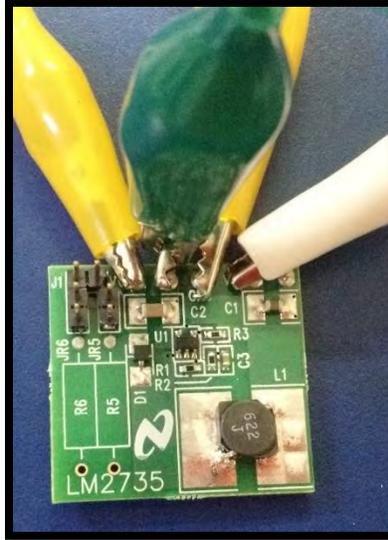


Figura 5.2. Conexiones al módulo, y muestra de funcionamiento.

Para iniciar las pruebas se definieron valores de tensión de entrada iguales a los usados en la simulación. El convertidor se sometió a condiciones críticas, es decir, se suministraron 3 volts para observar su comportamiento cuando se le demanda una mayor corriente. Debido a la ley de conversión de energía, el convertidor es incapaz de alcanzar 300mA a la salida reduciendo por este motivo a 150mA como su máxima corriente a suministrar. Se obtuvo una eficiencia máxima de 64%. Esta prueba nos da una idea para cuando el dispositivo (incluyendo la CC tipo PEM) este por quedarse sin suministro de hidrogeno el resultado es mostrado en la Figura 5.3.

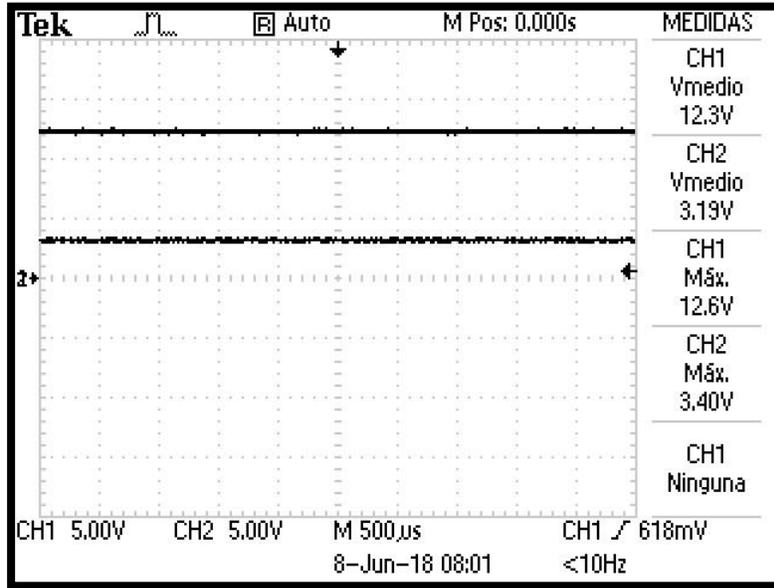


Figura 5.3. Tensión de salida y entrada, para una corriente de 150mA.

Los resultados de las pruebas son descritos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Resultados obtenidos mediante las pruebas previstas en el simulador.

Tensión de Entrada (V)	de Corriente de Entrada (mA)	Tensión de Salida (V)	Corriente de Salida (mA)
3	283	12.2	50
4	200	12.2	50
5	154	12.2	50
2.26	702	12	102
3.55	405	12.2	104
4.64	305	12.2	104
2.15	815	12.2	125
3.31	656	12.2	153
4.5	462	12.2	153
2.27	1.182	11.9	162
3.67	781	12.2	205
4.55	606	12.2	205

4.7	0.711	12.1	248
-----	-------	------	-----

De los datos anteriores se obtuvo como resultado una eficiencia máxima de 90% con una potencia de salida aproximada de 3 W.

En la Figura 5.4 se muestra la gráfica que representa la eficiencia del sistema funcionando con una fuente estable de tensión de entrada.

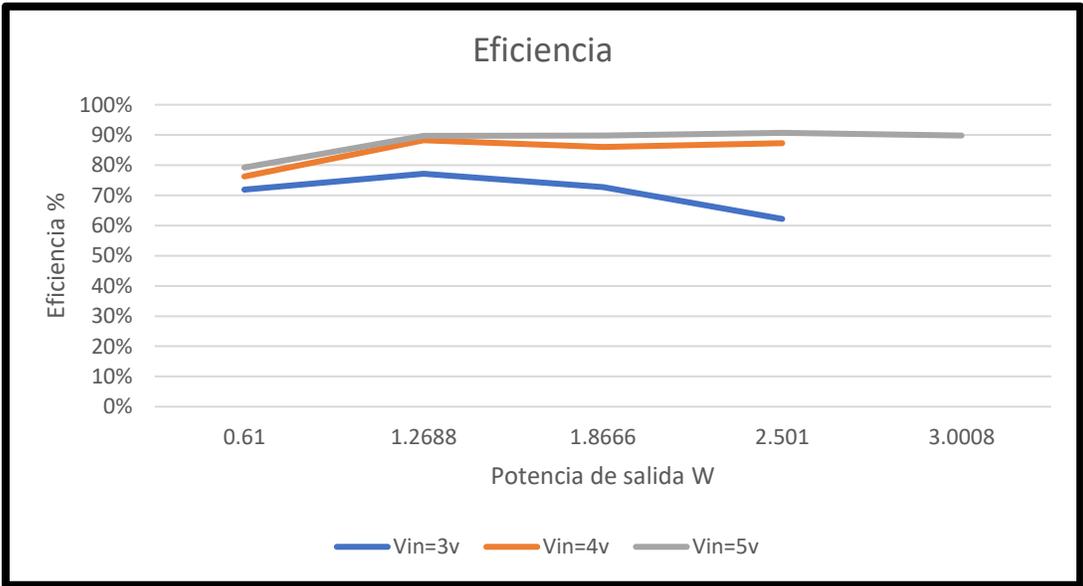


Figura 5.4. Eficiencia del módulo con fuente estable de energía.

Durante la prueba, el convertidor se sometió a cargas resistivas para obtener los valores anteriores, algunos parámetros importantes, desventajas y ventajas que se presentarían durante la aplicación y las cuales fueron observadas durante las pruebas son mostrados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Ventajas y Desventajas del convertidor seleccionado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de fabricación</li> <li>• Tamaño adecuado del módulo para aplicaciones portátiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En tensiones muy baja y corriente cerca del límite de operación normal el convertidor</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su eficiencia esta cerca del 90% lo cual representa una gran utilidad en la aplicación portátil y una Celda de combustible como fuente.</li> <li>• Su tensión de salida de 12v es constante y es aplicable en muchos dispositivos portátiles.</li> <li>• El control del dispositivo es muy preciso.</li> </ul>	<p>es incapaz de alcanzar su meta de tensión de salida.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para alcanzar buena eficiencia debe existir una buena tensión a la entrada, lo cual implica un apilamiento de celdas de combustible tipo PEM de buena potencia.</li> </ul>
---	---

## **Conclusiones**

Los resultados obtenidos durante la simulación de los módulos evaluados fueron esenciales para saber el comportamiento, la cual fue útil para determinar que configuración era la adecuada. Con el convertidor boost con el controlador LM2735 se obtuvieron resultados cercanos a la simulación, además es capaz de otorgar 5v o 12v según la configuración de sus componentes, que en este caso fue utilizado a 12v debido a que la tarjeta ya contaba con esa configuración. Sin embargo, con el convertidor boost con un controlador LTC3108 y supercapacitores integrados suministro una tensión 5v máximo con una eficiencia menor.

El convertidor Boost con un controlador LM2735 de Texas Ins. fue elegido por sus óptimos resultados y mayor tensión de salida. Dicho convertidor fue evaluado con carga resistiva lo cual arrojó una eficiencia máxima de 90%. Sus características hacen ideal el convertidor para aplicaciones portátiles. Además, el convertidor boost es de bajo costo y simplicidad. En la Figura 3.2 se puede observar su eficiencia real durante las pruebas.

La potencia de salida para las pruebas fue variándose para saber en que parte es mas eficiente y darnos una idea en que potencia de salida el convertidor es más eficiente. El rizado de tensión y corriente es importante, ya que incide en el consumo de hidrogeno.

Trabajos Futuros.

El convertidor seleccionado no pudo ser implementado con el apilamiento CC. La causa fue que el apilamiento de CC por su baja tensión de salida no alcanzo a polarizar los componentes electrónicos del convertidor por lo que se requeriría una CC de mayor potencia para poder ser aplicada con este convertidor.

Se diseñara un convertidor de menor potencia de operación para poder ser aplicado con CC de menor potencia.

La CC ofrece corriente de salida suficiente para ser aplicada en rubros portátiles, pero con un dispositivo acondicionador con un rango de operación menor. Se realizarán pruebas con carga para obtener la eficiencia como un sistema.

## **Referencias**

- [1] Damien Guilbert, et al, «DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, nº 38, pp. 23966-23985, 2017.
- [2] Eduardo Pérez-Dencia, et al, «Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 597-613, 2017.
- [3] Rafael Alexandri Rionda, *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*, Mexico, 2016.
- [4] A.López Ortiz, M.J.Meléndez Zaragoza y V.Collins-Martín, «Hydrogen production research in Mexico: A review,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, nº 48, pp. 23363-23379, 2016.
- [5] Michel Ball, Marcel Weeda, «The hydrogen economy e Vision or reality?,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 4, nº 40, pp. 7903-7919, 2015.
- [6] M. Pehnt, et al, *Micro Cogeneration towards decentralized energy systems*, Berlin: Springer, 2006.

- [7] José Ignacio Linares Hurtado, Beatriz Yolanda Mora, El hidrógeno y la energía: Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas, España: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas, 2012.
- [8] A. Lopez Ortiz, M.J. Meléndez Zaragoza y V. Collins, «Hydrogen production research in Mexico: A review,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 23363-23379, 2016.
- [9] Fellipe Sartori da Silva, Teofilo Miguel de Souza, «Novel materials for solid oxide fuel cell,» *international journal of hydrogen energy*, vol. 42, nº 41, pp. 1-17, 2017.
- [10] R.Fernández-González, et al, «A novel microstructured metal-supported solid oxide fuel cell,» *Journal of Power Sources*, vol. 272, nº 25, pp. 233-238, 2014.
- [11] Theo Elmer, et al, «Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of-the-art review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 913-931, 2016.
- [12] Mahmood Chahartaghi y Behrad Alizadeh Kharkeshi, «Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, nº 5, pp. 805-817, 2018.
- [13] Mauricio Paredes, «Tesis de Licenciatura: Analisis y diseño de un prototipo de celda de combustible de alcohol tipo (DAFC) portatil,» Progreso Yucatan, 2016.
- [14] Po Hong, et al., «Modeling of Membrane Electrode Assembly of PEM Fuel Cell to Analyze Voltage Losses Inside,» *Energy*, 2017.
- [15] U. Lucia, «Overview on fuel cells,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 164-169, 2014.
- [16] Yang Zhao, et al, «Proton exchange membranes prepared via atom,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. XXX, pp. 1-16, 2017.
- [17] W.R.W.Daud, et al, «PEM fuel cell system control: A review,» *Renewable Energy*, vol. 13, pp. 620-638, 2017.
- [18] Rungsima Yeetsorn, Michael W. Fowler y Costas T, «A Review of Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Materials in PEM Fuel Cells,» *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*, Dr, John Cuppoletti, p. 10.5772/19262, 2011.
- [19] Jianlu Zhang, et al, «Fuel Cell Open Circuit Voltage,» de *Diagnosis, Pem Fuel Cell Testing and*, 2013, pp. 187-200.
- [20] Jiatang Wang, Jinliang Yuanb y Bengt Sundéna, «On electric resistance effects of non-homogeneous,» *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017.

- [21] Marr C, Li X., «An engineering model of proton exchange membrane fuel cell,» *ARI Int J Phys Eng Sci*, vol. 4, pp. 190-200, 1998.
- [22] Z. Abdin, C.J. Webb y E. MacA. Gray, «PEM fuel cell model and simulation in Matlab–Simulink based on physical parameters,» *Energy*, vol. 116, nº 1, pp. 1131-1144, 2016.
- [23] L. Palma, M. Harfman Todorovic y P. Enjeti, «Design Considerations for a Fuel Cell Powered DC-DC Converter for Portable Applications,» *Power Electronics & Fuel Cell Power Systems Laboratory*, p. 10.1109/APEC.2006.1620701, 2006.
- [24] J. J. Brey, «Power conditioning of fuel cell systems in portable applications,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, p. 1559 – 1566, 2007.
- [25] A. Alaswad, et al, «Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide,» *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [26] O.Barbera, et al, «Simple and functional direct methanol fuel cell stack designs for application in portable and auxiliary power units,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, nº 28, pp. 12320-12329, 2016.
- [27] Youngseung Na, «Highly integrated direct methanol fuel cell systems minimizing fuel loss with dynamic concentration control for portable applications,» *Journal of Process Control*, vol. 47, pp. 140-147, 2017.
- [28] P.P. Kundu y K. Dutta, «Hydrogen Use, Safety and the Hydrogen Economy,» *Compendium of Hydrogen Energy*, vol. 4, p. 111–131, 2016.
- [29] J. Fernández-Moreno, et al, «A portable system powered with hydrogen and one single,» *Applied Energy*, vol. 109, pp. 60-66, 2013.
- [30] Kristopher Inman, Zakaria Ahmad, Zhongying Shi y Xia Wang, «Design of a proton exchange membrane portable fuel cell system for the 1st international association for hydrogen energy design competition,» *International journal of hydrogen energy*, vol. 36, pp. 13868-13874, 2011.
- [31] e. a. M.Z.Hossain, «Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, nº 1, pp. 205-230, 2018.
- [32] L.Martinez Salamero, et al, «Modelado y Control de Convertidores Conmutados Continua-Continua: Una perspectiva Tutorial,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 6, nº 4, pp. 5-20, 2009.
- [33] Muhammad Rashid, *Electronica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*, España: Pearson, 2005.

- [34] M. Venkatesh Naik, Paulson Samuel, «Analysis of ripple current, power losses and high efficiency of DC–DC converters for fuel cell power generating systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1080-1088, 2016.
- [35] Anthony Green & Christophe Jehoulet , «THE NON-BATTERY BATTERY - THE POTENTIAL ROLE OF SUPERCAPACITORS,» 2002.
- [36] Davide Baderna, et al, «Power efficiency evaluation in Dickson and voltage doubler charge pump topologies,» *Microelectronics Journal*, vol. 37, p. 1128–1135, 2006.
- [37] Julio Cesar Rosas-Caro, et al, «A novel DC-DC multilevel SEPIC converter for PEMFC systems,» *International journal of hydrogen energy*, vol. 41, pp. 23401 - 23408, 2016.
- [38] Texas Instruments, «Designing DC/DC converters based on SEPIC topology,» *Analog Applications Journal*, vol. 4, 2008.
- [39] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, Chichester: Wiley, 2003.
- [40] Jan Doutreloigne, «Fully Integrated Dickson Charge Pumps with Optimized Power Efficiency,» de *World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2010.
- [41] M. C. C. F. B. P. L. S. K. S. a. J.-P. V. M. Pehnt, *Micro Cogeneration towards decentralized energy systems*, Berlin: Springer, 2006.
- [42] A. L. Félix Barreras, «Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM,» España, 2012.