

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR UTILIZANDO CELDAS DE  
HIDRÓGENO COMO FUENTE DE ENERGÍA**

**LUNA JULIANA ORTIZ SERRANO  
DIEGO ALEJANDRO GRILLO PÁEZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR:  
ING. RAFAEL FERNANDO DÍEZ MEDINA Ph.D**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**BOGOTÁ**

**2014**

**RECTOR MAGNÍFICO:  
JORGE HUMBERTO PELÁEZ PIEDRAHITA, S.J**

**DECANO ACADÉMICO:  
ING. JORGE LUIS SANCHEZ PEREZ**

**DECANO DEL MEDIO UNIVERSITARIO:  
ANTONIO JOSÉ SARMIENTO NOVA S. J.**

**DIRECTOR DE CARRERA:  
ING. JAIRO ALBERTO HURTADO LONDOÑO**

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO:  
ING. RAFAEL FERNANDO DÍEZ MEDINA Ph.D**



## INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Electrolizador.....</b>	<b>3</b>
2.1.1. Electrólisis.....	3
2.1.2. Componentes del electrolizador.....	4
<b>2.2. Arreglo de celdas tipo PEM.....</b>	<b>5</b>
2.2.1. Celdas de combustible.....	5
2.2.2. Celdas tipo PEM.....	6
<b>2.3. Convertidor de potencia tipo Ćuk.....</b>	<b>6</b>
2.3.1. Configuración y características.....	7
2.3.2. Modo de funcionamiento continuo.....	7
2.3.2.1. Estado T <sub>ON</sub> .....	8
2.3.2.2. Estado T <sub>OFF</sub> .....	8
2.3.2.3. Análisis de voltajes y corrientes.....	9
<b>3. ESPECIFICACIONES.....</b>	<b>12</b>
3.1. Electrolizador.....	12
3.2. Celdas tipo PEM.....	12
3.3. Convertidor.....	13
3.4. Carga.....	14
<b>4. DESARROLLO Y RESULTADOS.....</b>	<b>15</b>
4.1. Caracterización estática del electrolizador.....	15
4.2. Caracterización de las celdas tipo PEM.....	16
4.2.1. Caracterización estática de las celdas tipo PEM.....	16
4.2.2. Caracterización dinámica de las celdas tipo PEM.....	32
4.3. Diseño del convertidor Ćuk.....	32
4.3.1. Cálculos convertidor Ćuk.....	32
4.3.2. Elaboración de las inductancias.....	35
4.3.3. Circuito impreso.....	38
4.3.3.1. Esquemático etapa de potencia.....	38
4.3.3.2. Esquemático etapa de control.....	38
4.3.3.3. Esquemático convertidor Ćuk con el control.....	39
4.3.4. Implementación del convertidor.....	40
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Caracterización estática del sistema de celdas de combustible.....</b>	<b>49</b>
5.1.1. Caracterización estática del electrolizador.....	49
5.1.2. Caracterización estática del arreglo de celdas tipo PEM.....	50
<b>5.2. Caracterización dinámica de la celda.....</b>	<b>54</b>
5.2.1. Pasos de voltaje.....	54
5.2.2. Pasos de carga.....	58
<b>5.3. Implementación del convertidor Ćuk con las celdas de hidrógeno tipo PEM.....</b>	<b>63</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>66</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>67</b>

## INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Voltaje de las inductancias $L_1$ y $L_2$ con respecto al tiempo. ....	11
Gráfica 2: Corriente de las inductancias $L_1$ y $L_2$ con respecto al tiempo. ....	11
Gráfica 3: Curva característica LEDs 1W. Tomado de [20] .....	33
Gráfica 4: Comportamiento térmico del electrolizador con respecto al tiempo. ....	49
Gráfica 5: Comportamiento la corriente con respecto al tiempo. ....	49
Gráfica 6: Comportamiento la corriente con respecto a la temperatura. ....	50
Gráfica 7: Respuesta de voltaje vs corriente celdas tipo PEM. ....	51
Gráfica 8: Respuesta de potencia vs resistencia en la carga celdas tipo PEM. ....	51
Gráfica 9: Respuesta de potencia vs voltaje de salida en celdas tipo PEM. ....	52
Gráfica 10: Respuesta de potencia vs corriente de salida celdas tipo PEM. ....	52
Gráfica 11: Potencia máxima entregada contra flujo de hidrógeno. ....	53
Gráfica 12: Dos pasos en una carga de $10\Omega$ . ....	54
Gráfica 13: Borde de subida en una carga de $10\Omega$ . ....	54
Gráfica 14: Borde de bajada en una carga de $10\Omega$ . ....	54
Gráfica 15: Dos pasos en una carga de $15\Omega$ . ....	55
Gráfica 16: Borde de subida en una carga de $15\Omega$ . ....	55
Gráfica 17: Borde de bajada en una carga de $15\Omega$ . ....	55
Gráfica 18: Dos pasos en una carga de $20\Omega$ . ....	56
Gráfica 19: Borde de subida en una carga de $20\Omega$ . ....	56
Gráfica 20: Borde de bajada en una carga de $20\Omega$ . ....	56
Gráfica 21: Borde de subida en una carga de $30\Omega$ . ....	57
Gráfica 22: Borde de subida sección 1 en una carga de $30\Omega$ . ....	57
Gráfica 23: Borde de subida sección 2 en una carga de $30\Omega$ . ....	57
Gráfica 24: Borde de bajada en una carga de $30\Omega$ . ....	58
Gráfica 25: Dos pasos en una carga de $30\Omega$ . ....	58
Gráfica 26: Dos pasos con un voltaje de 3,25V. ....	59
Gráfica 27: Borde de bajada con un voltaje de 3,25V. ....	59
Gráfica 28: Borde de subida con un voltaje de 3,25V. ....	59
Gráfica 29: Dos pasos con un voltaje de 3,5V. ....	60
Gráfica 30: Borde de bajada con un voltaje de 3,5V. ....	60
Gráfica 31: Borde de subida con un voltaje de 3,5V. ....	60
Gráfica 32: Dos pasos con un voltaje de 3,75V. ....	61
Gráfica 33: Borde de bajada con un voltaje de 3,75V. ....	61
Gráfica 34: Borde de subida con un voltaje de 3,75V. ....	61
Gráfica 35: Dos pasos con un voltaje de 4,0V. ....	62
Gráfica 36: Borde de bajada con un voltaje de 4,0V. ....	62
Gráfica 37: Borde de subida con un voltaje de 4,0V. ....	62
Gráfica 38: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,25V en el electrolizador. ....	63
Gráfica 39: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,5V en el electrolizador. ....	63
Gráfica 40: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,75V en el electrolizador. ....	64
Gráfica 41: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4V en el electrolizador. ....	64
Gráfica 42: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4,25V en el electrolizador. ....	65
Gráfica 43: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4,5V en el electrolizador. ....	65

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de electrólisis. Tomada de [17] .....	3
Figura 2: Electrólisis del agua pura. Tomado de [10] .....	4
Figura 3: Esquema electrolizador.....	4
Figura 4: Esquema de una celda de combustible. Tomado de [12].....	5
Figura 5: Celda de combustible tipo PEM. Tomado de [18].....	6
Figura 6: Esquema general de un convertidor.....	7
Figura 7: Configuración básica convertidor $\dot{C}uk$ . .....	7
Figura 8: Convertidor $\dot{C}uk$ estado $T_{ON}$ . .....	8
Figura 9: Convertidor $\dot{C}uk$ estado $T_{OFF}$ . .....	8
Figura 10: Diagrama de bloques. ....	12
Figura 11: Electrolizador. Tomado de [5].....	12
Figura 12: Celdas tipo PEM. Tomado de [5] .....	13
Figura 13: Kit de H-tec, sistema interconectado. Tomado de [5] .....	13
Figura 14: Convertidor $\dot{C}uk$ . Tomado de [19].....	13
Figura 15: LED de 1W. Tomado de [20] .....	14
Figura 16: Electrolizador del kit H-tec.....	16
Figura 17: Descripción física ferrita EA-77-250. Tomado de [22] .....	36
Figura 17: Esquemático etapa de potencia .....	38
Figura 18: Esquemático etapa de control. ....	39
Figura 19: Esquemático convertidor $\dot{C}uk$ y control. ....	39
Figura 20: Layout circuito impreso.....	40

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de baterías eléctricas. Tomada de [8] .....	1
Tabla 2: Densidades energéticas de diversos combustibles. Tomada de [6].....	1
Tabla 3: Parámetros característicos del electrolizador .....	15
Tabla 4: Parámetros medidos con 3,25V de entrada en el electrolizador. ....	17
Tabla 5: Datos estadísticos curva de 3,25V. ....	18
Tabla 6: Parámetros medidos con 3,5V de entrada en el electrolizador. ....	19
Tabla 7: Datos estadísticos curva de 3,5V. ....	20
Tabla 8: Parámetros medidos con 3,75V de entrada en el electrolizador. ....	21
Tabla 9: Datos estadísticos curva de 3,75V. ....	22
Tabla 10: Parámetros medidos con 4V de entrada en el electrolizador. ....	23
Tabla 11: Datos estadísticos curva de 4V. ....	24
Tabla 12: Parámetros medidos con 4,25V de entrada en el electrolizador. ....	25
Tabla 13: Datos estadísticos curva de 4,25V. ....	26
Tabla 14: Parámetros medidos con 4,5V de entrada en el electrolizador. ....	27
Tabla 15: Datos estadísticos curva de 4,5V. ....	28
Tabla 16: Dimensiones y propiedades ferritas Amidon tipo E. Tomado de [22] .....	37
Tabla 16: Implementación del convertidor Ćuk con 3,25V en el electrolizador.....	41
Tabla 17: Implementación del convertidor Ćuk con 3,5V en el electrolizador.....	42
Tabla 18: Implementación del convertidor Ćuk con 3,75V en el electrolizador.....	43
Tabla 19: Implementación del convertidor Ćuk con 4V en el electrolizador.....	44
Tabla 20: Implementación del convertidor Ćuk con 4,25V en el electrolizador.....	45
Tabla 21: Implementación del convertidor Ćuk con 4,5V en el electrolizador.....	46
Tabla 22: Flujo de hidrógeno según el voltaje en la entrada del electrolizador. ....	50

## INTRODUCCIÓN

En el afán de unirse al tema de energías renovables, la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá, mediante el departamento de física, obtuvo un kit de celdas de combustible (tipo PEM) para la enseñanza y la experimentación, diseñado para poder mostrar paso a paso los procesos para la obtención y almacenamiento del hidrógeno y su posterior transformación en energía eléctrica (Junior Stack Experimentation Set).

Utilizando esta energía renovable, se ha intentado almacenar energía en distintos dispositivos, mediante una gran cantidad de técnicas y materiales, pero aun así no se acercan a las cualidades de almacenamiento de energía de los principales combustibles. En la Tabla 1, se pueden observar las propiedades de algunas baterías eléctricas. Comparando las tabla 1 y la tabla 2, se puede ver de manera clara la gran diferencia entre las baterías eléctricas y combustibles en cuanto a la densidad de energía por unidad de masa, por ejemplo, la batería Litio polímero sólido que presenta la densidad más alta dentro de las baterías (200 Wh/kg) es 168 veces menor que la densidad que se obtiene del Hidrógeno (33,58 kWh/kg) siendo el H<sub>2</sub> el elemento con mayor densidad de energía por unidad de masa sobre la tierra.

Tipo de batería	Máxima densidad de energía [Wh/kg]	Máxima densidad de potencia [W/kg]	Máxima velocidad de recarga 80% [min]	Temp. de operación [C°]	Ciclos de descarga al 80% antes de reemplazar [cant.]	Estimación de costos de producción a gran escala [\$ por kWh]
Plomo-ácido	35	150	-	Ambiente	1000	60
Plomo ácido avanzado	45	250	-	Ambiente	1500	200
Plomo ácido de válvula regulada	50	150+	15	Ambiente	700+	150
Plomo ácido de lámina metálica	30	900	15	Ambiente	500+	-
Níquel-hierro	50	100	-	Ambiente	2000	150-200
Níquel-Zinc	70	150	-	Ambiente	300	150-200
Níquel-cadmio	50	200	15	Ambiente	2000	300
Níquel-hidruro metálico	70	200	35	Ambiente	2000+	250
Sodio-azufre	110	150	-	350°	1000	150
Sodio-cloruro de níquel	100	150	-	300°	700+	250
Litio-sulfuro de hierro	150	300	-	450°	1000	200
Litio-polímero sólido	200	350	-	80-120	1000	150
Litio-ion	120-150	120-150	<60	Ambiente	1000+	150
Aluminio-aire	220	30	-	Ambiente	-	-
Zinc-aire	200	80-140	-	Ambiente	200	100

**Tabla 1: Propiedades de baterías eléctricas. Tomada de [8]**

	Energía almacenada			
	Densidad [kg/m³]	Volumen [kWh/m³]	Volumen [kWh/Nm³]	Masa [kWh/kg]
H <sub>2</sub> líquido (1 bar; -252,8°C)	70,71	2.375	3	33,59
H <sub>2</sub> gas (300 bar; 25°C)	20,55	690		
H <sub>2</sub> gas (700 bar; 25°C)	47,96	1.611		
Gas natural (1 bar; 25°C)	0,65	9,1	10	13,93
Butano líquido (25°C)	550	7.000	33	12,73
Gasolina	750	9.270	-	12,36

**Tabla 2: Densidades energéticas de diversos combustibles. Tomada de [6]**

Por otro lado, el hidrógeno al ser poco denso ocupa un volumen de almacenamiento mayor al compararlo con otros combustibles, como la gasolina que es el combustible más utilizado en la industria automotriz. Sin embargo existen tecnologías que permiten almacenar el hidrógeno a presiones elevadas disminuyendo así el volumen de almacenamiento sin variar su densidad de energía por kilogramo. Estas tecnologías se implementan en la actualidad en el funcionamiento de algunos automóviles, como es el caso del Honda FCX Clarity, en el cual se ha implementado un sistema de almacenamiento a una presión de 350 bares que permite almacenar 4 kilogramos de hidrógeno, es decir 2.7 veces más energía que la que pueden generar los mismos 4 kilogramos de Gasolina, y que a su vez le permiten al automóvil una autonomía de 460 km.[3] Otros ejemplos de estas tecnologías son algunos buses en Londres que almacenan el hidrógeno a 350 bares permitiendo almacenar 35 kilogramos de hidrógeno. Se encuentran en fase de demostración autobuses de turismo con tecnología de compresión a 700 bares y el BMW clase 7 con almacenamiento criogénico, que conserva el hidrógeno a una temperatura de  $-258,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  para mantener el hidrógeno en forma líquida y asegurar un tanque de menor volumen.

Al comparar el hidrógeno con la gasolina se puede ver que el hidrógeno tiene grandes ventajas sobre la gasolina, aunque esta última tiene a su favor que posee una mayor densidad de energía por unidad de volumen, pero aun así existen varias razones para preferir el hidrógeno por encima de cualquier otro elemento como fuente de energía:

1. Eficiencia energética: La energía química contenida en el hidrógeno puede ser transformada en energía eléctrica por medio de una celda tipo PEM sin tener que pasar por medio del accionamiento térmico de un ciclo de potencia, lo que permite suprimir las limitaciones determinadas por el rendimiento de Carnot, haciendo que se alcancen elevados rendimientos energéticos.
2. Dependencia energética: De acuerdo con el instituto mundial de carbón, a la tasa de consumo de hoy, las reservas de carbón podrían acabarse en aproximadamente 130 años, el gas natural en 60 años y el petróleo en 42 años, lo que significa que se debe hacer un cambio urgente hacia una economía de energías alternativas. Si bien el hidrógeno no es una fuente primaria de energía, si facilita el almacenamiento y el transporte de esta, y puede ser producido a partir de energías renovables y nucleares, por lo que el hidrógeno puede jugar un papel muy importante en cuanto a la reducción de la dependencia energética.
3. Medioambiente: El residuo en el proceso de combustión del hidrógeno, es solamente vapor de agua libre de  $\text{CO}_2$ .

Por tales motivos es interesante utilizar el hidrógeno como un portador de energía de alta eficiencia, dependencia energética y en pro del medio ambiente.

Teniendo en cuenta la capacidad de las celdas de combustible que dispone la Pontificia Universidad Javeriana realizamos la alimentación de una carga eléctrica, cuyo consumo no supera los 2W, que es la potencia máxima que puede entregar el arreglo modular de celdas tipo PEM. Para alimentar esa carga se acondicionó el voltaje de salida de la celda de combustible, por medio de un convertidor CC/CC cuya entrada es un voltaje DC (salida de la celda) que oscila entre 4V a 6V, debido a esta variación de voltaje, se hace imprescindible el uso del convertidor para transformar la energía eléctrica y optimizar la recolección de energía de la celda y de esta forma transferir la mayor cantidad de energía a la carga eléctrica, dos bombillos de LED de 1W cada uno, se pudo haber escogido otra carga eléctrica cuyo consumo no superara los 4 W, pero se escogió el bombillo, ya que podría ser implementado en edificios como iluminación en casos de emergencia y en otras aplicaciones.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. Objetivo general

Diseñar un convertidor para transformar la energía eléctrica entregada por un arreglo modular tipo PEM, y utilizar dicha energía para alimentar un bombillo de LEDs de 3W

### 1.2. Objetivos específicos

- I. Determinar el punto óptimo en la curva de conversión eléctrica vs flujo de hidrogeno.
- II. Diseñar un dispositivo de regulación, que optimice la recolección de energía de la celda, para obtener la máxima energía posible, e implementarla para la alimentación de una carga eléctrica.
- III. Realizar la familia de curvas características estáticas de la celda (voltaje contra corriente) variando la carga en la salida y variando el flujo de hidrogeno a la entrada.
- IV. Desarrollar la caracterización dinámica de la celda efectuando pasos en la carga y en el hidrogeno y revisando la respuesta del sistema a estas variaciones.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Electrolizador

Un electrolizador es un dispositivo en el cual se llevan a cabo reacciones electroquímicas que generan transformaciones en las sustancias involucradas en el proceso como consecuencia del paso de corriente eléctrica a través electrodos y de las disoluciones electrolíticas en las que están sumergidos, este fenómeno es denominado electrólisis. Para lograr dichas reacciones, el electrolizador está compuesto de al menos dos electrodos fabricados de un material conductor que se encuentran sumergidos en un medio líquido, conocido como electrolito.

#### 2.1.1. Electrólisis

La electrólisis es un proceso donde se produce una reacción química no espontánea separando los elementos de un compuesto por medio de la electricidad, de esta forma una sustancia química se transforma en otra. Dicha transformación ocurre por la ganancia o pérdida de electrones, “es decir en una reacción de reducción u oxidación respectivamente, mediante la intervención de un electrodo, que hace de fuente o receptor de electrones, y de la transmisión de la corriente eléctrica en la disolución electrolítica, que permite el transporte de las sustancias o los iones del seno de la solución hacia los electrodos”<sup>1</sup>.

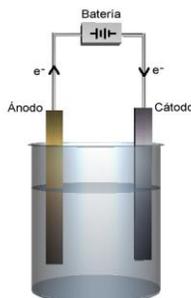


Figura 1: Proceso de electrólisis. Tomada de [17]

<sup>1</sup> HOLLAR, P., POLI, F. y OTERO, L. *Celda electroquímica celular*. Buenos Aires: Escuela tecnica 3 maria sanchez de thompson; recuperado de: [http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/mercosul\\_proj\\_argentina\\_celda.pdf](http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/mercosul_proj_argentina_celda.pdf)

Para efectuar el proceso de electrólisis se aplica una diferencia de potencial en los electrodos, que se encuentran sumergidos en una disolución, la cual genera una corriente eléctrica continua que provoca la reacción electroquímica que descompone el electrolito en varios productos. El electrodo conectado al polo positivo se conoce como ánodo, y el conectado al negativo como cátodo. Cada electrodo atrae iones con carga contraria, de esta forma los cationes son atraídos por los ánodos y los aniones son atraídos por los cátodos, llevando a cabo una reacción de oxidación-reducción en los átomos que absorben o liberan electrones convirtiéndose en iones que pasan al electrolito.

Basándonos en la electrólisis del agua como proceso que permite su descomposición en los elementos que la componen, oxígeno e hidrógeno, para el desarrollo del proyecto, es necesario utilizar agua destilada, ya que de lo contrario, obtendríamos componentes como sales, metales y otros minerales que no son de interés en este proyecto. Por lo tanto, por medio de la electrólisis del agua destilada se obtiene hidrógeno y oxígeno de alta pureza y con una alta eficiencia.

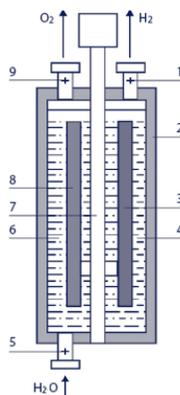


**Figura 2: Electrólisis del agua pura. Tomado de [10]**

### 2.1.2. Componentes del electrolizador

El electrolizador está compuesto por los elementos descritos a continuación:

- i. **Electrodos:** Son conductores eléctricos encargados de hacer que la corriente eléctrica circule adecuadamente al centro del electrolito para que se produzca de forma correcta el proceso de electrólisis. Para que funcionen de manera apropiada los electrodos deben ser resistentes a la corrosión, tener alta conductividad y óptimas propiedades catalíticas. Generalmente se utilizan electrodos de hierro en el cátodo y de acero aleado con níquel en el ánodo. Las características geométricas y los componentes de los electrodos son fundamentales para mejorar el rendimiento de un electrolizador [11]. El electrodo correspondiente al ánodo contiene cargas positivas y el electrodo correspondiente al cátodo contiene cargas negativas.
- ii. **Electrolito:** Es una sustancia líquida que contiene iones libres que permiten el paso de corriente eléctrica en los electrodos. Los electrones circulan a través del electrolito debido a reacciones químicas de oxidación-reducción generadas en el ánodo y el cátodo de los electrodos. La parte del electrolito que está más cerca del ánodo se conoce como anolito, mientras que la más cercana al cátodo se denomina catolito.
- iii. **Membrana:** Se encarga de separar el electrolito en dos cavidades, en una se encuentra el anolito y en la otra el catolito, de esta manera se separan los gases que se producen en la electrólisis.



**Figura 3: Esquema electrolizador. (1) Salida H<sub>2</sub>. (2) Marco de acrílico. (3) Cátodo. (4) Catolito. (5) Entrada de H<sub>2</sub>O. (6) Anolito. (7) Electrodo bipolar. (8) Ánodo. (9) Salida de O<sub>2</sub>. Tomado de [14]**

## 2.2. Arreglo de celdas tipo PEM

### 2.2.1. Celdas de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma energía química directamente en energía eléctrica, sin necesidad de ningún proceso de combustión. La estructura de una celda de combustible se compone de dos electrodos, un ánodo y un cátodo conectados a una fuente eléctrica, los cuales se encuentran en contacto por medio de un electrólito.

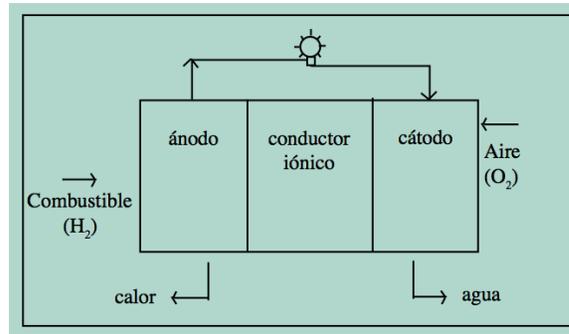
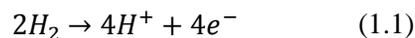


Figura 4: Esquema de una celda de combustible. Tomado de [12]

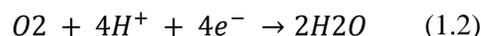
La eficiencia teórica de las celdas de combustible se entiende desde las leyes de Faraday que relacionan directamente la corriente producida en la reacción electroquímica con la cantidad de combustible, cuya mayor ventaja se encuentra en el hecho de no estar limitadas por la temperatura, lo cual ayuda a alcanzar altos niveles de eficiencia, a diferencia de las máquinas de combustión regidas por el ciclo de Carnot.

“Así, en teoría, cada molécula de hidrógeno gas producirá dos electrones libres y junto con un átomo de oxígeno reducido se generará una molécula de agua. Estas características de lograr alta eficiencia durante la generación de electricidad y la ventaja de presentar cero emisiones contaminantes cuando el combustible es hidrógeno hacen de las celdas de combustible los mejores candidatos para la generación de energía eléctrica.”<sup>2</sup>. En esta medida, otra alternativa de eficiencia está en poder utilizar casi cualquier tipo de combustible que contenga hidrógeno, principalmente hidrocarburos por razones prácticas.

De esta manera, la celda de combustible funciona basada en reacciones electroquímicas entre el hidrógeno (combustible) y el oxígeno (oxidante). En donde el hidrógeno fluye a través del ánodo y se propaga por medio de la capa electrolítica que se encuentra alrededor y llega a la capa catalizadora donde se oxida y por tanto libera electrones, como se describe a través de la siguiente ecuación:



Ahora bien, dado que los electrones liberados no pueden atravesar la membrana que separa el ánodo y el cátodo, estos circulan por medio de la capa catalizadora del ánodo hasta llegar al cátodo, mientras por otro lado los protones son conducidos hacia la capa catalizadora del cátodo. Por su parte el oxígeno entra y se difunde a través del cátodo hacia el electrolito catalizador donde reacciona con los protones y los electrones del hidrógeno formando finalmente agua. Esta reacción se describe por medio de la siguiente ecuación:



Como se observa de las ecuaciones, estas celdas producen energía eléctrica dando como subproducto agua y calor.

---

<sup>2</sup> CANO, U. (1999). *Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas; recuperado de: <http://www.ii.org.mx/reno99/apli.pdf>

### 2.2.2. Celdas tipo PEM

Las celdas de combustible tipo PEM, membrana de intercambio protónico, son dispositivos que pueden generar energía eléctrica sin emitir gases tóxicos al ambiente y que tienen una gran eficiencia, razón por lo cual son una buena alternativa energética para disminuir en gran escala la contaminación producida por las principales fuentes energética utilizadas actualmente y la dependencia de combustibles fósiles. Este tipo de tecnología permite la fabricación y producción de celdas compactas con suficientes mA de corriente por centímetro cuadrado, en otras palabras, con densidades de corrientes superiores a celdas similares.

Estas celdas utilizan como electrolito una membrana polimérica conductora de protones cuya “membrana se encuentra entre dos electrodos porosos impregnados en el lado de la membrana con un electrocatalizador (usualmente Pt) y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas (unos 80oC), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial alta”<sup>3</sup>.

Ahora bien, debe tenerse en cuenta que el único líquido que maneja la celda PEM es agua, de modo que aunque pueden presentarse efectos por corrosión, son mínimos, pues sus componentes básicos son: dos electrodos impregnados con catalizador, en una membrana conductora de protones, capas difusoras de gas y placas colectoras de corriente con campos de flujo.

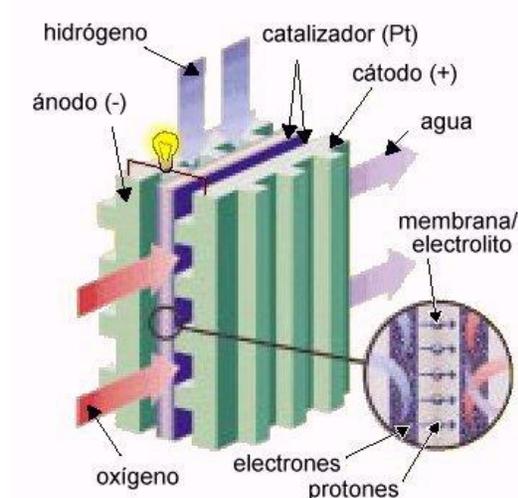


Figura 5: Celda de combustible tipo PEM. Tomado de [18]

### 2.3. Convertidor de potencia tipo Cúk

Un convertidor de potencia es una configuración de circuito electrónico que es capaz de llevar a cabo el proceso de conversión de potencia, es decir convertir una forma de energía eléctrica en otra específica según el tipo de convertidor. Para llevar a cabo dicho proceso, los convertidores alteran las características de tensión y corriente que reciben, transformándolas en señales de amplitud, frecuencia, y/o fase diferentes a la entrada, dependiendo de la configuración y elementos usados en el circuito.

<sup>3</sup> CANO, U. (1999). *Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas; recuperado de: <http://www.ii.org.mx/reno99/apli.pdf>

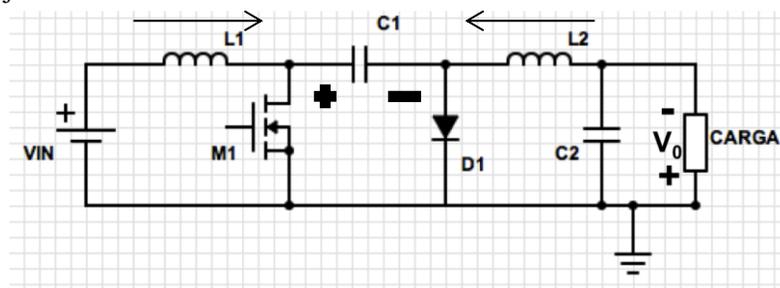


**Figura 6: Esquema general de un convertidor.**

Dentro de los convertidores de potencia se encuentran los convertidores DC-DC, los cuales tienen como entrada un voltaje con corriente continua y lo transforman a un voltaje regulado con limitación de corriente (continua) en la salida. Una de las configuraciones típicas de los convertidores DC-DC es el convertidor tipo Ćuk, cuya principal característica es que la magnitud del voltaje a la salida puede ser inferior o superior al voltaje en la entrada (convertidor elevador reductor).

### 2.3.1. Configuración y características

La configuración básica del convertidor de Ćuk surge de conectar en serie las configuraciones básicas de los convertidores tipo boost y buck. Debido a esta configuración, el convertidor actúa como elevador reductor de voltaje, por lo que su principal función es mantener un voltaje de salida regulado ante variaciones de voltaje en la entrada.



**Figura 7: Configuración básica convertidor Ćuk.**

Como puede observarse en la topología del convertidor, existen dos características importantes, la primera es que el voltaje de salida es de signo contrario al voltaje de entrada, la segunda es el MOSFET ( $M_1$ ) presente en el circuito. En la Figura 7 se muestra la conexión del MOSFET, se puede ver que el gate no tiene conexión, esto se debe a que en este terminal se debe ingresar una señal de regulación que controle al MOSFET. Este convertidor tiene dos modos de funcionamiento, modo discontinuo y modo continuo, las expresiones que describen los voltajes y las corrientes varían según del modo de funcionamiento.

Este convertidor se selecciona en nuestra aplicación, en lugar de otras topologías clásicas, por permitir elevar y/o reducir el voltaje, además de tener bajo rizado de corriente en la entrada mejorando el funcionamiento de la celda de combustible y un bajo rizado de corriente en la salida, lo cual es apropiado para alimentar los LED que se comportan como una fuente de voltaje.

### 2.3.2. Modo de funcionamiento continuo

En el modo de conducción continua se puede dividir el funcionamiento del circuito en dos etapas, la etapa  $T_{ON}$  y la etapa  $T_{OFF}$ . El estado  $T_{ON}$  corresponde al intervalo de tiempo en el que el MOSFET se encuentra en modo de conducción directa y el diodo está en modo de conducción inversa, este intervalo ocurre durante un tiempo  $0 < t < DT$ , donde  $D$  es el ciclo útil y  $T$  el periodo de funcionamiento del circuito. El estado  $T_{OFF}$  ocurre durante el segundo ciclo del periodo, intervalo de tiempo  $DT < t < T$ , en el que el MOSFET se encuentra en modo de conducción inversa y el diodo está en modo de conducción directa.

### 2.3.2.1. Estado $T_{ON}$

Este estado ocurre durante el primer ciclo de funcionamiento, comienza en el instante  $t = 0$  y termina en el instante  $t = DT$ . El mosfet  $M_1$  se encuentra polarizado directamente, por tanto conduce, esto hace que la energía almacenada en  $L_1$  aumente, por otro lado, el diodo  $D_1$  está polarizado de forma inversa debido a la polaridad del condensador  $C_1$ , el cual transfiere la energía que recibe a la carga y al filtro de salida constituido por  $L_2$  y  $C_2$ . Dado este funcionamiento el mosfet puede ser modelado como un corto y el diodo como un abierto.

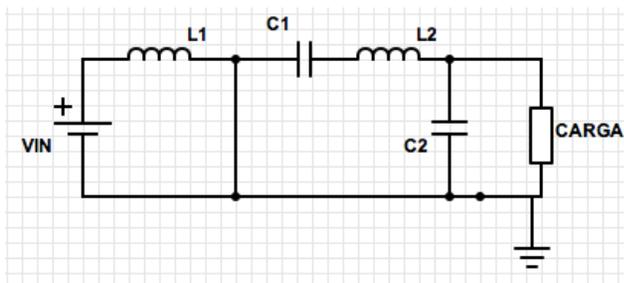


Figura 8: Convertidor Ćuk estado  $T_{ON}$ .

Las ecuaciones que describen la relación de voltajes y corrientes durante este estado son las siguientes:

i. Relación de voltajes

$$V_{L1} = V_{IN} \quad (1.3)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_0 \quad (1.4)$$

ii. Relación de corrientes

$$I_{C1} = -I_{L2} \quad (1.5)$$

$$I_{C2} = I_0 - I_{L2} \quad (1.6)$$

### 2.3.2.2. Estado $T_{OFF}$

Este estado ocurre durante el segundo ciclo de funcionamiento, comienza en el instante  $t \geq DT$  y termina en el instante  $t = T$ . El mosfet  $M_1$  se encuentra polarizado inversamente, por tanto no conduce, por otro lado, el diodo  $D_1$  está polarizado de forma directa, la inductancia  $L_1$  y el condensador  $C_1$  están conectados en serie por lo que el condensador recupera la carga que entregó en el estado anterior y el filtro de salida ( $L_2$  y  $C_2$ ) mantiene la corriente de la carga. Dado este funcionamiento el mosfet puede ser modelado como un abierto y el diodo como un corto.

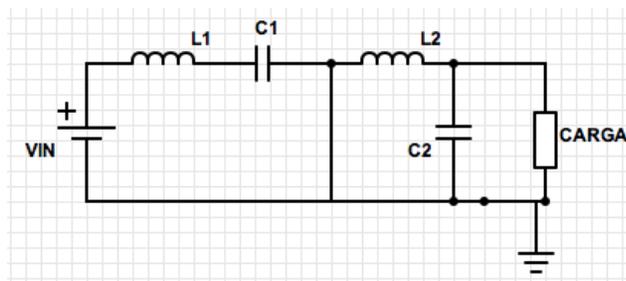


Figura 9: Convertidor Ćuk estado  $T_{OFF}$ .

Las ecuaciones que describen la relación de voltajes y corrientes durante este estado son las siguientes:

i. Relación de voltajes

$$V_{L1} = V_{IN} - V_{C1} \quad (1.7)$$

$$V_{L2} = -V_0 \quad (1.8)$$

ii. Relación de corrientes

$$I_{C1} = -I_{L1} \quad (1.9)$$

$$I_{C2} = I_0 - I_{L2} \quad (1.10)$$

### 2.3.2.3. Análisis de voltajes y corrientes

Una vez obtenidas las ecuaciones de voltaje y corriente en cada estado de operación, se relacionan para obtener el comportamiento del circuito en el periodo completo  $0 < t < T$  como se muestra a continuación.

i. Relación de voltajes

Teniendo en cuenta el balance de voltaje por segundo en estado estacionario:

Para  $L_1$ :

$$\int_0^T V_{L1} dt = 0 \quad (1.11)$$

$$\int_0^{DT} V_{IN} dt + \int_{DT}^T V_{IN} - V_{C1} dt = 0 \quad (1.12)$$

$$(V_{IN})(DT) + (V_{IN} - V_{C1})(1 - D)T = 0 \quad (1.13)$$

$$V_{IN}D + V_{IN} - V_{IN}D - V_{C1}(1 - D) = 0 \quad (1.14)$$

$$\frac{V_{IN}}{(1 - D)} = V_{C1} \quad (1.15)$$

Para  $L_2$ :

$$\int_0^T V_{L2} dt = 0 \quad (1.16)$$

$$\int_0^{DT} -V_0 + V_{C1} dt + \int_{DT}^T -V_0 dt = 0 \quad (1.17)$$

$$(-V_0 + V_{C1})(DT) + (-V_0)(1 - D)T = 0 \quad (1.18)$$

$$(1.19)$$

$$-V_0D + V_{C1}D - V_0(1 - D) = 0$$

$$\frac{V_0}{D} = V_{C1} \quad (1.20)$$

Entonces al igualar (1.15) y (1.20),

$$V_{C1} = \frac{V_{IN}}{(1 - D)} = \frac{V_0}{D} \quad (1.21)$$

$$\frac{V_0}{V_{IN}} = \frac{D}{(1 - D)} \quad (1.22)$$

$$D = \frac{V_0}{V_{IN} + V_0} \quad (1.23)$$

Con la ecuación 1.23 podemos determinar el rango de ciclo útil máximo y mínimo en donde nuestro convertidor va a trabajar

ii. Relación de corrientes

Para  $C_1$ :

$$\int_0^T I_{C1} dt = 0 \quad (1.24)$$

$$\int_0^{DT} -I_{L2} dt + \int_{DT}^T I_{L1} dt = 0 \quad (1.25)$$

$$(-I_{L2})(DT) + (I_{L1})(1 - D)T = 0 \quad (1.26)$$

$$-I_{L2}D + I_{L1} - I_{L1}D = 0 \quad (1.27)$$

$$I_{L2} \frac{D}{(1 - D)} = I_{L1} \quad (1.28)$$

Para  $C_2$ :

$$\int_0^T I_{C2} dt = 0 \quad (1.29)$$

$$\int_0^{DT} I_0 - I_{L2} dt + \int_{DT}^T I_0 - I_{L2} dt = 0 \quad (1.30)$$

$$(I_0 - I_{L2})(DT) + (I_0 - I_{L2})(1 - D)T = 0 \quad (1.31)$$

$$I_0 - I_{L2} = 0 \quad (1.32)$$

$$I_0 = I_{L2} \quad (1.33)$$

Entonces al igualar (1.28) y (1.33),

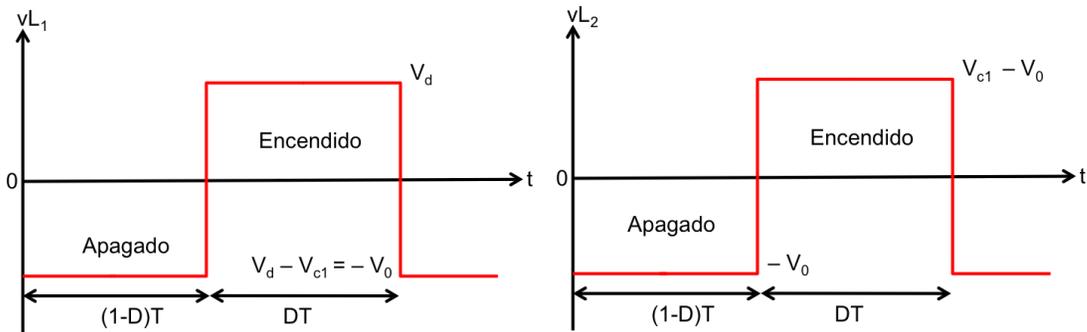
$$I_0 \frac{D}{(1-D)} = I_{L1} \quad (1.34)$$

$$\frac{I_0}{I_{L1}} = \frac{(1-D)}{D} \quad (1.35)$$

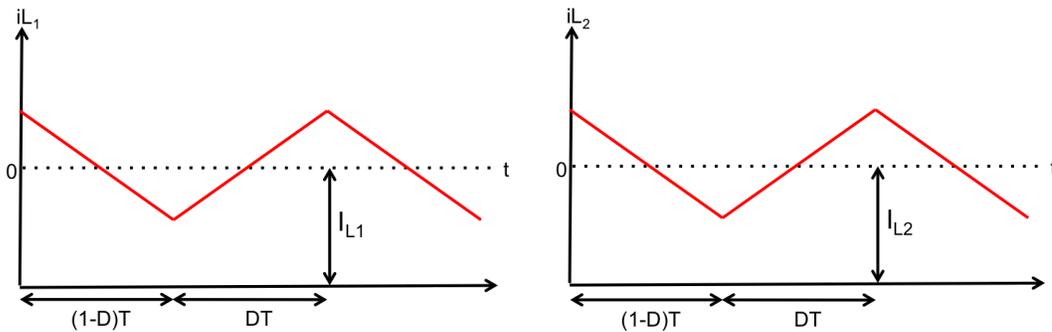
$$D = \frac{I_{L1}}{I_{L1} + I_0} \quad (1.36)$$

Con la ecuación 1.36 podemos calcular las corrientes que pasaran por los inductores y de esta forma encontrar un calibre de alambre adecuado para la construcción de nuestras bobinas

A continuación se presentan las gráficas que describen las formas de onda..



**Gráfica 1: Voltaje de las inductancias  $L_1$  y  $L_2$  con respecto al tiempo.**



**Gráfica 2: Corriente de las inductancias  $L_1$  y  $L_2$  con respecto al tiempo.**

### 3. ESPECIFICACIONES

Este trabajo de grado utiliza la energía eléctrica entregada por un arreglo modular de 10 celdas de hidrógeno tipo PEM (Protón Exchange Membrane, por sus siglas en inglés) para la alimentación de una carga eléctrica que consiste en un sistema de iluminación tipo LED. Para lograr este objetivo se diseñó un convertidor de corriente continua a corriente continua que optimiza la recolección de energía de la celda, para obtener la máxima energía posible e implementarla para la alimentación de la carga eléctrica.

El siguiente diagrama de bloques describe el sistema que será implementado.

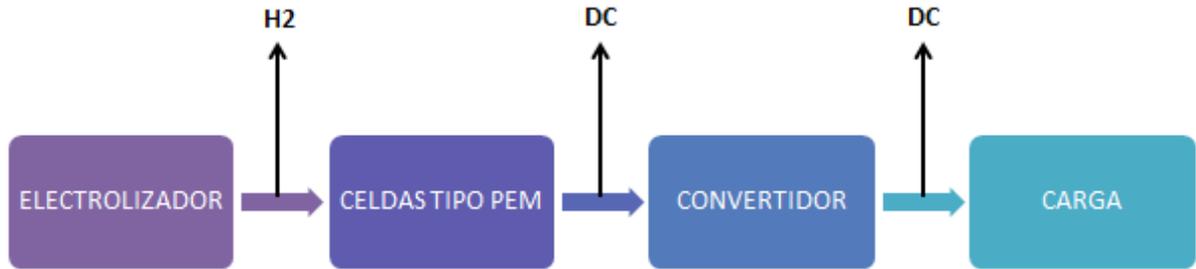


Figura 10: Diagrama de bloques.

#### 3.1. Electrolizador

El primer bloque corresponde al proceso de electrólisis, que consiste en la generación del hidrógeno a partir de la ruptura de la molécula de agua. Mediante este proceso se obtendrán por separado los gases hidrógeno y oxígeno, el oxígeno liberado al ambiente y el hidrógeno el gas que se utilizará para el proceso de conversión de energía. Este procedimiento se realizará por medio del electrolizador del kit de H-tec.

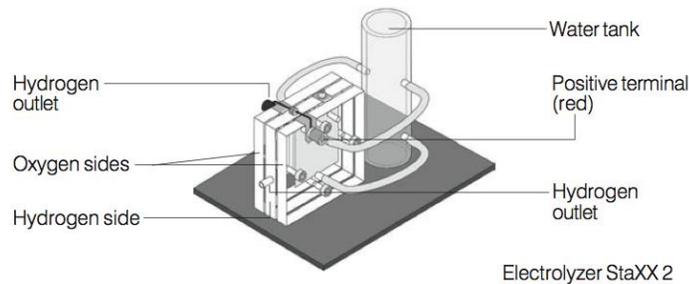
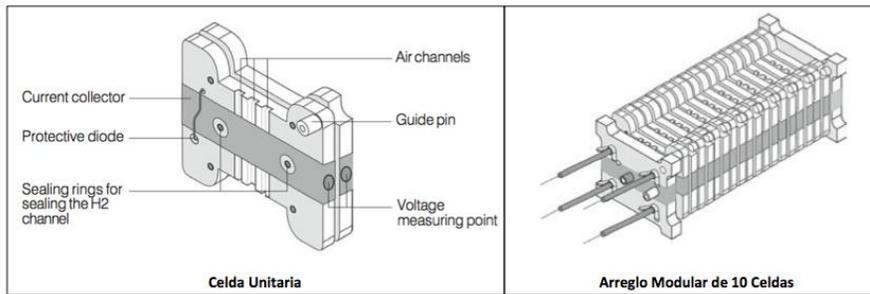


Figura 11: Electrolizador. Tomado de [5]

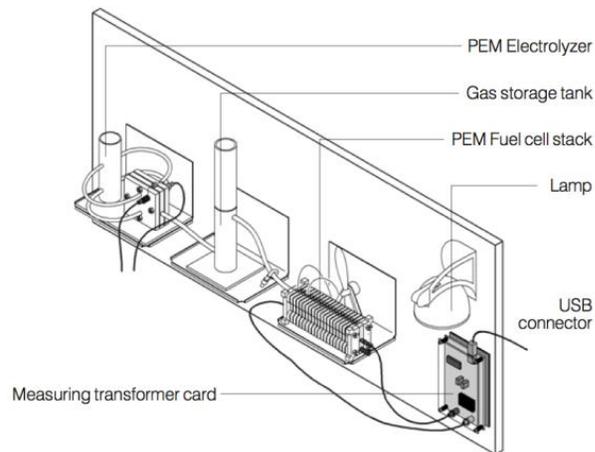
#### 3.2. Celdas tipo PEM

El siguiente bloque corresponde a las celdas tipo PEM, este bloque tiene como entrada el H<sub>2</sub> generado en el bloque anterior. El proceso que se lleva a cabo dentro de este bloque es la conversión de la energía almacenada en el hidrógeno a energía eléctrica. La salida de este bloque es corriente continua.



**Figura 12: Celdas tipo PEM. Tomado de [5]**

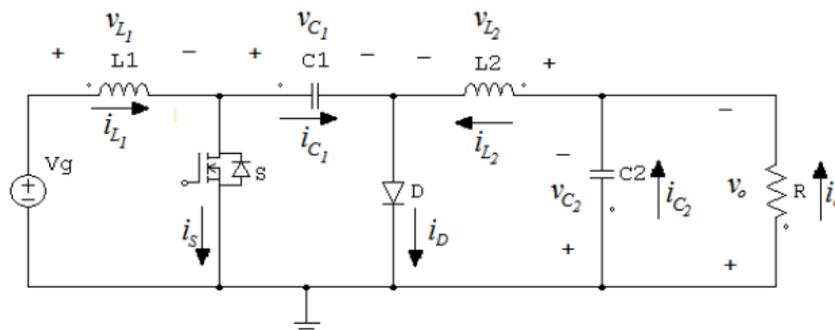
En la Figura 13 se pueden observar los dos primeros bloques del sistema interconectados, desde la generación de hidrógeno por medio de hidrólisis, hasta la generación de corriente continua en las celdas tipo PEM.



**Figura 13: Kit de H-tec, sistema interconectado. Tomado de [5]**

### 3.3. Convertidor

El tercer bloque, correspondiente al convertidor, tiene como entrada la corriente continua generada en las celdas tipo PEM y como salida la corriente continua que alimentará la carga. Este bloque es necesario ya que la tensión de celda tiene una gran variación, y para poder realizar la transformación de la energía eléctrica se hace imprescindible diseñar un convertidor CC/CC que optimice la recolección de energía de la celda y de esta forma obtener la máxima transferencia de energía en el proceso de alimentación. Para dicho diseño, es necesario conocer las principales características de operación eléctrica y de salida de las celdas PEM: resistividad, voltaje, comportamiento transitorio, presión, temperatura entre otras.



**Figura 14: Convertidor Ćuk. Tomado de [19]**

### 3.4. Carga

Por ultimo tenemos el bloque de la carga, este bloque tiene como entrada la salida del convertidor (corriente continua). Para realizar la caracterización del sistema en este bloque se varía la carga de  $10\Omega$  a  $400\Omega$  dentro de la experimentación en laboratorio. Para el diseño del convertidor y para la entrega final, se utilizará como carga dos bombillos LED que requieren una alimentación de 1 W cada uno. (Ver anexo 2)



**Figura 15: LED de 1W. Tomado de [20]**

## 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

### 4.1. Caracterización estática del electrolizador.

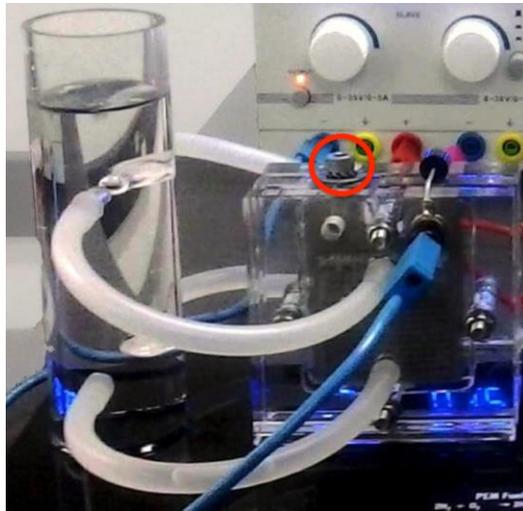
El primer procedimiento que se llevó a cabo fue la caracterización estática del electrolizador encargado de la producción de hidrógeno. Se hicieron pruebas en laboratorio que permitieran conocer y describir el comportamiento de este dispositivo, las cuales consistían en medir corriente, voltaje y temperatura en el electrolizador con el paso del tiempo.

Para tomar los datos se conectó la entrada del electrolizador a una fuente de voltaje constante y la salida al arreglo modular de celdas tipo PEM incluido en el kit de H-tec. Se mantuvo prendido el electrolizador por un largo periodo de tiempo, durante el cual se hacían mediciones simultáneas de corriente y temperatura. En el proceso se encontró que las mediciones variaban en el tiempo, por esta razón se mantuvo encendido el electrolizador hasta que se estabilizara la temperatura y así la corriente llegara al punto de equilibrio.

En la tabla 3 se pueden observar los datos obtenidos al realizar la caracterización del electrolizador. Los resultados describen el comportamiento del electrolizador en el tiempo. Las medias se tomaron con un voltaje DC constante en la entrada de 3,8V durante 65 minutos debido a que en este tiempo ya se observa un comportamiento estable del sistema. La temperatura fue medida por medio de un termómetro ubicado en todo momento sobre la placa metálica que se muestra en la Figura 16.

CORRIENTE DC (A)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (min)
4,000	26,20	1
3,970	27,80	2
3,960	29,70	3
3,950	30,08	4
3,940	32,50	5
3,940	33,10	6
3,940	34,60	7
3,910	35,10	8
3,900	36,10	9
3,895	36,30	10
3,889	37,30	11
3,882	37,80	12
3,865	40,00	15
3,846	41,60	20
3,830	42,60	25
3,819	43,50	30
3,810	43,70	35
3,799	43,90	40
3,791	44,10	45
3,789	44,50	50
3,785	45,40	55
3,783	45,60	60
3,783	45,60	65

**Tabla 3: Parámetros característicos del electrolizador**



**Figura 16: Electrolizador del kit H-tec.**

## **4.2. Caracterización de las celdas tipo PEM.**

La siguiente etapa en el trabajo de grado fue realizar la caracterización estática y dinámica del arreglo modular de celdas tipo PEM.

### **4.2.1. Caracterización estática de las celdas tipo PEM.**

En primer lugar se realizaron mediciones en laboratorio de datos que nos permitieran realizar la familia de curvas estáticas características de la celda de hidrógeno en estado estacionario (ver tabla 4 a tabla 16), estos resultados los utilizamos posteriormente para el diseño del convertidor. Para esto se alimentó el electrolizador con distintos voltajes, una vez el electrolizador se estabilizaba se tomaron medidas durante dos horas, de manera continua, por cada voltaje para obtener un flujo de hidrógeno constante. El voltaje en la entrada del electrolizador se varió de 3,25V a 4,5V con pasos de 0,25V, estos valores se establecieron con base en la hoja de especificaciones del sistema de celdas de combustible (ver anexo 1). Al variar el voltaje de entrada en el electrolizador se está variando el flujo de hidrógeno que entra a arreglo de celdas tipo PEM, ya que entre mayor energía se inyecte existe mayor producción de hidrógeno debido al proceso de electrólisis.

En cada una de las curvas se midió la corriente sobre el electrolizador, el flujo de hidrógeno en las celdas de combustible y se mantuvo controlado el voltaje de entrada para que fuera constante, luego se tomaron datos de voltaje, corriente y potencia sobre la carga. Se colocó una carga variable (reóstato) a la salida de la celda de hidrógeno y se midió la respuesta de voltaje y de corriente en un rango de 400 $\Omega$  a 10 $\Omega$  con pasos de 10 $\Omega$ , en los puntos donde la potencia se hacía máxima se hicieron pasos de 1 $\Omega$  para encontrar los puntos de máxima potencia tenidos en cuenta para el diseño del convertidor. Cada medición se hizo 3 veces, luego se sacaron datos estadísticos de los resultados obtenidos, se calcularon el promedio, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación para poder realizar un mejor análisis de los datos y del comportamiento de la celda. Los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto se muestran en la sección de análisis de resultados tablas 4 a 15.

La columna del promedio (valor medio) muestra el valor característico de los resultados obtenidos en cada una de las tres mediciones. La varianza corresponde a una medida de dispersión de los valores analizados y expresa la variabilidad de los datos, entre mayor sea este número existe mayor variabilidad, pero entre menor sea existe más homogeneidad. La desviación estándar es igual a la raíz cuadrada de la varianza, es también una medida de dispersión y expresa la desviación que presentan los datos analizados con respecto al promedio. Por último el coeficiente de variación es la relación entre la desviación estándar y el promedio, representa la variabilidad de los datos expresado como un porcentaje. Los datos obtenidos se presentan a continuación.

RESISTENCIA	1				2				3				PROMEDIO					
	ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR					
	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)		
	3,25	0,51	0,179		3,25	0,53	0,161		3,25	0,52	0,172		3,25	0,52	0,171			
	CELDA DE HIDRÓGENO				CELDA DE HIDRÓGENO				CELDA DE HIDRÓGENO				CELDA DE HIDRÓGENO					
$R_{OUT}$ (°)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)
250	6,88	29	199,52	7,10	29	205,90	7,10	29	205,90	7,10	29	205,90	7,03	29,00	203,77	7,03	29,00	203,77
240	6,86	30	205,80	7,06	31	218,86	7,06	31	218,86	7,06	31	218,86	6,99	30,67	214,51	6,99	30,67	214,51
230	6,83	31	211,73	7,03	32	224,96	7,03	32	224,96	7,02	32	224,64	6,96	31,67	220,44	6,96	31,67	220,44
220	6,82	32	218,24	6,99	33	230,67	6,99	33	230,67	6,98	33	230,34	6,93	32,67	226,42	6,93	32,67	226,42
210	6,78	33	223,74	6,97	34	236,98	6,97	34	236,98	6,95	34	236,30	6,90	33,67	232,34	6,90	33,67	232,34
200	6,75	35	236,25	6,94	36	249,84	6,94	36	249,84	6,92	36	249,12	6,87	35,67	245,07	6,87	35,67	245,07
190	6,72	36	241,92	6,90	37	255,30	6,90	37	255,30	6,89	37	254,93	6,84	36,67	250,72	6,84	36,67	250,72
180	6,70	38	254,60	6,86	39	267,54	6,86	39	267,54	6,86	39	267,54	6,81	38,67	263,23	6,81	38,67	263,23
170	6,66	40	266,40	6,83	41	280,03	6,83	41	280,03	6,82	41	279,62	6,77	40,67	275,35	6,77	40,67	275,35
160	6,62	42	278,04	6,79	44	298,76	6,79	44	298,76	6,78	44	298,32	6,73	43,33	291,71	6,73	43,33	291,71
150	6,58	45	296,10	6,74	46	310,04	6,74	46	310,04	6,74	46	310,04	6,69	45,67	305,39	6,69	45,67	305,39
140	6,54	48	313,92	6,71	49	328,79	6,71	49	328,79	6,69	49	327,81	6,65	48,67	323,51	6,65	48,67	323,51
130	6,50	51	331,50	6,66	52	346,32	6,66	52	346,32	6,63	52	344,76	6,60	51,67	340,86	6,60	51,67	340,86
120	6,45	55	354,75	6,61	56	370,16	6,61	56	370,16	6,58	56	368,48	6,55	55,67	364,46	6,55	55,67	364,46
110	6,39	59	377,01	6,54	61	398,94	6,54	61	398,94	6,53	61	398,33	6,49	60,33	391,43	6,49	60,33	391,43
100	6,34	65	412,10	6,49	66	428,34	6,49	66	428,34	6,45	66	425,70	6,43	65,67	422,05	6,43	65,67	422,05
90	6,29	71	446,59	6,39	73	466,47	6,39	73	466,47	6,38	72	459,36	6,35	72,00	457,47	6,35	72,00	457,47
80	6,21	79	490,59	6,33	80	506,40	6,33	80	506,40	6,30	80	504,00	6,28	79,67	500,33	6,28	79,67	500,33
70	6,02	86	517,72	6,02	86	517,72	6,02	86	517,72	6,09	87	529,83	6,04	86,33	521,76	6,04	86,33	521,76
65	5,95	92	547,40	5,93	91	539,63	5,93	91	539,63	5,99	92	551,08	5,96	91,67	546,04	5,96	91,67	546,04
64	5,93	93	551,49	5,91	92	543,72	5,91	92	543,72	5,96	93	554,28	5,93	92,67	549,83	5,93	92,67	549,83
63	5,91	94	555,54	5,89	93	547,77	5,89	93	547,77	5,93	94	557,42	5,91	93,67	553,58	5,91	93,67	553,58
62	5,89	95	559,55	5,88	95	558,60	5,88	95	558,60	5,90	95	560,50	5,89	95,00	559,55	5,89	95,00	559,55
61	5,87	96	563,52	5,86	96	562,56	5,86	96	562,56	5,84	96	560,64	5,86	96,00	562,24	5,86	96,00	562,24
60	5,84	97	566,48	5,83	97	565,51	5,83	97	565,51	5,75	97	557,75	5,81	97,00	563,25	5,81	97,00	563,25
59	5,82	99	576,18	5,79	98	567,42	5,79	98	567,42	5,67	97	549,99	5,76	98,00	564,53	5,76	98,00	564,53
58	5,74	99	568,26	5,71	98	559,58	5,71	98	559,58	5,57	96	534,72	5,67	97,67	554,19	5,67	97,67	554,19
57	5,64	100	564,00	5,60	99	554,40	5,60	99	554,40	5,50	96	528,00	5,58	98,33	548,80	5,58	98,33	548,80
56	5,55	100	555,00	5,49	99	543,51	5,49	99	543,51	5,38	96	516,48	5,47	98,33	538,33	5,47	98,33	538,33
55	5,44	100	544,00	5,41	100	541,00	5,41	100	541,00	5,30	96	508,80	5,38	98,67	531,27	5,38	98,67	531,27
50	4,93	100	493,00	4,77	97	462,69	4,77	97	462,69	4,73	96	454,08	4,81	97,67	469,92	4,81	97,67	469,92
40	4,28	108	462,24	4,13	104	429,52	4,13	104	429,52	4,05	102	413,10	4,15	104,67	434,95	4,15	104,67	434,95
30	3,20	108	345,60	3,19	108	344,52	3,19	108	344,52	3,14	106	332,84	3,18	107,33	340,99	3,18	107,33	340,99
20	2,38	120	285,60	2,30	116	266,80	2,30	116	266,80	2,26	114	257,64	2,31	116,67	270,01	2,31	116,67	270,01
!"	!#\$	!%&	!&'#(	!#\$(	!\$)	!&#%&	!#\$(	!\$)	!&#%&	!#\$(	!\$)	!&'#(	!#\$(	!\$)	!&'#(	!#\$(	!\$)	!&'#(

Tabla 4. Parámetros medidos con 3,25V de entrada en el electrolizador.

VARIANZA			DESVIACION ESTANDAR			COEFICIENTE DE VARIACION (%)		
ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR		
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)
0	6,67E-05	5,11E-05	0	0,00816	0,00715	0	1,57019	4,18803
CELDA DE HIDROGENO			CELDA DE HIDROGENO			CELDA DE HIDROGENO		
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA
0,01076	0	9,04542	0,10371	0	3,00756	1,47593	0	1,47593
0,00889	0,22222	37,90302	0,09428	0,47140	6,15654	1,34815	1,53719	2,87009
0,00847	0,22222	37,97816	0,09201	0,47140	6,16264	1,32205	1,48865	2,79557
0,00607	0,22222	33,44709	0,07789	0,47140	5,78335	1,12394	1,44308	2,55429
0,00727	0,22222	37,05707	0,08524	0,47140	6,08745	1,23543	1,40021	2,62006
0,00682	0,22222	38,98260	0,08524	0,47140	6,24360	1,24083	1,32169	2,54768
0,00569	0,22222	37,20969	0,08260	0,47140	6,22202	1,20814	1,28565	2,48169
0,00607	0,22222	40,07927	0,07542	0,47140	6,09997	1,10810	1,21915	2,31738
0,00607	0,88889	93,42116	0,07789	0,47140	6,33082	1,15050	1,15919	2,29919
0,00569	0,22222	43,18302	0,07789	0,94281	9,66546	1,15734	2,17571	3,31342
0,00576	0,22222	46,11216	0,07542	0,47140	6,57138	1,12799	1,03227	2,15178
0,00482	0,22222	44,21040	0,07587	0,47140	6,79059	1,14140	0,96864	2,09906
0,00482	0,22222	47,64482	0,06944	0,47140	6,64909	1,05269	0,91240	1,95068
0,00469	0,88889	103,98216	0,06944	0,47140	6,90252	1,06073	0,84683	1,89389
0,00402	0,22222	50,62969	0,06848	0,94281	10,19716	1,05563	1,56267	2,60513
0,00202	0,66667	67,64882	0,06342	0,47140	7,11545	0,98684	0,71787	1,68594
0,00260	0,22222	48,39380	0,04497	0,81650	8,22489	0,70780	1,13402	1,79790
0,00109	0,22222	32,58936	0,05099	0,47140	6,95657	0,81195	0,59172	1,39040
0,00062	0,22222	22,77976	0,03300	0,47140	5,70871	0,54603	0,54603	1,09413
0,00042	0,22222	19,96340	0,02494	0,47140	4,77281	0,41876	0,51426	0,87408
0,00027	0,22222	17,44776	0,02055	0,47140	4,46804	0,34632	0,50871	0,81262
0,00007	0,00000	0,60167	0,01633	0,47140	4,17705	0,27631	0,50328	0,75456
0,00016	0,00000	1,43360	0,00816	0,00000	0,77567	0,13862	0,00000	0,13862
0,00162	0,00000	15,26349	0,01247	0,00000	1,19733	0,21296	0,00000	0,21296
0,00420	0,66667	118,49540	0,04028	0,00000	3,90685	0,69363	0,00000	0,69363
0,00549	1,55556	202,03262	0,06481	0,81650	10,88556	1,12513	0,83316	1,92825
0,00347	2,88889	231,68000	0,07409	1,24722	14,21382	1,30588	1,27702	2,56481
0,00496	2,88889	260,71460	0,05888	1,69967	15,22104	1,05517	1,72848	2,77351
0,00362	3,55556	253,87556	0,07040	1,69967	16,14666	1,28616	1,72848	2,99940
0,00747	2,88889	278,62162	0,06018	1,88562	15,93347	1,11799	1,91110	2,99915
0,00909	6,22222	417,21716	0,08641	1,69967	16,61916	1,79646	1,74022	3,55206
0,00069	0,88889	33,37849	0,09534	2,49444	20,42589	2,29540	2,38322	4,69611
0,00249	6,22222	135,45636	0,02625	0,94281	5,77741	0,82623	0,87839	1,69432
"#""""(	1,55556	*# 8988+	0,04989	2,49444	11,63857	2,15657	2,13809	4,31037
			"#"%&	1,24722	(#*(&	"#*+(\$	0,94248	#*+5%
								R <sub>OUT</sub> (! )
								250
								240
								230
								220
								210
								200
								190
								180
								170
								160
								150
								140
								130
								120
								110
								100
								90
								80
								70
								65
								64
								63
								62
								61
								60
								59
								58
								57
								56
								55
								50
								40
								30
								20
								!

Tabla 5: Datos estadísticos cur va de 3,25V.

RESISTENCIA R <sub>OUT</sub> (Ω)	ELECTROLIZADOR			CELDA DE HIDRÓGENO		
	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)
	3,52	0,93	0,294			
300	7,15	25	178,75	7,22	25	180,50
290	7,13	26	185,38	7,18	26	186,68
280	7,10	26	184,60	7,14	26	185,64
270	7,08	27	191,16	7,11	27	191,97
260	7,06	28	197,68	7,09	28	198,52
250	7,03	29	203,87	7,06	29	204,74
240	7,01	30	210,30	7,03	30	210,90
230	6,98	32	223,36	7,01	32	224,32
220	6,95	33	229,35	6,98	33	230,34
210	6,92	34	235,28	6,94	34	235,96
200	6,89	36	248,04	6,91	36	248,76
190	6,87	37	254,19	6,88	37	254,56
180	6,83	39	266,37	6,85	39	267,15
170	6,80	41	278,80	6,82	41	279,62
160	6,76	44	297,44	6,78	44	298,32
150	6,72	46	309,12	6,74	46	310,04
140	6,68	49	327,32	6,69	49	327,81
130	6,61	52	343,72	6,62	52	344,24
120	6,57	56	367,92	6,57	56	367,92
110	6,51	61	397,11	6,52	61	397,72
100	6,46	64	413,44	6,46	66	426,36
90	6,38	72	459,36	6,38	72	459,36
80	6,28	80	502,40	6,29	80	503,20
70	6,17	89	549,13	6,17	89	549,13
60	6,05	102	617,10	6,06	102	618,12
50	5,89	119	700,91	5,90	119	702,10
40	5,59	139	777,01	5,70	142	809,40
35	5,46	157	857,22	5,56	158	878,48
34	5,44	160	870,40	5,53	162	895,86
33	5,41	164	887,24	5,47	166	908,02
32	5,37	168	902,16	5,43	169	917,67
31	5,33	173	922,09	5,24	172	901,28
30	5,28	177	934,56	5,19	172	892,68
29	5,18	179	927,22	5,03	174	875,22
28	5,03	180	905,40	4,85	174	843,90
27	4,88	181	883,28	4,73	175	827,75
26	4,69	180	844,20	4,55	175	796,25
25	4,50	181	814,50	4,34	175	759,50
20	3,73	188	701,24	3,72	187	695,64
!	#§ "	#% "	& ( \$% "	#§% "	#% "	& ) \$! "

ELECTROLIZADOR			CELDA DE HIDRÓGENO		
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)
3,52	0,94	0,357			
7,22	25	180,50	7,22	25	180,50
7,18	26	186,68	7,18	26	186,68
7,14	26	185,64	7,14	26	185,64
7,11	27	191,97	7,11	27	191,97
7,09	28	198,52	7,09	28	198,52
7,06	29	204,74	7,06	29	204,74
7,03	30	210,90	7,03	30	210,90
7,01	32	224,32	7,01	32	224,32
6,98	33	230,34	6,98	33	230,34
6,94	34	235,96	6,94	34	235,96
6,91	36	248,76	6,91	36	248,76
6,88	37	254,56	6,88	37	254,56
6,85	39	267,15	6,85	39	267,15
6,82	41	279,62	6,82	41	279,62
6,78	44	298,32	6,78	44	298,32
6,74	46	310,04	6,74	46	310,04
6,69	49	327,81	6,69	49	327,81
6,62	52	344,24	6,62	52	344,24
6,57	56	367,92	6,57	56	367,92
6,52	61	397,72	6,52	61	397,72
6,46	66	426,36	6,46	66	426,36
6,38	72	459,36	6,38	72	459,36
6,29	80	503,20	6,29	80	503,20
6,17	89	549,13	6,17	89	549,13
6,06	102	618,12	6,06	102	618,12
5,90	119	702,10	5,90	119	702,10
5,70	142	809,40	5,66	143	809,38
5,56	158	878,48	5,58	160	892,80
5,53	162	895,86	5,57	164	913,48
5,47	166	908,02	5,51	167	920,17
5,43	169	917,67	5,46	170	928,20
5,24	172	901,28	5,43	175	950,25
5,19	172	892,68	5,25	176	924,00
5,03	174	875,22	5,07	176	892,32
4,85	174	843,90	4,92	177	870,84
4,73	175	827,75	4,78	177	846,06
4,55	175	796,25	4,65	178	827,70
4,34	175	759,50	4,43	178	788,54
3,72	187	695,64	3,66	184	673,44
#§% "	#% "	& ) \$! "	#§ " "	#% "	& " \$% "

ELECTROLIZADOR			CELDA DE HIDRÓGENO		
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)
3,52	0,92	0,345			
7,22	25	180,50	7,22	25	180,50
7,18	26	186,68	7,18	26	186,68
7,14	27	192,78	7,14	27	192,78
7,11	27	191,97	7,11	27	191,97
7,09	28	198,52	7,09	28	198,52
7,06	29	204,74	7,06	29	204,74
7,03	30	210,90	7,03	30	210,90
7,01	32	224,32	7,01	32	224,32
6,98	33	230,34	6,98	33	230,34
6,94	34	235,96	6,94	34	235,96
6,91	36	248,76	6,91	36	248,76
6,88	37	254,56	6,88	37	254,56
6,85	39	267,15	6,85	39	267,15
6,82	41	279,62	6,82	41	279,62
6,78	44	298,32	6,78	44	298,32
6,74	46	309,58	6,73	46	309,58
6,69	49	328,30	6,70	49	328,30
6,65	52	345,80	6,63	52	344,59
6,58	56	368,48	6,57	56	368,11
6,53	61	398,33	6,52	61	397,72
6,46	66	426,36	6,46	65,33	422,05
6,38	72	459,36	6,38	72,00	459,36
6,29	80	503,20	6,29	80,00	502,93
6,18	90	556,20	6,17	89,33	551,49
6,06	102	618,12	6,06	102,00	617,78
5,90	119	702,10	5,90	119,00	701,70
5,66	143	809,38	5,65	141,33	798,60
5,58	160	892,80	5,53	158,33	876,17
5,57	164	913,48	5,51	162,00	893,25
5,51	167	920,17	5,46	165,67	905,14
5,46	170	928,20	5,42	169,00	916,01
5,43	175	950,25	5,33	173,33	924,54
5,25	176	924,00	5,24	175,00	917,08
5,07	176	892,32	5,09	176,33	898,25
4,92	177	870,84	4,93	177,00	873,38
4,78	177	846,06	4,80	177,67	852,36
4,65	178	827,70	4,63	177,67	822,72
4,43	178	788,54	4,42	178,00	787,51
3,66	184	673,44	3,70	186,33	690,11
#§ " "	#% "	& " \$% "	#§ " "	#% " +	& * §% "

Tabla 6: Parámetros medidos con 3,5V de entrada en el electrolizador.

VARIANZA			DESVIACIÓN ESTANDAR			COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)		
ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR		
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)
0	6,67E-05	7,44E-04	0	0,00816	0,02728	0	0,87795	8,21464

CELDA DE HIDRÓGENO				CELDA DE HIDRÓGENO				RESISTENCIA			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> ( $\Omega$ )	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> ( $\Omega$ )	V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> ( $\Omega$ )
0,00109	0	0,68056	300	0,03300	0	0,82496	300	0,45852	0	0,45852	300
0,00056	0,00000	0,37556	290	0,02357	0,00000	0,61283	290	0,32904	0,00000	0,32904	290
0,00036	0,22222	13,21929	280	0,01886	0,47140	3,63583	280	0,26459	1,79014	1,93732	280
0,00020	0,00000	0,14580	270	0,01414	0,00000	0,38184	270	0,19919	0,00000	0,19919	270
0,00020	0,00000	0,15680	260	0,01414	0,00000	0,39598	260	0,19975	0,00000	0,19975	260
0,00020	0,00000	0,16820	250	0,01414	0,00000	0,41012	250	0,20060	0,00000	0,20060	250
0,00009	0,00000	0,08000	240	0,00943	0,00000	0,28284	240	0,13424	0,00000	0,13424	240
0,00020	0,00000	0,20480	230	0,01414	0,00000	0,45255	230	0,20203	0,00000	0,20203	230
0,00020	0,00000	0,21780	220	0,01414	0,00000	0,46669	220	0,20290	0,00000	0,20290	220
0,00009	0,00000	0,10276	210	0,00943	0,00000	0,32056	210	0,13598	0,00000	0,13598	210
0,00009	0,00000	0,11520	200	0,00943	0,00000	0,33941	200	0,13657	0,00000	0,13657	200
0,00002	0,00000	0,03042	190	0,00471	0,00000	0,17442	190	0,06855	0,00000	0,06855	190
0,00009	0,00000	0,13520	180	0,00943	0,00000	0,36770	180	0,13777	0,00000	0,13777	180
0,00009	0,00000	0,14942	170	0,00943	0,00000	0,38655	170	0,13838	0,00000	0,13838	170
0,00009	0,00000	0,17209	160	0,00943	0,00000	0,41484	160	0,13919	0,00000	0,13919	160
0,00007	0,00000	0,14107	150	0,00816	0,00000	0,37559	150	0,12132	0,00000	0,12132	150
0,00007	0,00000	0,16007	140	0,00816	0,00000	0,40008	140	0,12205	0,00000	0,12205	140
0,00029	0,00000	0,78116	130	0,01700	0,00000	0,88383	130	0,25649	0,00000	0,25649	130
0,00002	0,00000	0,06969	120	0,00471	0,00000	0,26399	120	0,07171	0,00000	0,07171	120
0,00007	0,00000	0,24807	110	0,00816	0,00000	0,49806	110	0,12523	0,00000	0,12523	110
0,00000	0,88889	37,09476	100	0,00000	0,94281	6,09055	100	0,00000	1,44308	1,44308	100
0,00000	0,00000	0,00000	90	0,00000	0,00000	0,00000	90	0,00000	0,00000	0,00000	90
0,00002	0,00000	0,14222	80	0,00471	0,00000	0,37712	80	0,07498	0,00000	0,07498	80
0,00002	0,22222	11,10776	70	0,00471	0,47140	3,33283	70	0,07636	0,52769	0,60434	70
0,00002	0,00000	0,23120	60	0,00471	0,00000	0,48083	60	0,07783	0,00000	0,07783	60
0,00002	0,00000	0,31469	50	0,00471	0,00000	0,56097	50	0,07994	0,00000	0,07994	50
0,00207	2,88889	232,99216	40	0,04546	1,69967	15,26408	40	0,80461	1,20260	1,91136	40
0,00276	1,55556	213,66516	35	0,05249	1,24722	14,61729	35	0,94868	0,78772	1,66832	35
0,00296	2,66667	312,72916	34	0,05437	1,63299	17,68415	34	0,98606	1,00802	1,97976	34
0,00169	1,55556	184,86842	33	0,04110	1,24722	13,59663	33	0,75222	0,75285	1,50215	33
0,00140	0,66667	114,39140	32	0,03742	0,81650	10,69539	32	0,69034	0,48313	1,16761	32
0,00602	1,55556	402,67807	31	0,07760	1,24722	20,06684	31	1,45506	0,71955	2,17047	31
0,00140	4,66667	316,26560	30	0,03742	2,16025	17,78386	30	0,71406	1,23443	1,93918	30
0,00402	4,22222	468,26889	29	0,06342	2,05480	21,63952	29	1,24518	1,16530	2,40907	29
0,00549	6,00000	633,60080	28	0,07409	2,44949	25,17143	28	1,50176	1,38389	2,88207	28
0,00389	6,22222	533,79616	27	0,06236	2,49444	23,10403	27	1,30009	1,40400	2,71058	27
0,00347	4,22222	395,61722	26	0,05888	2,05480	19,89013	26	1,27167	1,15655	2,41762	26
0,00429	6,00000	504,69369	25	0,06549	2,44949	22,46539	25	1,48055	1,37612	2,85270	25
0,00096	2,88889	144,11556	20	0,03091	1,69967	12,00481	20	0,83471	0,91217	1,73956	20
0,00002	3,55556	12,74936	1"	0,00471	1,88562	3,57062	1"	0,22484	0,90800	0,82007	1"

Tabla 7: Datos estadísticos curva de 3,5V.



VARIANZA			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE	CORRIENTE	FLUJO H2	
IN (V)	IN (A)	(cc/s)	
0	8,00E-04	2,25E-03	

CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	
0,00389	0	2,62889	
0,00296	0,22222	21,23016	
0,00282	0,22222	22,72682	
0,00207	0,22222	21,09007	
0,00249	0,22222	23,15016	
0,00296	0,22222	22,57429	
0,00309	0,22222	22,52942	
0,00276	0,22222	21,45056	
0,00296	0,22222	26,19869	
0,00229	0,22222	24,67982	
0,00216	0,22222	24,71660	
0,00140	0,66667	50,17740	
0,00229	0,22222	26,61127	
0,00229	0,22222	23,03242	
0,00247	0,22222	29,29500	
0,00229	0,00000	5,05616	
0,00296	0,22222	34,90460	
0,00309	0,22222	36,96016	
0,00327	0,22222	40,84436	
0,00269	0,22222	39,42720	
0,00327	0,66667	74,44169	
0,00296	1,55556	126,00569	
0,00260	0,88889	66,61682	
0,00247	1,55556	145,16336	
0,00229	0,66667	94,68562	
0,00436	1,55556	232,23316	
0,00482	2,66667	366,29496	
0,00436	4,22222	514,33020	
0,00229	6,22222	638,73936	
0,00216	9,55556	794,06136	
0,00407	8,22222	1004,08927	
0,00276	8,00000	841,58302	
0,00176	20,22222	1027,53342	
0,00429	0,88889	615,32062	
0,00296	14,22222	1228,45860	
0,00056	18,00000	708,63576	
0,00320	16,22222	1248,77760	
0,00062	12,66667	426,47096	
0,00180	9,55556	620,63696	
0,00222	8,00000	637,00702	
0,00349	5,55556	187,02562	

DESVIACIÓN ESTANDAR			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE	CORRIENTE	FLUJO H2	
IN (V)	IN (A)	(cc/s)	
0	0,02828	0,04746	

CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	
0,06236	0	1,62138	
0,05437	0,47140	4,60762	
0,05312	0,47140	4,76727	
0,04546	0,47140	4,59239	
0,04989	0,47140	4,81146	
0,05437	0,47140	4,75124	
0,05558	0,47140	4,74652	
0,05249	0,47140	4,63147	
0,05437	0,47140	5,11847	
0,04784	0,47140	4,96788	
0,04643	0,47140	4,97158	
0,03742	0,81650	7,08360	
0,04784	0,47140	5,15861	
0,04784	0,47140	4,79921	
0,04967	0,47140	5,41249	
0,04784	0,00000	2,24859	
0,05437	0,47140	5,90801	
0,05558	0,47140	6,07949	
0,05715	0,47140	6,39096	
0,05185	0,47140	6,27911	
0,05715	0,81650	8,62796	
0,05437	1,24722	11,22523	
0,05099	0,94281	8,16191	
0,04967	1,24722	12,04838	
0,04784	0,81650	9,73065	
0,06600	1,24722	15,23920	
0,06944	1,63299	19,13883	
0,06600	2,05480	22,67885	
0,04784	2,49444	25,27329	
0,04643	3,09121	28,17909	
0,06377	2,86744	31,68737	
0,05249	2,82843	29,01005	
0,04190	4,49691	32,05516	
0,06549	0,94281	24,80566	
0,05437	3,77124	35,04937	
0,02357	4,24264	26,62021	
0,05657	4,02768	35,33805	
0,02494	3,55903	20,65117	
0,04243	3,09121	24,91259	
0,04714	2,82843	25,23900	
0,05907	2,35702	13,67573	

COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE	CORRIENTE	FLUJO H2	
IN (V)	IN (A)	(cc/s)	
0	2,39697	10,63147	

CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> (l )
0,86452	0	0,86452	300
0,75577	1,72465	2,34321	290
0,74127	1,64443	2,32021	280
0,63670	1,64443	2,24347	270
0,70101	1,53719	2,20440	260
0,76642	1,50448	2,13753	250
0,78648	1,45795	2,07719	240
0,74529	1,41421	1,97257	230
0,77517	1,35982	2,10504	220
0,68477	1,32169	1,99342	210
0,66771	1,25152	1,89806	200
0,54070	2,09358	2,62443	190
0,69471	1,15919	1,84183	180
0,69673	1,11355	1,65090	170
0,72823	1,05538	1,77662	160
0,70495	0,00000	0,70495	150
0,80700	0,93040	1,73078	140
0,83117	0,87839	1,69403	130
0,86076	0,81746	1,66895	120
0,78886	0,76444	1,54894	110
0,87795	1,21865	1,97795	100
0,84461	1,67787	2,34589	90
0,80553	1,15446	1,57882	80
0,79592	1,36060	2,10615	70
0,78602	0,79272	1,55203	60
1,10609	1,02793	2,10476	50
1,20629	1,12620	2,29256	40
1,21243	1,12489	2,28056	30
0,92064	0,95817	1,86797	20
0,90976	1,14348	2,04234	19
1,26529	1,02165	2,23982	18
1,06622	0,97197	2,02466	17
0,86629	1,47601	2,17514	16
1,39736	0,29341	1,64709	15
1,18787	1,14165	2,31803	14
0,53407	1,25522	1,78443	13
1,40021	1,18229	2,56720	12
0,67845	1,04370	1,64706	11
1,25522	0,89774	2,14030	10
1,49336	0,81277	2,29727	9
2,00453	0,67279	1,32494	8

Tabla 9: Datos estadísticos curva de 3,75V.

RESISTENCIA	1				2				3				PROMEDIO			
	ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR			
	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2m (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA m(W)
300	7,25	25	181,25	7,46	25	186,50	7,48	25	187,00	7,40	25,00	184,92	7,40	25,00	184,92	
290	7,24	26	188,24	7,42	26	192,92	7,42	26	192,92	7,36	26,00	191,36	7,36	26,00	191,36	
280	7,23	27	195,21	7,39	27	199,53	7,40	27	199,80	7,34	27,00	198,18	7,34	27,00	198,18	
270	7,21	27	194,67	7,37	28	206,36	7,37	28	206,36	7,32	27,67	202,46	7,32	27,67	202,46	
260	7,18	28	201,04	7,33	29	212,57	7,33	29	212,57	7,28	28,67	208,73	7,28	28,67	208,73	
250	7,16	29	207,64	7,31	30	219,30	7,31	30	219,30	7,26	29,67	215,41	7,26	29,67	215,41	
240	7,15	30	214,50	7,29	31	225,99	7,26	31	225,06	7,23	30,67	221,85	7,23	30,67	221,85	
230	7,13	31	221,03	7,25	32	232,00	7,24	32	231,68	7,21	31,67	228,24	7,21	31,67	228,24	
220	7,09	33	233,97	7,22	33	238,26	7,22	33	238,26	7,18	33,00	236,83	7,18	33,00	236,83	
210	7,07	34	240,38	7,20	35	252,00	7,18	35	251,30	7,15	34,67	247,89	7,15	34,67	247,89	
200	7,04	35	246,40	7,16	36	257,76	7,15	36	257,40	7,12	35,67	253,85	7,12	35,67	253,85	
190	7,01	37	259,37	7,14	38	271,32	7,13	38	270,94	7,09	37,67	267,21	7,09	37,67	267,21	
180	6,98	39	272,22	7,10	40	284,00	7,08	40	283,20	7,05	39,67	279,81	7,05	39,67	279,81	
170	6,95	41	284,95	7,07	42	296,94	7,06	42	296,52	7,03	41,67	292,80	7,03	41,67	292,80	
160	6,91	43	297,13	7,02	44	308,88	7,01	44	308,44	6,98	43,67	304,82	6,98	43,67	304,82	
150	6,89	46	316,94	6,99	47	328,53	6,98	47	328,06	6,95	46,67	324,51	6,95	46,67	324,51	
140	6,83	50	341,50	6,93	50	346,50	6,93	50	346,50	6,90	50,00	344,83	6,90	50,00	344,83	
130	6,80	53	360,40	6,90	53	365,70	6,90	53	365,70	6,87	53,00	363,93	6,87	53,00	363,93	
120	6,75	56	378,00	6,84	57	389,88	6,84	57	389,88	6,81	56,67	385,92	6,81	56,67	385,92	
110	6,69	61	408,09	6,78	62	420,36	6,77	62	419,74	6,75	61,67	416,06	6,75	61,67	416,06	
100	6,62	67	443,54	6,71	67	449,57	6,71	67	449,57	6,68	67,00	447,56	6,68	67,00	447,56	
90	6,54	73	477,42	6,65	74	492,10	6,65	74	492,10	6,61	73,67	487,21	6,61	73,67	487,21	
80	6,45	81	522,45	6,54	82	536,28	6,54	82	536,28	6,51	81,67	531,67	6,51	81,67	531,67	
70	6,35	91	577,85	6,44	92	592,48	6,43	92	591,56	6,41	91,67	587,30	6,41	91,67	587,30	
60	6,23	104	647,92	6,29	106	666,74	6,28	106	665,68	6,27	105,33	660,11	6,27	105,33	660,11	
50	6,07	121	734,47	6,15	123	756,45	6,15	123	756,45	6,12	122,33	749,12	6,12	122,33	749,12	
40	5,86	147	861,42	5,93	149	883,57	5,92	149	882,08	5,90	148,33	875,69	5,90	148,33	875,69	
30	5,56	185	1028,60	5,61	186	1043,46	5,63	187	1052,81	5,60	186,00	1041,62	5,60	186,00	1041,62	
20	5,24	258	1351,92	5,38	268	1441,84	5,45	273	1487,85	5,36	266,33	1427,20	5,36	266,33	1427,20	
19	5,12	271	1387,52	5,27	277	1459,79	5,35	279	1492,65	5,25	275,67	1446,65	5,25	275,67	1446,65	
18	5,02	279	1400,58	5,16	258	1331,28	5,22	291	1519,02	5,13	276,00	1416,96	5,13	276,00	1416,96	
17	4,91	290	1423,90	5,05	301	1520,05	5,13	303	1554,39	5,03	298,00	1499,45	5,03	298,00	1499,45	
16	4,82	302	1455,64	4,91	313	1536,83	4,98	313	1558,74	4,90	309,33	1517,07	4,90	309,33	1517,07	
15	4,64	309	1433,76	4,86	325	1579,50	4,90	330	1617,00	4,80	321,33	1543,42	4,80	321,33	1543,42	
14	4,58	330	1511,40	4,70	341	1609,70	4,72	341	1609,52	4,67	337,33	1574,54	4,67	337,33	1574,54	
13	4,45	344	1530,80	4,54	355	1611,70	4,63	355	1643,65	4,54	351,33	1595,38	4,54	351,33	1595,38	
12	4,33	358	1550,14	4,39	361	1584,79	4,35	364	1583,40	4,36	361,00	1572,78	4,36	361,00	1572,78	
11	4,09	367	1501,03	4,11	370	1520,70	4,13	371	1532,23	4,11	369,33	1517,99	4,11	369,33	1517,99	
10	3,79	374	1417,46	3,81	381	1451,61	3,81	381	1451,61	3,80	378,67	1440,23	3,80	378,67	1440,23	
9	3,39	386	1308,54	3,40	390	1326,00	3,41	391	1333,31	3,40	389,00	1322,62	3,40	389,00	1322,62	
8	3,18	392	1246,56	3,22	397	1278,34	3,22	397	1278,34	3,21	395,33	1267,75	3,21	395,33	1267,75	

Tabla 10: Parámetros medidos con 4V de entrada en el electrolizador.

VARIANZA				DESVIACION ESTANDAR				COEFICIENTE DE VARIACION (%)				
ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				ELECTROLIZADOR				
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	POTENCIA	RESISTENCIA R <sub>OUT</sub> (°)
0	3.47E-03	2.80E-04		0	0.05888	0.01675		0	4.17577	3.63900		
CELDA DE HIDROGENO												
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> (°)
0.01082	0	6.76389	0.10403	0	2.60075	0.08485	0.00000	2.20617	1.40644	0	1.40644	300
0.00720	0.00000	4.86720	0.07789	0.00000	2.10300	0.07542	0.47140	5.1072	1.15289	0.00000	1.15289	290
0.00607	0.22222	30.36802	0.07071	0.47140	5.43529	0.07071	0.47140	5.49658	1.03086	1.70387	2.72184	280
0.00500	0.22222	29.54242	0.06018	0.47140	5.21108	0.06018	0.47140	5.21108	0.97130	1.64443	2.60402	260
0.00362	0.22222	30.21236	0.05437	0.47140	5.09756	0.05437	0.47140	5.09756	0.97398	1.58900	2.55164	250
0.00296	0.22222	25.98509	0.06128	0.00000	2.02233	0.06128	0.00000	2.02233	0.83205	1.53719	2.34892	240
0.00376	0.00000	4.08980	0.05715	0.47140	5.32041	0.05715	0.47140	5.32041	0.75437	1.48865	2.23345	230
0.00327	0.22222	28.30676	0.05437	0.47140	5.27235	0.05437	0.47140	5.27235	0.85391	0.00000	0.85391	220
0.00296	0.22222	27.79769	0.05907	0.47140	5.54589	0.05907	0.47140	5.54589	0.79937	1.35982	2.14625	210
0.00276	0.22222	28.88542	0.05249	0.47140	5.37452	0.05249	0.47140	5.37452	0.76391	1.32169	2.07693	200
0.00296	0.22222	30.86682	0.05437	0.47140	5.55579	0.05437	0.47140	5.55579	0.83271	1.25152	2.07548	190
0.00247	0.22222	29.57469	0.04967	0.47140	5.43826	0.04967	0.47140	5.43826	0.74424	1.18841	1.92080	180
0.00222	0.22222	28.68927	0.04497	0.47140	5.35624	0.04497	0.47140	5.35624	0.77370	1.13137	1.89745	170
0.00222	0.00000	5.55556	0.04714	0.00000	2.35702	0.04714	0.00000	2.35702	0.71154	1.07955	1.78411	160
0.00222	0.00000	6.24222	0.04714	0.00000	2.49844	0.04714	0.00000	2.49844	0.64673	1.01015	1.65056	150
0.00180	0.22222	31.36320	0.04243	0.47140	5.60029	0.04243	0.47140	5.60029	0.68353	0.00000	0.68353	140
0.00162	0.22222	31.85109	0.04028	0.47140	5.64368	0.04028	0.47140	5.64368	0.68651	0.00000	0.68651	130
0.00180	0.00000	8.08020	0.04243	0.00000	2.84257	0.04243	0.00000	2.84257	0.62300	0.83189	1.45115	120
0.00269	0.22222	47.88942	0.05185	0.47140	6.92022	0.05185	0.47140	6.92022	0.59699	0.76444	1.35645	110
0.00180	0.22222	42.50420	0.04243	0.47140	6.51952	0.04243	0.47140	6.51952	0.63513	0.00000	0.63513	100
0.00162	0.22222	44.76082	0.04028	0.47140	6.69035	0.04028	0.47140	6.69035	0.78409	0.63992	1.42039	90
0.00069	0.88889	74.52596	0.02625	0.94281	8.63284	0.02625	0.94281	8.63284	0.65171	0.57723	1.22624	80
0.00142	0.88889	107.36009	0.03771	0.94281	10.36147	0.03771	0.94281	10.36147	0.62867	0.51426	1.13918	70
0.00096	0.88889	102.18647	0.03091	0.94281	10.10873	0.03091	0.94281	10.10873	0.41883	0.89507	1.30778	60
0.00087	0.66667	99.37402	0.02944	0.81650	9.96865	0.02944	0.81650	9.96865	0.61588	0.77069	1.38315	50
0.00762	38.88889	3186.61016	0.08731	6.23610	56.45007	0.08731	6.23610	56.45007	0.52364	0.63560	1.15437	40
0.00909	11.55556	1928.33882	0.09534	3.39935	43.91285	0.09534	3.39935	43.91285	0.52570	0.43898	0.95703	30
0.00702	186.00000	6008.53680	0.08380	13.63818	77.51475	0.08380	13.63818	77.51475	1.62984	2.34146	3.95529	20
0.00827	32.66667	3050.18869	0.09092	5.71548	55.22851	0.09092	5.71548	55.22851	1.81707	1.23314	3.03548	19
0.00429	26.88889	1966.83047	0.06549	5.18545	44.34896	0.06549	5.18545	44.34896	1.63244	4.94137	5.47050	18
0.01307	80.22222	6247.03280	0.11431	8.95669	79.03817	0.11431	8.95669	79.03817	1.80758	1.91794	3.68326	17
0.00382	26.88889	2001.08187	0.06182	5.18545	44.73345	0.06182	5.18545	44.73345	1.33561	1.67633	2.92333	16
0.00540	26.88889	2255.63722	0.07348	5.18545	47.49355	0.07348	5.18545	47.49355	2.38145	2.78735	5.12098	15
0.00062	6.00000	256.53136	0.02494	2.44949	16.01660	0.02494	2.44949	16.01660	1.32480	1.53719	2.84105	14
0.00027	2.88889	165.92109	0.01633	1.69967	12.88104	0.01633	1.69967	12.88104	1.61861	1.47593	2.97694	13
0.00009	10.88889	259.16056	0.00943	3.29983	16.09846	0.00943	3.29983	16.09846	0.37256	0.67853	1.01836	12
0.00007	4.66667	107.98229	0.00816	2.16025	10.39145	0.00816	2.16025	10.39145	0.39732	0.46020	0.84856	11
0.00036	5.55556	224.43742	0.01886	2.35702	14.98124	0.01886	2.35702	14.98124	0.24015	0.55533	0.78567	9
									0.58803	0.59621	1.18172	8

Tabla 11: Datos estadísticos cur va de 4V.

RESISTENCIA	1			2			3			PROMEDIO		
	ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR			ELECTROLIZADOR		
	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)
	4,25	2,62	0,637	4,25	2,57	0,862	4,25	2,53	0,846	4,25	2,55	0,854
CELDA DE HIDRÓGENO												
$R_{OUT}$ (°)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)	$V_{OUT}$ (V)	$I_{OUT}$ (mA)	POTENCIA m(W)
400	7,56	19	143,64	7,78	20	155,60	7,85	20	157,00	7,82	20,00	156,30
350	7,48	22	164,56	7,70	22	169,40	7,74	22	170,28	7,72	22,00	169,84
300	7,41	25	185,25	7,62	26	198,12	7,73	26	200,98	7,68	26,00	199,55
290	7,40	26	192,40	7,59	26	197,34	7,62	27	205,74	7,61	26,50	201,53
280	7,37	27	198,99	7,56	27	204,12	7,58	27	204,66	7,57	27,00	204,39
270	7,35	28	205,80	7,51	28	210,28	7,56	28	211,68	7,54	28,00	210,98
260	7,32	29	212,28	7,49	29	217,21	7,55	29	218,95	7,52	29,00	218,08
250	7,31	30	219,30	7,47	30	224,10	7,60	31	235,60	7,54	30,50	229,82
240	7,29	31	225,99	7,44	31	230,64	7,52	32	240,64	7,48	31,50	235,62
230	7,25	32	232,00	7,41	33	244,53	7,48	33	246,84	7,45	33,00	245,69
220	7,23	33	238,59	7,39	34	251,26	7,46	34	253,64	7,43	34,00	252,45
210	7,20	35	252,00	7,37	35	257,95	7,43	36	267,48	7,40	35,50	262,70
200	7,18	36	258,48	7,33	37	271,21	7,40	37	273,80	7,37	37,00	272,51
190	7,16	38	272,08	7,32	39	285,48	7,39	39	288,21	7,36	39,00	286,85
180	7,14	40	285,60	7,30	40	292,00	7,33	41	300,53	7,32	40,50	296,26
170	7,08	42	297,36	7,25	43	311,75	7,32	43	314,76	7,29	43,00	313,26
160	7,06	44	310,64	7,23	45	325,35	7,30	46	335,80	7,27	45,50	330,56
150	7,02	47	329,94	7,19	48	345,12	7,24	48	347,52	7,22	48,00	346,32
140	6,98	50	349,00	7,16	51	365,16	7,21	52	374,92	7,19	51,50	370,03
130	6,92	54	373,68	7,13	55	392,15	7,17	55	394,35	7,15	55,00	393,25
120	6,90	58	400,20	7,06	59	416,54	7,11	60	426,60	7,09	59,50	421,56
110	6,83	62	423,46	7,01	64	448,64	7,07	65	459,55	7,04	64,50	454,08
100	6,75	68	459,00	6,97	70	487,90	7,00	70	490,00	6,99	70,00	488,95
90	6,71	75	503,25	6,88	76	522,88	6,93	77	533,61	6,91	76,50	528,23
80	6,63	83	550,29	6,77	85	575,45	6,84	86	588,24	6,81	85,50	581,83
70	6,51	93	605,43	6,68	95	634,60	6,75	96	648,00	6,72	95,50	641,28
60	6,40	107	684,80	6,60	109	719,40	6,63	110	729,30	6,62	109,50	724,34
50	6,25	124	775,00	6,44	129	830,76	6,51	130	846,30	6,48	129,50	838,51
40	6,06	150	909,00	6,21	155	962,55	6,27	156	978,12	6,24	155,50	970,32
30	5,81	191	1109,71	5,89	195	1148,55	6,03	200	1206,00	5,96	197,50	1177,10
20	5,34	267	1425,78	5,47	271	1482,37	5,47	271	1482,37	5,47	271,00	1482,37
15	4,66	313	1458,58	5,09	339	1725,51	5,15	345	1776,75	5,12	342,00	1751,04
14	4,65	333	1548,45	4,95	350	1732,50	4,98	355	1767,90	4,97	352,50	1750,16
13	4,53	346	1567,38	4,78	363	1735,14	4,81	369	1774,89	4,80	366,00	1754,97
12	4,40	363	1597,20	4,42	380	1679,60	4,65	385	1790,25	4,54	382,50	1734,64
11	4,23	380	1607,40	4,30	390	1677,00	4,32	400	1728,00	4,31	395,00	1702,45
10	4,02	408	1640,16	4,24	421	1785,04	4,23	423	1789,29	4,24	422,00	1787,17
9	3,80	426	1618,80	3,93	435	1709,55	3,95	438	1730,10	3,94	436,50	1719,81
8	3,55	441	1565,55	3,58	449	1607,42	3,60	450	1620,00	3,59	449,50	1613,71
7	3,30	470	1551,00	3,32	473	1570,36	3,28	471	1544,88	3,30	472,00	1557,60
6	2,80	469	1313,20	2,83	471	1332,93	2,86	480	1372,80	2,85	475,50	1352,80
5	2,50	472	1180,00	2,46	479	1178,34	2,60	490	1274,00	2,53	484,50	1225,79

Tabla 12: Parámetros medidos con 4,25V de entrada en el electrolizador.

VARIANZA			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	1,36E-03	1,05E-02	
CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> (Ω)
0,01527	0	35,94347	
0,01307	0,00000	6,32427	
0,01762	0,22222	46,80549	
0,00949	0,22222	30,32436	
0,00896	0,00000	6,28660	
0,00802	0,00000	6,28942	
0,00949	0,00000	7,98016	
0,01407	0,22222	46,77556	
0,00909	0,22222	37,36056	
0,00927	0,22222	42,50696	
0,00927	0,22222	43,63287	
0,00949	0,22222	40,65042	
0,00842	0,22222	44,82927	
0,00927	0,22222	49,68776	
0,00696	0,22222	37,40287	
0,01016	0,22222	57,65469	
0,01016	0,66667	106,51247	
0,00887	0,22222	60,58320	
0,00976	0,66667	114,24996	
0,01202	0,22222	85,91442	
0,00802	0,66667	118,35102	
0,01040	1,55556	228,39429	
0,01242	0,88889	200,06889	
0,00887	0,66667	158,02216	
0,00762	1,55556	248,53469	
0,01016	1,55556	315,85042	
0,01042	1,55556	363,93556	
0,01207	6,88889	937,15102	
0,00780	6,88889	876,40020	
0,00827	13,55556	1564,53469	
0,00376	3,55556	711,65069	
0,04762	192,88889	19456,59016	
0,02220	88,66667	9253,98500	
0,01576	94,88889	8087,09780	
0,01287	88,66667	6255,72056	
0,00149	66,66667	2443,28000	
0,01029	44,22222	4805,33709	
0,00442	26,00000	2338,39500	
0,00042	16,22222	541,79509	
0,00027	1,55556	117,94382	
0,00060	22,88889	614,56109	
0,00347	54,88889	1998,84347	

DESVIACIÓN ESTANDAR			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	0,03682	0,10255	
CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> (Ω)
0,12356	0	5,99529	
0,11431	0,00000	2,51481	
0,13275	0,47140	6,84145	
0,09741	0,47140	5,50676	
0,09463	0,00000	2,55511	
0,08957	0,00000	2,50787	
0,09741	0,00000	2,82492	
0,11860	0,47140	6,83927	
0,09534	0,47140	6,11233	
0,09626	0,47140	6,51974	
0,09626	0,47140	6,60552	
0,09741	0,47140	6,37577	
0,09177	0,47140	6,69547	
0,09626	0,47140	7,04895	
0,08340	0,47140	6,11579	
0,10077	0,47140	7,59307	
0,10077	0,81650	10,32049	
0,09416	0,47140	7,78352	
0,09877	0,81650	10,68878	
0,10965	0,47140	9,26900	
0,08957	0,81650	10,87893	
0,10198	1,24722	15,11272	
0,11146	0,94281	14,14457	
0,09416	0,81650	12,57069	
0,08731	1,24722	15,76498	
0,10077	1,24722	17,77218	
0,10209	1,24722	19,07710	
0,10985	2,62467	30,61292	
0,08832	2,62467	29,60406	
0,09092	3,68179	39,55420	
0,06128	1,88562	26,67678	
0,21823	13,88844	139,48688	
0,14900	9,41630	96,19764	
0,12552	9,74109	89,92829	
0,11343	9,41630	79,09311	
0,03859	8,16497	49,42955	
0,10143	6,64998	69,32054	
0,06650	5,09902	48,35695	
0,02055	4,02768	23,27649	
0,01633	1,24722	10,86019	
0,02449	4,78423	24,79034	
0,05888	7,40870	44,70843	

COEFICIENTE DE VARIACIÓN (%)			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	1,44384	12,00790	
CELDA DE HIDRÓGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	R <sub>OUT</sub> (Ω)
1,58104	2	3,83576	
1,48069	0,00000	1,48069	350
1,72962	1,81309	3,42844	300
1,28088	1,77888	2,73244	290
1,25012	0,00000	1,25012	280
1,18868	0,00000	1,18868	270
1,29536	0,00000	1,29536	260
1,57403	1,54559	2,97596	250
1,27454	1,49652	2,59415	240
1,29300	1,42850	2,65370	230
1,29648	1,38648	2,61656	220
1,31636	1,32790	2,42701	210
1,24606	1,27407	2,45701	200
1,30882	1,20873	2,45741	190
1,14012	1,16396	2,06435	180
1,38332	1,09629	2,42393	170
1,38713	1,79450	3,12215	160
1,30510	0,98209	2,24749	150
1,37467	1,58543	2,88864	140
1,53351	0,85710	2,35703	130
1,26418	1,37226	2,58065	120
1,44859	1,93367	3,32821	110
1,59563	1,34687	2,89285	100
1,36369	1,06732	2,37976	90
1,28296	1,45874	2,70956	80
1,50074	1,30599	2,77135	70
1,54330	1,13901	2,63371	60
1,69650	2,02677	3,65086	50
1,41535	1,68789	3,05096	40
1,52552	1,86420	3,36031	30
1,12034	0,69580	1,79960	20
4,26221	4,06095	7,96594	15
3,00094	2,67129	5,49650	14
2,61775	2,66150	5,12421	13
2,50124	2,46178	4,55963	12
0,89527	2,06708	2,90344	11
2,39514	1,57582	3,87879	10
1,68781	1,16816	2,81176	9
0,57237	0,89604	1,44243	8
0,49485	0,26424	0,69724	7
0,86098	1,00615	1,83252	6
2,32721	1,52914	3,64733	5

Tabla 13: Datos estadísticos curva de 4,25V.

R <sub>OUT</sub> (°)	ELECTROLIZADOR			
	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)	FLUJO H2 (cc/s)
	IN (V)	IN (A)		
	4.5	2.62	1.012	
400	7.63	19	144.97	
350	7.55	22	166.10	
300	7.49	25	187.25	
290	7.48	26	194.48	
280	7.44	27	200.88	
270	7.42	28	207.76	
260	7.41	29	214.89	
250	7.41	30	222.30	
240	7.40	30	222.00	
230	7.40	31	229.40	
220	7.38	32	236.16	
210	7.34	34	249.56	
200	7.31	35	255.85	
190	7.26	36	261.36	
180	7.26	38	275.88	
170	7.24	41	296.84	
160	7.22	43	310.46	
150	7.17	45	322.65	
140	7.15	48	343.20	
130	7.10	51	362.10	
120	7.05	55	387.75	
110	7.00	59	413.00	
100	6.96	63	438.48	
90	6.84	76	519.84	
80	6.76	84	567.84	
70	6.66	95	632.70	
60	6.52	109	492.68	
50	6.43	128	823.04	
40	6.23	155	965.65	
30	5.89	195	1148.55	
20	5.48	272	1490.56	
15	5.16	345	1780.20	
14	5.05	358	1807.90	
13	4.85	379	1838.15	
12	4.72	396	1869.12	
11	4.48	411	1841.28	
10	4.36	436	1900.96	
9	4.04	450	1818.00	
8	3.78	476	1799.28	
7	3.32	486	1613.52	
6	2.99	495	1480.05	
5	2.36	504	1189.44	

R <sub>OUT</sub> (°)	ELECTROLIZADOR			
	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)	FLUJO H2 (cc/s)
	IN (V)	IN (A)		
	4.5	2.57	0.980	
400	7.61	19	144.59	
350	7.59	22	166.98	
300	7.56	25	189.00	
290	7.56	26	196.56	
280	7.56	27	204.12	
270	7.55	28	211.40	
260	7.55	29	218.95	
250	7.55	30	226.50	
240	7.54	32	242.24	
230	7.53	33	248.49	
220	7.53	35	263.55	
210	7.52	36	270.72	
200	7.26	36	261.36	
190	7.24	38	275.12	
180	7.22	40	288.80	
170	7.18	42	301.56	
160	7.15	45	321.75	
150	7.12	48	341.76	
140	7.08	51	361.08	
130	7.07	55	388.85	
120	7.01	59	413.59	
110	6.91	65	449.15	
100	6.84	69	471.96	
90	6.77	75	507.75	
80	6.68	83	554.44	
70	6.58	94	618.52	
60	6.44	107	689.08	
50	6.28	126	791.28	
40	6.09	152	925.68	
30	5.80	192	1113.60	
20	5.40	268	1447.20	
15	5.31	346	1837.26	
14	5.17	364	1881.88	
13	4.95	381	1885.95	
12	4.77	405	1931.85	
11	4.57	419	1914.83	
10	4.39	442	1940.38	
9	4.00	451	1804.00	
8	3.73	471	1756.83	
7	3.35	486	1628.10	
6	2.96	509	1506.64	
5	2.73	521	1422.33	

R <sub>OUT</sub> (°)	ELECTROLIZADOR			
	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)	FLUJO H2 (cc/s)
	IN (V)	IN (A)		
	4.5	2.8	0.988	
400	7.63	19	144.97	
350	7.60	22	167.20	
300	7.55	25	188.75	
290	7.56	27	204.12	
280	7.58	28	212.24	
270	7.62	29	220.98	
260	7.61	30	228.30	
250	7.61	31	235.91	
240	7.57	32	242.24	
230	7.62	33	251.46	
220	7.65	35	267.75	
210	7.56	37	279.72	
200	7.33	37	271.21	
190	7.32	39	285.48	
180	7.26	41	297.66	
170	7.23	43	310.89	
160	7.21	45	324.45	
150	7.20	48	345.60	
140	7.16	51	365.16	
130	7.11	55	391.05	
120	7.10	59	418.90	
110	7.05	64	452.48	
100	6.95	70	486.50	
90	6.91	77	532.07	
80	6.79	85	577.15	
70	6.75	96	648.00	
60	6.55	109	713.95	
50	6.42	128	821.76	
40	6.19	155	959.45	
30	5.88	196	1152.48	
20	5.53	274	1515.22	
15	5.46	358	1954.68	
14	5.28	374	1974.72	
13	5.14	391	2009.74	
12	4.93	410	2021.30	
11	4.77	427	2036.79	
10	4.54	456	2070.24	
9	4.08	463	1889.04	
8	3.82	472	1803.04	
7	3.46	488	1688.48	
6	3.01	509	1532.09	
5	2.90	520	1508.00	

R <sub>OUT</sub> (°)	ELECTROLIZADOR			
	V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	POTENCIA m(W)	FLUJO H2 (cc/s)
	IN (V)	IN (A)		
	4.5	2.685	0.984	
400	7.62	19,00	144,78	
350	7.60	22,00	167,09	
300	7.56	25,00	188,88	
290	7.56	26,50	200,34	
280	7.57	27,50	208,18	
270	7.59	28,50	216,17	
260	7.58	29,50	223,61	
250	7.58	30,50	231,19	
240	7.56	32,00	241,76	
230	7.58	33,00	249,98	
220	7.59	35,00	265,65	
210	7.54	36,50	275,21	
200	7.30	36,50	266,27	
190	7.28	38,50	280,28	
180	7.24	40,50	293,22	
170	7.21	42,50	306,21	
160	7.18	45,00	323,10	
150	7.16	48,00	343,68	
140	7.12	51,00	363,12	
130	7.09	55,00	389,95	
120	7.06	59,00	416,25	
110	6.99	64,50	450,86	
100	6.90	69,50	479,20	
90	6.84	76,00	519,84	
80	6.74	84,00	565,74	
70	6.67	95,00	633,18	
60	6.50	108,00	701,46	
50	6.35	127,00	806,45	
40	6.14	153,50	942,49	
30	5.84	194,00	1132,96	
20	5.47	271,00	1481,02	
15	5.39	352,00	1895,52	
14	5.23	369,00	1928,03	
13	5.05	386,00	1947,37	
12	4.85	407,50	1976,38	
11	4.67	423,00	1975,41	
10	4.47	449,00	2004,79	
9	4.04	457,00	1846,28	
8	3.78	471,50	1779,91	
7	3.41	487,00	1658,24	
6	2.99	509,00	1519,37	
5	2.82	520,50	1465,21	

Tabla 14: Parámetros medidos con 4,5V de entrada en el electrolizador.

VARIANZA			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	1,32E-02	1,50E-05	

CELDA DE HIDROGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	RESISTENCIA
0,00010	0	0,03610	400
0,00002	0,00000	0,01210	350
0,00002	0,00000	0,01563	300
0,00000	0,25000	14,28840	290
0,00010	0,25000	16,48360	280
0,00123	0,25000	22,94410	270
0,00090	0,25000	21,85563	260
0,00090	0,25000	22,13703	250
0,00023	0,00000	0,23040	240
0,00202	0,00000	2,20523	230
0,00360	0,00000	4,41000	220
0,00040	0,25000	20,25000	210
0,00123	0,25000	24,25562	200
0,00160	0,25000	26,83240	190
0,00040	0,25000	19,62490	180
0,00063	0,25000	21,76223	170
0,00090	0,00000	1,82250	160
0,00160	0,00000	3,68640	150
0,00160	0,00000	4,16160	140
0,00040	0,00000	1,21000	130
0,00202	0,00000	7,04903	120
0,00640	0,25000	2,77222	110
0,00303	0,25000	52,85290	100
0,00490	1,00000	147,86560	90
0,00303	1,00000	128,93603	80
0,00722	1,00000	217,26760	70
0,00302	1,00000	154,62922	60
0,00490	1,00000	232,25760	50
0,00250	2,25000	285,10323	40
0,00160	4,00000	377,91360	30
0,00422	9,00000	1156,68010	20
0,00563	36,00000	3446,86410	15
0,00303	25,00000	2154,81640	14
0,00902	25,00000	3830,99102	13
0,00640	6,25000	2000,32563	12
0,01000	16,00000	3718,56040	11
0,00563	49,00000	4215,90490	10
0,00160	36,00000	1807,95040	9
0,00202	0,25000	533,84103	8
0,00302	1,00000	911,43610	7
0,00062	0,00000	161,92563	6
0,00722	0,25000	1834,83723	5

DESVIACION ESTANDAR			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	0,11500	0,00388	

CELDA DE HIDROGENO			
V <sub>OUT</sub> (V)	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	RESISTENCIA
0,01000	0	0,19000	400
0,00500	0,00000	0,11000	350
0,00500	0,00000	0,12500	300
0,00000	0,50000	3,78000	290
0,01000	0,50000	4,06000	280
0,03500	0,50000	4,79000	270
0,03000	0,50000	4,67500	260
0,03000	0,50000	4,70500	250
0,01500	0,00000	0,48000	240
0,04500	0,00000	1,48500	230
0,06000	0,00000	2,10000	220
0,02000	0,50000	4,50000	210
0,03500	0,50000	4,92500	200
0,04000	0,50000	5,18000	190
0,02000	0,50000	4,43000	180
0,02500	0,50000	4,66500	170
0,03000	0,00000	1,35000	160
0,04000	0,00000	1,92000	150
0,04000	0,00000	2,04000	140
0,02000	0,00000	1,10000	130
0,04500	0,00000	2,65500	120
0,08000	0,50000	1,66500	110
0,05500	0,50000	7,27000	100
0,07000	1,00000	12,16000	90
0,05500	1,00000	11,35500	80
0,08500	1,00000	14,74000	70
0,05500	1,00000	12,43500	60
0,07000	1,00000	15,24000	50
0,05000	1,50000	16,88500	40
0,04000	2,00000	19,44000	30
0,06500	3,00000	34,01000	20
0,07500	6,00000	58,71000	15
0,05500	5,00000	46,42000	14
0,09500	5,00000	61,89500	13
0,08000	2,50000	44,72500	12
0,10000	4,00000	60,98000	11
0,07500	7,00000	64,93000	10
0,04000	6,00000	42,52000	9
0,04500	0,50000	23,10500	8
0,05500	1,00000	30,19000	7
0,02500	0,00000	12,72500	6
0,08500	0,50000	42,83500	5

COEFICIENTE DE VARIACION (%)			
ELECTROLIZADOR			
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)	FLUJO H2 (cc/s)	FLUJO H2 (cc/s)
0	4,28305	0,39370	

CELDA DE HIDROGENO			
V <sub>OUT</sub>	I <sub>OUT</sub>	POTENCIA	RESISTENCIA
0,13123	0	0,13123	400
0,06583	0,00000	0,06583	350
0,06618	0,00000	0,06618	300
0,00000	1,88679	1,88679	290
0,13210	1,81818	1,95028	280
0,46144	1,75439	2,21582	270
0,39578	1,69492	2,09069	260
0,39578	1,63934	2,03512	250
0,19854	0,00000	0,19854	240
0,59406	0,00000	0,59406	230
0,79051	0,00000	0,79051	220
0,26525	1,36986	1,63512	210
0,47978	1,36986	1,84964	200
0,54945	1,29870	1,84815	190
0,27624	1,23457	1,51081	180
0,34698	1,17647	1,52345	170
0,41783	0,00000	0,41783	160
0,55866	0,00000	0,55866	150
0,56180	0,00000	0,56180	140
0,28209	0,00000	0,28209	130
0,63785	0,00000	0,63785	120
1,14449	0,77519	0,36930	110
0,79768	0,71942	1,51710	100
1,02339	1,31579	2,33918	90
0,81663	1,19048	2,00711	80
1,27532	1,05263	2,32795	70
0,84681	0,92593	1,77273	60
1,10236	0,78740	1,88976	50
0,81433	0,97720	1,79153	40
0,68493	1,03093	1,71586	30
1,18939	1,10701	2,29640	20
1,39276	1,70455	3,09730	15
1,05263	1,35501	2,40765	14
1,88305	1,29534	3,17839	13
1,64948	0,61350	2,26298	12
2,14133	0,94563	3,08695	11
1,67973	1,55902	3,23875	10
0,99010	1,31291	2,30301	9
1,19205	0,10604	1,29810	8
1,61527	0,20534	1,82061	7
0,83752	0,00000	0,83752	6
3,01954	0,09606	2,92348	5

Tabla 15: Datos estadísticos curva de 4,5V.

De la Tabla 4 a la Tabla 15 se muestran los resultados de las mediciones hechas en laboratorio, los datos registrados muestran lo siguiente:

- 3,25V en el electrolizador.

En la Tabla 4 se encuentran las 3 mediciones de voltaje, corriente y potencia realizadas para la primera curva característica, al igual que el promedio de los valores medidos. En esta medición se colocaron 3,25V y 0,52A en la entrada del electrolizador, lo que producía un flujo hidrógeno de 0,171cc/s en la entrada del arreglo de celdas. Como se puede observar los cambios en la carga se tomaron de 250Ω a 10Ω con pasos de 10Ω, en el rango de 65Ω a 55Ω se realizaron pasos de 1Ω debido a que en estos valores se encontraba el valor de máxima potencia.

El voltaje que entrega la celda en esta curva se encuentra entre 7,03V a 1,32V valores promedio y se puede observar que a medida que disminuye el valor de la resistencia en la carga el voltaje también disminuye. La corriente suministrada por la celda va desde 29mA a 132,33mA en promedio aumentando conforme disminuye el valor de resistencia. La mínima potencia entregada por la celda es de 175,12mW y la máxima potencia es de 564,48mW. El punto de máxima potencia se encuentra en 59Ω, con un voltaje de 5,76V y una corriente de 98mA.

La Tabla 5 muestra los datos estadísticos de las medidas realizadas en la curva de 3,52V. Al analizar el voltaje se puede observar que estas medidas son homogéneas ya que la variabilidad entre los datos medidos es mínima, esto se puede afirmar debido a los valores de los datos estadísticos. En primer lugar la varianza entre las mediciones es mínima, la menor varianza es de 0,00002V<sup>2</sup> y la mayor es de 0,01076V<sup>2</sup>, por otro lado la desviación estándar también muestra que todos los datos obtenidos se encuentran muy cerca del valor promedio ya que la menor desviación es de 0,00471V y la mayor es de 0,10371V. Por último, el coeficiente de variación se encuentra en un rango de 0,13862% a 2,29540%, esto significa que el valor de voltaje que más se aleja del promedio se encuentra un 2,29540% por encima o por debajo del valor medio.

En la corriente se percibe que las medidas conseguidas en laboratorio son uniformes debido a que no existe gran variabilidad entre ellas. Analizando la varianza se encuentra que la menor es de 0mA<sup>2</sup> y la mayor es de 6,22mA<sup>2</sup>, por su parte la desviación estándar refleja que los datos obtenidos no se alejan mucho del promedio ya que la menor desviación es de 0mA y la mayor es de 2,494mA. Finalmente, el coeficiente de variación se encuentra dentro del 0% a 2,38322%, es decir que el valor de corriente más lejano del promedio difiere un 2,38322% valor medio.

Al analizar la potencia se ve que estas medias varían más que el voltaje y la corriente, sin embargo teniendo en cuenta las unidades y las magnitudes de los resultados se puede afirmar que se presenta poca variabilidad. La varianza menor es de 0,6016mW<sup>2</sup> y la mayor es de 417,217mW<sup>2</sup>, en segundo lugar la desviación estándar muestra que el valor más lejano del promedio difiere en 20,4259mW del promedio ya que la menor desviación es de 0,7757mW y la mayor es de 20,4259mW. El coeficiente de variación se encuentra dentro del 0,1386% a 4,6961%, lo cual confirma que los datos son homogéneos.

- 3,5V en el electrolizador.

La Tabla 6 corresponde a la curva de 3,5V en la entrada del electrolizador con 0,93A en la entrada del electrolizador y un flujo de hidrógeno de 0,357cc/s en la entrada del arreglo de celdas. La carga se modificó de 300Ω a 10Ω con pasos de 10Ω, en el rango de 35Ω a 25Ω se realizaron pasos de 1Ω debido a que en estos valores se encontraba el valor de máxima potencia.

El voltaje entregado por la celda varía desde 7,20V a 2,10V en promedio, la corriente la salida de la celda se encuentra entre 25mA y 207,67mA promedio. La mínima potencia entregada por la celda es de 179,92mW y la máxima potencia es de 924,54mW. El punto de máxima potencia se encuentra en 31Ω, con un voltaje de 5,33V y una corriente de 173,33mA.

En la Tabla 7 se muestran los datos estadísticos de las medidas de esta curva. En primer lugar, se puede afirmar que el voltaje tiene medidas completamente homogéneas ya que la variabilidad entre los datos medidos es prácticamente imperceptible, esto se refleja en los valores de los datos estadísticos. Tanto la

varianza como la desviación estándar son muy pequeñas, la menor varianza es de  $0V^2$  y la mayor es de  $0,006V^2$  y la menor desviación estándar es de  $0V$  y la mayor es de  $0,776V$ , lo que muestra que todos los resultados de las mediciones están muy cerca del promedio. Por último, el coeficiente de variación confirma lo la homogeneidad de los datos, ya que se encuentra en un rango de  $0\%$  a  $1,5\%$ .

Por otro lado la corriente tiene medidas equilibradas pues existe poca variabilidad entre ellas. La varianza se encuentra entre  $0mA^2$  y  $6,22mA^2$  y la desviación estándar se encuentra entre  $0mA$  y  $2,494mA$ , valores iguales a la curva anterior y que significan que los datos son muy cercanos al valor medio. El coeficiente de variación se encuentra dentro del  $0\%$  a  $1,79\%$  lo cual refleja la homogeneidad de los datos.

La potencia, al igual que la curva anterior, varía más que el voltaje y la corriente, sin embargo los datos presentan poca variabilidad. La menor varianza es de  $0mW^2$  y la mayor es de  $633,6mW^2$  y la desviación estándar está en el rango de  $0mW$  a  $25,17mW$ . El coeficiente de variación varía de  $0\%$  a  $2,88\%$ , por todo lo anterior se ve que los datos son homogéneos.

- $3,75V$  en el electrolizador.

La Tabla 8 muestra los datos de la curva de  $3,75V$  en la entrada del electrolizador con  $1,18A$  en la entrada del electrolizador y un flujo de hidrógeno de  $0,446cc/s$  en la entrada del arreglo de celdas. La carga se modificó de  $300\Omega$  a  $10\Omega$  con pasos de  $10\Omega$ , en el rango de  $20\Omega$  a  $10\Omega$  se realizaron pasos de  $1\Omega$  para hallar el punto de máxima potencia.

El voltaje entregado por la celda se encuentra entre  $7,21V$  y  $2,95V$  y la corriente entre  $26mA$  y  $350,33mA$  valores promedio. La mínima potencia entregada por la celda es de  $187,55mW$  y la máxima potencia es de  $1512,03mW$ . El punto de máxima potencia se encuentra en  $14\Omega$ , con un voltaje de  $4,58V$  y una corriente de  $330,33mA$ .

La Tabla 9 contiene los datos estadísticos de la curva de  $3,75V$ . En cuanto al voltaje observa que la variabilidad es muy pequeña lo cual se evidencia en los valores descritos a continuación. La menor varianza es de  $0,0005V^2$  y la mayor es de  $0,0048V^2$ , por su parte la desviación estándar varía de  $0,0236V$  a  $0,0694V$ , esto indica que los valores son muy cercanos al promedio. Por último, el coeficiente de variación confirma la poca variabilidad debido a que se encuentra en un rango de  $0,534\%$  a  $2,093\%$ .

La corriente muestra una variabilidad mínima, ya que la varianza se encuentra entre  $0mA^2$  y  $20,22mA^2$  y la desviación estándar se encuentra entre  $0mA$  y  $4,497mA$ , debido a la magnitud de los valores medidos, se puede afirmar que los datos son muy cercanos al valor medio, esto se refleja en el coeficiente de variación que se encuentra dentro del  $0\%$  a  $2,094\%$ .

La potencia muestra un valor de varianza elevado ya que se encuentra entre  $2,6288mW^2$  y  $1248,77mW^2$ , pero al ver los valores de la desviación estándar que están en un rango de  $1,6213mW$  a  $35,3380mW$  y compararlos con la magnitud de los valores registrados se puede notar que estos últimos no se alejan de manera significativa del promedio. El coeficiente de variación confirma lo anteriormente dicho, ya que varía de  $0,705\%$  a  $2,62\%$ .

- $4V$  en el electrolizador.

La Tabla 10 contiene los datos de la curva de  $4V$  en la entrada del electrolizador con  $1,41A$  en la entrada del electrolizador y un flujo de hidrógeno de  $0,467cc/s$  en la entrada del arreglo de celdas. La carga se modificó de  $300\Omega$  a  $8\Omega$  con pasos de  $10\Omega$ , en el rango de  $20\Omega$  a  $8\Omega$  se realizaron pasos de  $1\Omega$  para hallar el punto de máxima potencia.

El máximo valor de voltaje entregado por la celda es de  $7,40V$  y el mínimo es de  $3,20V$ , la corriente tiene su máximo valor en  $25mA$  y su mínimo en  $395,33mA$  valores promedio. La mínima potencia entregada por la celda es de  $184,92mW$  y la máxima potencia es de  $1595,38mW$ . El punto de máxima potencia se encuentra en  $13\Omega$ , con un voltaje de  $4,54V$  y una corriente de  $351,33mA$ .

La Tabla 11 contiene los datos estadísticos de la curva de  $4V$ . Al observar el voltaje se puede ver que la variabilidad entre los datos es mínima, como se refleja en la varianza, que varía de  $0V^2$  a  $0,0131V^2$  y en la

desviación estándar que varía de 0,008V a 0,114V. Además el coeficiente de varianza se encuentra en un rango de 0,24% a 2,38%, lo cual muestra la cercanía de los datos al valor medio.

En cuanto a la corriente, los datos son poco homogéneos, esto se debe a que los valores registrados presentan una variabilidad considerable. La varianza mínima es de  $0\text{mA}^2$  y la máxima de  $186\text{mA}^2$ , la desviación estándar se encuentra entre 0mA y 13,638mA, lo que indica que los datos que más se alejan del promedio están 13,638mA por encima o por debajo del valor medio. Sin embargo al analizar el coeficiente de variación se puede afirmar que los datos no son inconsistentes pues en porcentaje la variación es de un 0% a un 4,94%.

La potencia muestra también una variabilidad considerable, pues el valor de varianza se encuentra entre  $4,089\text{mW}^2$  y  $6247,03\text{mW}^2$  y la desviación estándar está en un rango de 2,022mW a 79,038mW. Al analizar el coeficiente de variación, se observa que a pesar de los valores elevados de varianza y desviación estándar, los datos están dentro de un rango de homogeneidad tolerable pues varía de 0,63% a 5,47%.

- 4,25V en el electrolizador.

La Tabla 12 contiene los datos de la curva de 4,25V en la entrada del electrolizador con 2,55A en la entrada del electrolizador y un flujo de hidrógeno de 0,854cc/s en la entrada del arreglo de celdas. La carga se modificó de  $400\Omega$  a  $5\Omega$  con pasos de  $10\Omega$ , en el rango de  $15\Omega$  a  $5\Omega$  se realizaron pasos de  $1\Omega$  para hallar el punto de máxima potencia.

El máximo valor de voltaje entregado por la celda s de 7,82V y el mínimo es de 2,53V, la corriente tiene su máximo valor en 20mA y su mínimo en 484,5mA valores promedio. La mínima potencia entregada por la celda es de 156,3mW y la máxima potencia es de 1787,17mW. El punto de máxima potencia se encuentra en  $10\Omega$ , con un voltaje de 4,24V y una corriente de 422mA.

La Tabla 13 muestra los datos estadísticos de las medidas realizadas en la curva de 4,25V. Al analizar el voltaje se puede observar que estas medidas son homogéneas ya que la variabilidad entre los datos medidos es mínima, como se evidencia en la varianza, que se encuentra entre  $0\text{V}^2$  y  $0,047\text{V}^2$ , y la desviación que varía de 0,016V y 0,218V. Por último, el coeficiente de variación se encuentra en un rango de 0,49% a 4,26%, esto significa que el valor de voltaje que más se aleja del promedio se encuentra un 4,26% por encima o por debajo del valor medio.

Las medidas de la corriente presentan una variabilidad considerable entre ellas. La varianza se encuentra entre  $0\text{mA}^2$  y  $192,8\text{mA}^2$ , por su parte la desviación estándar varía de 0mA y a 13,89mA. Sin embargo al analizar el coeficiente de variación, que se encuentra dentro del 0% al 4,06%, se puede afirmar que los datos tienen una homogeneidad aceptable.

En cuanto a la potencia se ve que las medias varían de forma importante, la varianza menor es de  $6,289\text{mW}^2$  y la mayor es de  $19456,59\text{mW}^2$ , en segundo lugar la desviación estándar muestra que el valor más lejano del promedio difiere en 139,48688mW del promedio ya que la menor desviación es de 2,507mW y la mayor es de 139,48688mW, pero al observar el coeficiente de variación se puede afirmar que los datos están dentro de un rango de variabilidad admisible, del 0,697% a 7,966%.

- 4,5V en el electrolizador.

La Tabla 14 contiene los datos de la curva de 4,5V en la entrada del electrolizador con 2,685A en la entrada del electrolizador y un flujo de hidrógeno de 0,984cc/s en la entrada del arreglo de celdas. La carga se modificó de  $400\Omega$  a  $5\Omega$  con pasos de  $10\Omega$ , en el rango de  $15\Omega$  a  $5\Omega$  se realizaron pasos de  $1\Omega$  para hallar el punto de máxima potencia.

El máximo valor de voltaje entregado por la celda s de 7,62V y el mínimo es de 2,82V, la corriente tiene su máximo valor en 19mA y su mínimo en 520mA valores promedio. La mínima potencia entregada por la celda es de 144,78mW y la máxima potencia es de 2004,79mW. El punto de máxima potencia se encuentra en  $10\Omega$ , con un voltaje de 4,47V y una corriente de 449mA.

La Tabla 15 muestra los datos estadísticos de las medidas realizadas en la curva de 4,5V. El voltaje muestra una gran homogeneidad, ya que la variabilidad entre los datos medidos es mínima, como se refleja en la varianza, que se encuentra entre  $0V^2$  y  $0,01V^2$ , y la desviación que varía de 0V y 0,1V. Por último, el coeficiente de variación que se encuentra en un rango de 0% a 3,019% confirma lo dicho anteriormente.

Las medidas de la corriente presentan una variabilidad mínima entre ellas. La varianza se encuentra entre  $0mA^2$  y  $49mA^2$  y la desviación estándar varía de 0mA y a 7mA, lo que muestra que los datos son cercanos al valor medio. Al analizar el coeficiente de variación, que se encuentra dentro del 0% al 1,89%, se puede afirmar que los datos tienen una alta homogeneidad.

En lo que corresponde a la potencia se evidencia que las medias varían de forma significativa, la menor varianza es de  $0,012mW^2$  y la mayor es de  $4215,90mW^2$ , y en segundo lugar la desviación varía de 0,11mW y la mayor es de 493mW, pero al observar el coeficiente de variación se puede afirmar que los datos están dentro de un rango de variabilidad tolerable, del 0,065% a 3,24%.

Al analizar las tablas de datos, se puede afirmar que los valores registrados en laboratorio son confiables, pues los datos estadísticos permiten ver que los rangos de variación en todos los casos son bajos como se explicó anteriormente.

#### **4.2.2. Caracterización dinámica de las celdas tipo PEM.**

Para la caracterización dinámica de la celda de hidrógeno se llevaron a cabo dos tipos de mediciones en la salida del sistema (sobre la carga), una con cambios abruptos en la carga y otra con cambios abruptos en el voltaje de entrada. Para lograr cambios rápidos, se colocó un interruptor de 3 posiciones y se operó de forma manual, los resultados se muestran en la sección de análisis de resultados (gráficas 11 a 36).

Los pasos en el voltaje se realizaron cambiando de manera inmediata el voltaje en el electrolizador de 3,25V A 4,75V, cuando el sistema se estabilizaba se hacía un cambio inmediato de 4,75V A 3,25V. Las mediciones se tomaron sobre la carga con diferentes valores de resistencia a la salida, de  $10\Omega$  a  $30\Omega$  con pasos de  $5\Omega$ .

Los pasos en la carga se realizaron cambiando de manera inmediata el valor de la resistencia de salida de  $310\Omega$  a  $10\Omega$ , cuando el sistema se estabilizaba se hacía un cambio inmediato de  $10\Omega$  a  $310\Omega$  y se hacían las mediciones con diferentes valores de voltaje en el electrolizador, desde 3,25V hasta 4,5V con pasos de 0,25V.

#### **4.3. Diseño del convertidor Ćuk**

Una vez caracterizado el sistema compuesto por el electrolizador y las celdas tipo PEM, se diseñó un convertidor Ćuk para poder alimentar los dos LEDs que constituyen la carga. Se eligió este tipo de convertidor debido a que cumple con la función de elevador reductor, que para este caso es necesario debido a que se requiere mantener la máxima potencia en la carga independiente de los cambios de voltaje en la entrada del electrolizador y en la salida de las celdas.

##### **4.3.1. Cálculos convertidor Ćuk**

Para el diseño del convertidor se establecieron los siguientes rangos de voltaje en la entrada y en la salida deseados, basados en los resultados obtenidos anteriormente de la caracterización estática de las celdas tipo PEM:

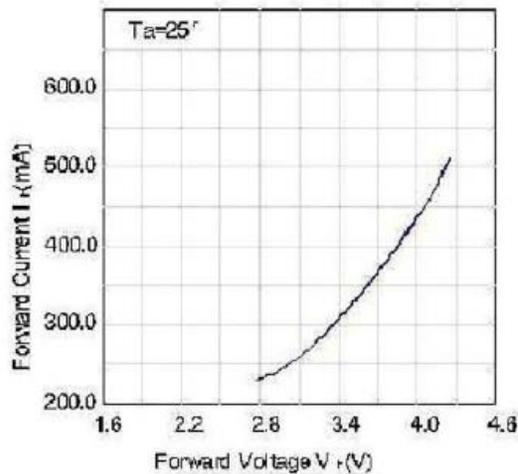
$$4V \leq V_{IN} \leq 6V \quad (3.1)$$

$$4V \leq V_0 \leq 7V \quad (3.2)$$

Los valores de  $V_{IN}$  se escogieron debido a que en ese rango de voltajes es donde la celda de hidrógeno entrega la mayor potencia, como se puede observar en la en las tablas de datos 4 a 15.

Los valores de  $V_0$  se escogieron teniendo en cuenta el punto de operación en el cual trabajarán los LEDs que son la carga del circuito. Analizando la curva característica de voltaje contra corriente de un LED, se observa que con un voltaje de 3,5V se tiene una corriente de 300mA, lo que da una potencia de 1050mW. La implementación de este convertidor se hizo sobre dos LEDs, conectados en serie, por lo que el voltaje sobre los diodos es de 7V con una corriente total de 300mA, lo que significa una potencia de 2100mW, esto determina el máximo voltaje  $V_0$ .

Para establecer el valor de  $V_0$  mínimo, se estableció que se trabajaría con un voltaje mínimo de 2V por cada LED, es decir 4V en total sobre la carga. Según las hojas de especificaciones, con 2V se tiene una corriente de 100mA, es decir una potencia de 200mW por LED.



**Gráfica 3: Curva característica LEDs 1W. Tomado de [20]**

Con los valores de  $V_{IN}$  y  $V_0$  valores establecidos se encontró el ciclo útil en el cual trabajará el convertidor utilizando la ecuación 1.23 de la sección 2 y que reescribimos aquí.

$$D = \frac{V_0}{V_{IN} + V_0} \quad (3.3)$$

$$D_{\min} = \frac{4V}{6V + 4V} = 0,40 \rightarrow 40\% \quad (3.4)$$

$$D_{\max} = \frac{7V}{4V + 7V} = 0,63 \rightarrow 63\% \quad (3.5)$$

Una vez determinado en rango de ciclo útil se fijaron los valores del rizado de corriente y de frecuencia basados en la hoja de especificaciones de los LEDs (Ver anexo 2).

$$D = 0,5 \quad (3.6)$$

$$f = 50KHz \quad (3.7)$$

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = 15mA \quad (3.8)$$

Con estos valores y según las formas de onda de las relaciones entre voltaje y corriente grafica 1 y 2 de la sección 2, se diseñó el convertidor como se muestra a continuación.

Para  $L_{1min}$ :

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_1}{L_1} * DT \quad (3.9)$$

$$15mA = \frac{6V}{L_1} * (0,5 \times 20\mu s) \quad (3.10)$$

$$L_1 = 4,3mH \quad (3.11)$$

Para  $L_{2min}$ :

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_2}{L_2} * DT \quad (3.12)$$

$$15mA = \frac{7V}{L_2} * (0,5 \times 20\mu s) \quad (3.13)$$

$$L_2 = 4,6mH \quad (3.14)$$

Para calcular  $C_2$  se estableció un rizado menor al 1%.

$$C_2 \geq \frac{1 - D}{(\Delta V_0/V_0)8 \cdot I_2 \cdot f^2} \quad (3.15)$$

$$C_2 \geq \frac{1 - 0,5}{(0,01)(8)(500\mu H)(50KHz)^2} \quad (3.16)$$

$$C_2 = 5\mu F \quad (3.17)$$

Para calcular  $C_1$  la tensión media es  $V_{IN} + V_0$  ya que la tensión media en una inductancia debe ser cero, si se supone una variación del 5% en el rizado de  $V_{C1}$  entonces:

$$V_{IN} - V_0 = 6 - 4 = 2 \rightarrow 2 \times 0,05 = 0,1 \quad (3.18)$$

$$C_1 \geq \frac{I_0}{\Delta V_{C1} \cdot f} \quad (3.19)$$

$$C_1 \geq \frac{(80mA)(0,5)}{(0,1)(50KHz)} \quad (3.20)$$

$$C_1 \geq 8\mu F \quad (3.21)$$

### 4.3.2.Elaboración de las inductancias

Para la elaboración de las inductancias se utilizó un núcleo de ferrita en forma de E construido con material 77 ya que estos son ideales para aplicaciones de baja potencia, de hasta 200 vatios.

La ferrita se escogió dependiendo del factor de energía cuya ecuación es la siguiente:

$$E = \frac{1}{2} L * I_{max}^2 \quad (3.22)$$

Donde la corriente máxima y el valor de la inductancia son:

$$I_{max} = I_0 + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.23)$$

$$L_1 \cong L_2 \cong 4mH \quad (3.24)$$

Donde 3.24 es una aproximación de los cálculos en 3.11 y 3.14

Entonces, utilizando las ecuaciones 3.9, 3.12 y 3.22

- Para  $L_1$ :

$$E = \frac{1}{2} L_1 * I_{max}^2 \quad (3.25)$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_i * D * T}{L_1} \quad (3.26)$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{6 * 0,5 * 20\mu s}{4mH} = 15mA \quad (3.27)$$

$$E_1 = \frac{(450mA + 7,5mA)^2 * 4mH}{2} = 418,6\mu Ws \quad (3.28)$$

- Para  $L_2$ :

$$E = \frac{1}{2} L_2 * I_{max}^2 \quad (3.25)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_i * D * T}{L_2} \quad (3.26)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{6 * 0,5 * 20\mu s}{4mH} = 15mA \quad (3.27)$$

$$E_2 = \frac{(450mA + 7,5mA)^2 * 4mH}{2} = 418,6\mu Ws \quad (3.28)$$

Luego de obtener las energías para cada inductor, calculamos ahora el área producto  $A_p$ .

$$A_p = \left( \frac{2E \times 10^4}{B_m * K_v * K_j} \right)^{1,14} \quad (3.29)$$

Donde  $B_m$  es la densidad de flujo máximo,  $K_v$  es el factor de utilización de ventana y  $K_j$  es un coeficiente de densidad de corriente, para nuestro caso  $B_m=0,46$ ,  $K_v=0,4$  y  $K_j=366$  según la hoja de especificaciones (ver anexo 7), y utilizando aproximaciones para este tipo de ferritas encontradas en [28], entonces:

$$A_p = 2 \left( \frac{418,6 \mu W s \times 10^4}{0,46 * 0,4 * 366} \right)^{1,14} \quad (3.30)$$

$$A_p = 0,09 \text{ cm}^4 \quad (3.31)$$

Debido a que el  $A_p$  de todas las ferritas de material 77 de Amidon es mayor a la calculada es posible escoger cualquier referencia ya que todas funcionan correctamente para este trabajo de grado, así que se eligió la que se encontraba disponible en el laboratorio de electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana. La referencia de la ferrita usada es EA-77-250 de Amidon, cuyas dimensiones se encuentran en la Figura 17 y la Tabla 16.

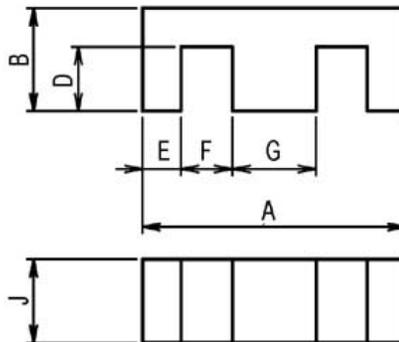


Figura 17: Descripción física ferrita EA-77-250. Tomado de [22]

E-Core Physical Dimensions (inches)								
Part No.	A	B	C	D	E	F	G	Power
EA-77-188	.760	.318	.187	.225	.093	.192	.187	10 watts
EA-77-250	1.000	.380	.250	.255	.125	.250	.250	20 watts
EA-77-375	1.375	.562	.375	.375	.187	.312	.375	70 watts
EA-77-500	1.625	.650	.500	.405	.250	.312	.500	100 watts
EA-77-625	1.680	.825	.605	.593	.234	.375	.468	200 watts

E-Core Magnetic Properties							
Part No.	$A_e$ mm <sup>2</sup>	$\epsilon_e$ mm	$V_e$ mm <sup>3</sup>	$A_s$ mm <sup>2</sup>	$A_w$ mm <sup>2</sup>	$A_c \times A_w$ mm <sup>4</sup>	$A_L$ value mh/1000 turns
E-77-188	22.5	40.1	900	1050	55.7	1250	1060
E-77-250	40.4	48.0	1930	1700	80.6	3250	1660
E-77-375	90.3	68.8	6240	3630	151.0	13700	2760
E-77-500	160.0	76.7	12300	5410	163.0	26100	4470
E-77-625	184.0	98.0	18000	7550	287.0	52900	5300

**Tabla 16: Dimensiones y propiedades ferritas Amidon tipo E. Tomado de [22]**

Teniendo el área efectiva del núcleo, podemos saber el número de vueltas necesario para obtener nuestros valores de inductancia utilizando la siguiente ecuación:

$$N = 1000 \sqrt{\frac{L \text{ deseado}}{A_L}} \quad (3.32)$$

$$N = 1000 \sqrt{\frac{4mH}{16600}} \quad (3.33)$$

$$N = 49,088 \cong 49 \quad (3.34)$$

### 4.3.3. Circuito impreso

Una vez probado el circuito en laboratorio, se realizó el circuito impreso para el montaje final utilizando el software libre Eagle. Este circuito impreso está compuesto por dos partes, la primera donde se encuentra la etapa de potencia, convertidor Ćuk, y la segunda correspondiente al control del convertidor, donde se encuentra el PWM y el driver del Mosfet.

#### 4.3.3.1. Esquemático etapa de potencia

En la

Figura 18 se muestra el esquemático de la etapa de potencia que corresponde al circuito del convertidor Ćuk.  $V_{IN}$  es la entrada de voltaje, a la cual ingresa el voltaje de salida de la celda tipo PEM que varía entre 4V y 6V. Los pines PWM son la entrada de la señal de control encargada de hacer que el Mosfet conmute. Se trata de una señal de pulsos con una amplitud de 9V.  $V_0$  es la salida del convertidor a la carga, entre 4V y 7V.

El Mosfet utilizado es un NTE2904, esta referencia fue elegida por sus características eléctricas ya que se ajustan a este diseño. Como se puede ver en la hoja de especificaciones este Mosfet es capaz de soportar la corriente máxima en los dos inductores  $L_1$  y  $L_2$ , además el voltaje  $V_{DS}$  es superior al voltaje instantáneo máximo del capacitor  $C_1$ , aproximadamente 13V, por último el voltaje de encendido es menor que el voltaje de entrada al convertidor asegurando la activación del Mosfet,  $V_{GS} < 6V$ . (Ver anexo 3)

En cuanto al Diodo se utilizó un NTE586, se trata de un diodo Schottky que se caracteriza por una rápida conmutación y una resistencia muy baja durante la conducción, por lo que la caída de voltaje es muy pequeña dando así una disipación de potencia mínima. Durante el periodo de carga de  $L_1$ , el diodo se encuentra expuesto al voltaje de  $V_{C1} = V_{IN} + V_0$  por esta razón el voltaje de ruptura inversa del diodo debe ser mayor al voltaje del condensador, es decir mayor a 13V. Por ultimo al igual que el Mosfet, el diodo tiene que soportar las corrientes máximas que aportan los inductores  $L_1$  y  $L_2$ . (Ver anexo 4)

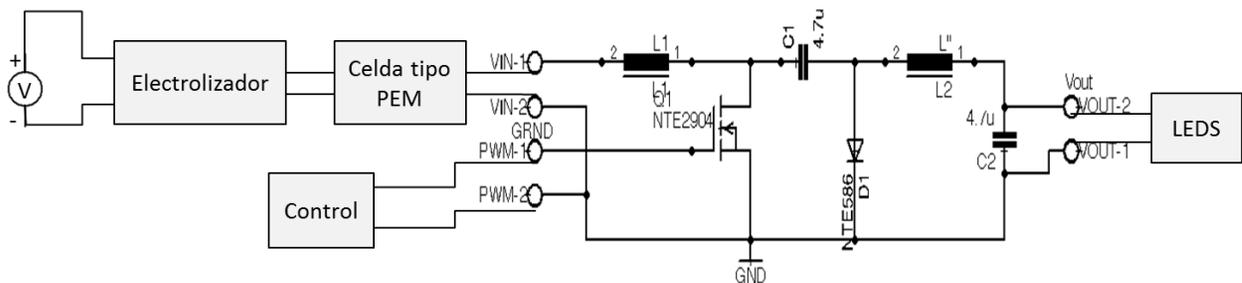


Figura 18: Esquemático etapa de potencia.

#### 4.3.3.2. Esquemático etapa de control

En la

Figura 19 se presenta el esquemático de la etapa de control, circuito encargado de generar una señal de PWM que posteriormente se conecta en el gate del Mosfet del convertidor para que este conmute.

Los pines X1-2 y X2-2 corresponden a la tierra del circuito, X2-1 a la polarización de los integrados SG3524 e IR2110 por medio de una batería de 9V y X1-1 a la salida del circuito, una señal de pulsos con amplitud de 9V.

El integrado SG3524 fue diseñado para trabajar en convertidores DC-DC, incluye un regulador, un amplificador de error, un oscilador programable, un flip-flop, un comparador de alta ganancia, un limitador de corriente y un circuito de parada, este integrado tiene como objetivo generar un tren de pulsos. El integrado IR2110 es un driver para Mosfet e IGBT que garantiza que el mosfet se encienda, con canales de salida independientes para alto y bajo. (Ver anexo 5 y 6)

Esta etapa de control está diseñada para poder modificar el ciclo útil de la señal de PWM manualmente por medio de un potenciómetro de 10k, con el fin de encontrar el punto de potencia máximo.

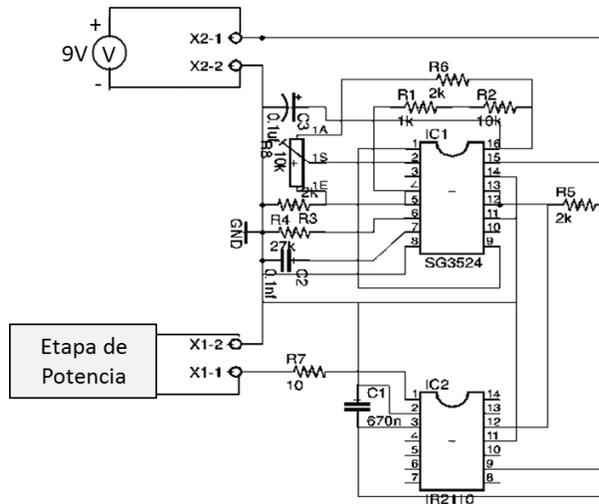
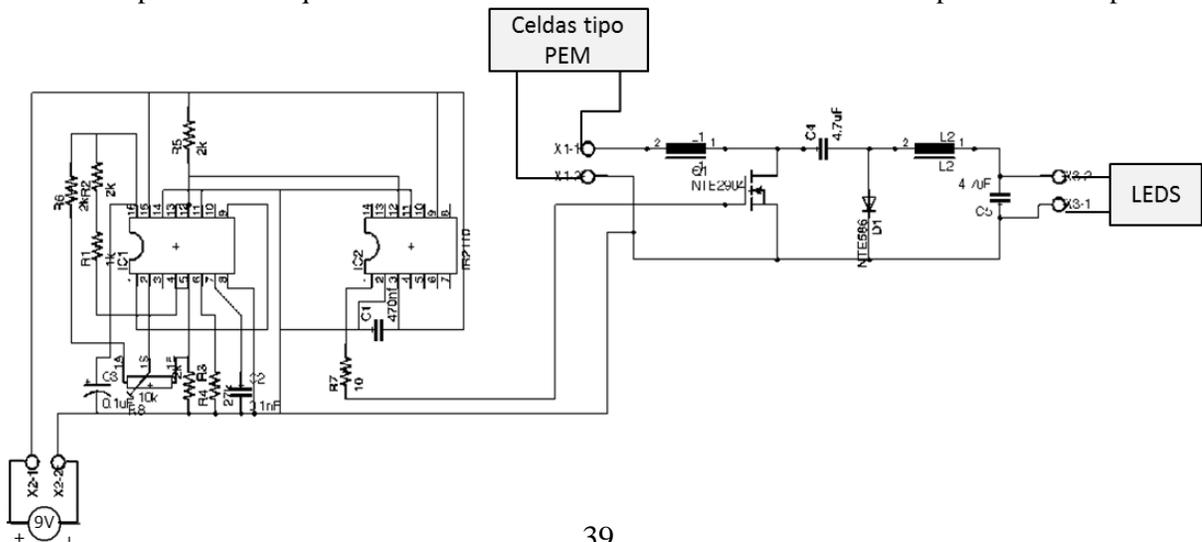


Figura 19: Esquemático etapa de control.

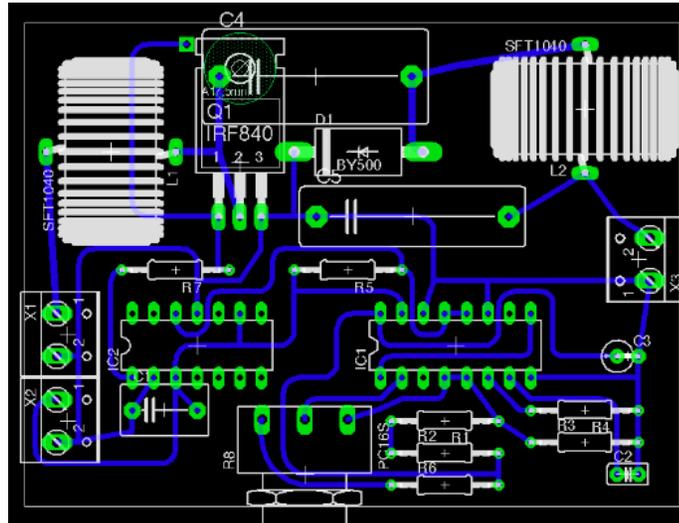
#### 4.3.3.3. Esquemático convertidor Ćuk con el control

Por último se presenta el esquemático de todo el circuito donde la tierra es común para ambas etapas.



**Figura 20: Esquemático convertidor Ćuk y control.**

En Figura 21 donde se aprecia la ubicación final de los componentes y sus interconexiones.



**Figura 21: Layout circuito impreso.**

#### **4.3.4. Implementación del convertidor.**

Una vez caracterizado el sistema de las celdas de hidrógeno y diseñado el convertidor Ćuk, se procedió a implementar el convertidor en la alimentación de los LEDs utilizando la celda de combustible como fuente de energía. Para conocer el funcionamiento del sistema se realizaron medidas sobre 6 voltajes diferentes en la entrada del electrolizador (de 3,25V a 4,5V con pasos de 0,25V), se tomaron datos de voltaje, corriente y potencia con variaciones en el ciclo útil, las medidas se hicieron en la entrada del convertidor (salida de las celdas tipo PEM) y en los LEDs (carga del sistema). Cada medición se realizó 3 veces, luego se promediaron para tener un valor medio de los registros y poder analizar de manera más acertada el comportamiento del sistema. De la Tabla 17 a la Tabla 22 se muestran los datos de las mediciones realizadas.

1						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cc/s)		
3,25	0,39			0,147		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Corriente (mA)	Eficiencia
7,74	63,84	5,139	8,84	46,07		72,16%
14,47	111,89	5,249	17,19	90,99		81,32%
39,51	283,76	5,51	44,63	250,95		88,44%
62	426,73	5,585	66,31	378,88		88,79%
48,33	293,14	5,429	38,38	218,33		74,48%
72,98	364,82	5,54	59,41	337,47		92,50%
74,99	302,71	5,475	49,36	277,51		91,68%
86,05	283,96	5,47	45,75	257,2		90,58%
84,24	217,94	5,144	36,9	206,42		94,71%

2						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cc/s)		
3,25	0,42			0,167		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	7,984	7,69	72,83	5,18	8,59	71,84%
0,4	7,593	14,72	123,61	5,286	17,34	80,72%
0,45	7,02	40,65	296,85	5,502	45,58	87,83%
0,485	6,391	67,79	445,48	5,577	63,97	82,51%
0,5	5,713	40,79	241,97	5,432	38,18	89,35%
0,55	4,881	80,36	396,96	5,544	57,24	81,01%
0,6	3,926	74,83	297,94	5,51	48,8	91,68%
0,65	3,192	85,38	277,04	5,499	44,08	88,93%
0,7	2,504	83,17	212	5,433	35,44	92,54%

41

3						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cc/s)		
3,25	0,42			0,167		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,080	7,877	68,720	5,170	9,047	73,151%
0,4	7,640	14,673	117,657	5,273	17,427	81,306%
0,45	7,028	40,140	289,530	5,507	45,097	88,019%
0,485	6,503	68,240	453,983	5,606	69,243	87,254%
0,5	5,766	45,037	268,373	5,442	39,307	82,999%
0,55	4,905	79,710	397,317	5,556	59,940	85,525%
0,6	3,928	74,683	298,880	5,498	49,020	91,899%
0,65	3,213	89,300	293,150	5,486	44,980	86,464%
0,7	2,514	83,940	216,520	5,338	36,437	92,193%

PROMEDIO						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cc/s)		
3,25	0,41			0,160		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,080	7,877	68,720	5,170	9,047	73,151%
0,4	7,640	14,673	117,657	5,273	17,427	81,306%
0,45	7,028	40,140	289,530	5,507	45,097	88,019%
0,485	6,503	68,240	453,983	5,606	69,243	87,254%
0,5	5,766	45,037	268,373	5,442	39,307	82,999%
0,55	4,905	79,710	397,317	5,556	59,940	85,525%
0,6	3,928	74,683	298,880	5,498	49,020	91,899%
0,65	3,213	89,300	293,150	5,486	44,980	86,464%
0,7	2,514	83,940	216,520	5,338	36,437	92,193%

Tabla 16: Implementación del convertidor 1 uk con con 3,25V en el electrolizador.

**1**

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
3,5	0,74			0,330		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,04	6,93	65,52	5,151	7,43	44,43	67,81%
7,651	13,57	112,11	5,226	15,78	88,28	78,74%
7,048	40,172	285,2	5,44	41	229,3	80,40%
6,231	100,47	627,9	5,666	94,06	535,55	85,29%
6,055	132,96	828,1	5,942	122,41	750	90,57%
5,063	92,26	484,4	5,741	71,66	424,8	87,70%
4,359	158,39	719,7	5,854	101,61	614,3	85,36%
3,467	148,24	540	5,703	78,29	461,9	85,54%
2,701	153,97	444,3	5,653	65,32	380,9	85,73%

**2**

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)			
3,5	0,74			0,333			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)							
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
0,35	8,29	8,68	89,2	5,112	10,44	64,8	72,65%
0,4	7,825	16,77	149,8	5,253	19,94	116,6	77,84%
0,45	7,207	49,14	371,5	5,504	57,05	328,5	88,43%
0,5	6,418	128,28	843,2	5,805	123,36	733,8	87,03%
0,55	5,102	117,55	615,6	5,66	87,83	514,1	83,51%
0,6	4,072	108,41	454,5	5,519	64,26	369,5	81,30%
0,65	3,408	150,27	525,8	5,589	80,44	465,2	88,47%
0,7	2,579	132,68	353,9	5,454	50,54	290,4	82,06%

**3**

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
3,5	0,76			0,340		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,283	8,16	85,3	5,107	10,27	63,9	74,91%
7,81	15,89	141	5,248	19,94	116,6	82,70%
7,207	49,14	371,5	5,499	57,4	329,5	88,69%
6,388	131,8	860,7	5,805	125,99	749,4	87,07%
5,097	113,86	596,1	5,634	90,47	525,8	88,21%
4,047	104,01	434	5,554	70,07	404,7	93,25%
3,383	151,5	526,8	5,584	80,79	467,2	88,69%
2,569	112,28	298,2	5,489	48,96	283,6	95,10%

**PROMEDIO**

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)			
3,5	0,746666667			0,334			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)							
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
0,35	8,204	7,923	80,007	5,123	9,380	57,710	71,79%
0,4	7,762	15,410	134,303	5,242	18,553	107,160	79,76%
0,45	7,154	46,151	342,733	5,481	51,817	295,767	85,84%
0,5	6,346	120,183	777,267	5,759	114,470	672,917	86,46%
0,525	6,055	132,960	828,100	5,942	122,410	750,000	90,57%
0,55	5,087	107,890	565,367	5,678	83,320	488,233	86,47%
0,6	4,159	123,603	536,067	5,642	78,647	462,833	86,63%
0,65	3,419	150,003	530,867	5,625	79,840	464,767	87,57%
0,7	2,616	132,977	365,467	5,532	54,940	318,300	87,63%

Tabla 17: Implementación del convertidor ! uk con 3,5V en el electrolizador.



1

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)	
1,55	0,4545455	1,55			0,455	
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)			SALIDA CELDA DE HIDROGENO	
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,065	5,18	46,88	5,213	6,29	36,72	78,33%
7,688	13,93	116,02	5,339	16,54	96,09	82,82%
7,186	39,66	298,83	5,54	44,88	262,5	87,84%
6,357	107,23	705,08	5,854	98,39	597,66	84,76%
5,59	199,4	1150,2	6,03	158,14	982,03	85,38%
4,899	284,42	1448,1	6,218	187,84	1205,9	83,27%
4,309	187,84	846,5	5,854	124,92	757,7	89,51%
3,693	257,79	999,9	5,867	133,57	810,4	81,05%
3,015	334,3	1072,1	5,917	139,95	857,3	79,96%

4

3

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)	
1,61	0,5678592	1,61			0,568	
SALIDA CELDA DE HIDROGENO						
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)			SALIDA CELDA DE HIDROGENO	
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,221	6,06	58	5,17	8,54	49,2	84,83%
7,767	16,839	138,1	5,324	19,4	108,8	78,78%
7,068	58,82	422,3	5,606	66,43	378,3	89,58%
6,41	147,39	952,5	5,862	133,37	788,5	82,78%
5,686	244,62	1395,9	6,088	188,14	1149,8	82,37%
5,364	285,32	1536,5	6,093	216,18	1321,7	86,02%
4,44	225,02	1003,3	5,842	144,22	846,1	84,33%
3,867	282,91	1099	5,922	161,91	963,3	87,65%
2,902	285,8	835,3	5,71	109,2	631,2	75,57%

2

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
4	1,6	1,6			0,496		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO							
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)			SALIDA CELDA DE HIDROGENO		
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
0,35	8,107	9,56	96,1	5,117	10,62	65,8	68,47%
0,4	7,745	16,6	145,9	5,248	19,41	113,7	77,93%
0,45	7,172	50,19	378,3	5,499	57,23	328,5	86,84%
0,5	6,378	130,39	851	5,795	124,59	740,6	87,03%
0,55	2,584	229,59	1303,1	5,961	180,17	1094,1	83,96%
0,58	5,167	284,81	1496,5	6,006	206,9	1264,1	84,47%
0,6	4,373	218,16	974	5,76	134,26	791,4	81,25%
0,65	3,685	292,38	1098	5,856	159,76	954,5	86,93%
0,7	2,83	254,56	736,7	5,685	112,45	656,6	89,13%

PROMEDIO

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
4	1,586666667			0,506			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO							
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)			SALIDA CELDA DE HIDROGENO		
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
0,35	8,131	6,933	66,993	5,167	8,483	50,573	77,21%
0,4	7,733	15,790	133,340	5,304	18,450	106,197	79,85%
0,45	7,142	49,557	366,477	5,548	56,180	323,100	88,09%
0,485	6,382	128,337	836,193	5,837	118,783	708,920	84,86%
0,5	4,620	224,537	1283,067	6,026	175,483	1075,310	83,90%
0,55	5,143	284,850	1493,700	6,106	203,640	1263,900	84,59%
0,6	4,374	210,340	941,267	5,819	134,467	798,400	85,03%
0,65	3,748	277,693	1065,633	5,882	151,747	909,400	85,21%
0,7	2,916	291,553	881,367	5,771	120,533	715,033	81,55%

Tabla 19: Implementación del convertidor i uk con 4V en el electrolizador.

1

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)	
4,25		2,11			0,637	
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)				
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,392	9,92	93,6	5,201	12,31	72,1	77,03%
7,839	20,35	170,8	5,246	23,74	139,5	81,67%
7,205	48,87	377,8	5,497	55,15	329	87,08%
6,376	125,63	854,4	5,748	120,6	744	87,08%
5,547	220,85	1312,24	6,025	175,38	1124,9	85,72%
4,765	360,73	1669,4	6,067	230,99	1424,2	85,31%
4,592	353,39	1752,8	6,075	226,63	1463,7	83,51%
3,788	282,54	1176,6	6,025	164,7	1055,5	89,71%
3,085	401,83	1379,7	5,999	160,18	1022,3	74,10%

2

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
4,25		2,12			0,639		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)					
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia	
0,35	8,167	94,1	5,102	10,97	67,8	72,05%	
0,4	7,775	17,48	5,253	20,47	119,5	77,75%	
0,45	7,172	54,59	5,504	61,98	354,9	86,65%	
0,5	6,403	134,61	882,2	5,79	128,63	763,1	86,50%
0,55	5,624	238,91	1365,6	5,981	188,08	1144,9	83,84%
0,6	4,775	343,73	1667,4	6,067	230,99	1424,2	85,41%
0,61	4,592	353,39	1752,8	6,047	236,97	1455,5	83,04%
0,65	3,705	315,07	1189,8	5,815	163,46	971,1	81,62%
0,7	3,087	407,4	1280,7	5,999	160,18	1022,3	79,82%

45

3

ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)	
4,25		2,14			0,640	
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)				
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia
8,559	11,32	115,6	5,092	12,38	74,6	64,53%
7,861	21,17	184	5,253	25,74	147,8	80,33%
7,253	58,99	445,7	5,504	66,2	378,3	84,88%
6,444	144,64	951,6	5,82	141,65	844,1	88,70%
5,68	250,69	1446,7	5,976	196,35	1194,7	82,58%
4,79	350,07	1704,5	6,087	235,04	1435,5	84,22%
4,745	377,15	1816,8	6,067	237,15	1462,3	80,49%
3,8	337,75	1307	5,996	167,15	1021,9	78,19%
3,117	418,48	1327,5	5,981	177,18	1079,5	81,32%

PROMEDIO

ELECTROLIZADOR							
VOLTAJE IN (V)		CORRIENTE IN (A)			FLUJO H2 (cd/s)		
4,25		2,123333333			0,639		
SALIDA CELDA DE HIDROGENO		SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)					
Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Eficiencia	
0,35	8,373	10,210	101,100	5,132	11,887	71,500	71,20%
0,4	7,825	19,667	169,500	5,251	23,317	135,600	79,92%
0,45	7,210	54,150	411,033	5,502	61,110	354,067	86,20%
0,5	6,408	134,960	896,067	5,786	130,293	783,733	87,43%
0,55	5,617	236,817	1374,847	5,994	186,603	1154,833	84,05%
0,6	4,777	351,510	1680,433	6,074	232,340	1427,967	84,98%
0,61	4,643	361,310	1774,133	6,063	233,583	1460,500	82,34%
0,65	3,764	311,787	1224,467	5,945	165,103	1016,167	83,17%
0,7	3,096	409,237	1329,300	5,993	165,847	1041,367	78,41%

Tabla 20: Implementación del convertidor 1 uk con 4,25V en el electrolizador.

1						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)		FLUJO H2 (cc/s)			
4,5	2,56		0,870			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,119	6,03	49,61	5,223	8,94	97,64%
0,4	7,836	15,08	121,09	5,336	18,39	84,52%
0,45	7,221	50,54	385,16	5,625	57,08	88,23%
0,5	6,442	125,32	830,86	5,877	117,78	86,98%
0,55	5,638	222,55	1298,7	6,14	174,69	85,49%
0,6	4,846	325,37	1641,9	6,329	213,43	85,01%
0,65	3,958	417,48	1665,4	6,104	242	89,56%
0,7	3,352	483,73	1646,9	6,028	199,86	74,26%

2						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)		FLUJO H2 (cc/s)			
4,5	2,56		0,890			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,454	10,27	104,9	5,097	11,15	65,49%
0,4	7,871	19,76	174,2	5,253	25,04	82,61%
0,45	7,253	59,16	446,7	5,514	67,25	86,21%
0,5	6,459	147,98	976	5,83	142,7	87,19%
0,55	5,68	254,39	1498,2	6,057	197,93	81,44%
0,6	4,83	363,43	1782,6	6,172	230,82	81,16%
0,65	3,956	422,53	1699,6	6,122	250,87	91,78%
0,7	3,243	497,98	1642	5,906	188,61	69,07%

3						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)		FLUJO H2 (cc/s)			
4,5	2,56		0,890			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,66	10,09	106,8	5,092	11,85	67,13%
0,4	7,936	21,7	189,8	5,348	25,22	77,87%
0,45	7,288	66,9	505,3	5,559	75,69	86,27%
0,5	6,509	156,95	1041,4	5,85	152,73	87,72%
0,55	5,73	265,99	1548,2	6,031	211,47	83,79%
0,6	4,851	365,54	1800,2	6,142	247,18	85,57%
0,65	4,016	446,97	1824,6	6,117	249,64	85,02%
0,7	3,212	468,43	1530,7	5,906	192,13	75,44%

PROMEDIO						
ELECTROLIZADOR						
VOLTAJE IN (V)	CORRIENTE IN (A)		FLUJO H2 (cc/s)			
4,5	2,56		0,890			
SALIDA CELDA DE HIDROGENO SALIDA CONVERTIDOR (LEDS)						
Ciclo útil	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Eficiencia
0,35	8,411	8,797	87,103	5,137	10,647	76,76%
0,4	7,881	18,847	161,697	5,312	22,883	81,66%
0,45	7,254	58,867	445,720	5,566	66,673	86,90%
0,5	6,470	143,417	949,420	5,852	137,737	87,30%
0,55	5,683	247,643	1448,367	6,076	194,697	83,57%
0,6	4,842	351,447	1741,567	6,214	230,477	83,91%
0,65	3,977	428,993	1729,867	6,114	247,503	88,79%
0,7	3,269	483,380	1606,533	5,947	193,533	72,92%

Tabla 21: Implementación del convertidor ! uk con 4,5V en el electrolizador.

De la Tabla 17 a la Tabla 22 contienen los datos de las mediciones realizadas, donde se puede observar lo siguiente:

- 3,25V en el electrolizador.

Como se puede ver en la Tabla 17, el electrolizador se alimentó un voltaje de 3,25V en la entrada, una corriente de 0,41A y un flujo de hidrógeno de 0,16cc/s, bajo estas condiciones, se varió el ciclo útil de 35% a 70% con pasos de 5%. Los resultados muestran que el voltaje de entrada en el convertidor (que es el voltaje de salida de la celda de combustible) varía disminuyendo desde 8,08V hasta 2,514V y la corriente va aumentando desde 7,877mA hasta 83,94mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 453,983mW y la mínima fue 68,72mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 48,5%, con un voltaje de 6,503V y una corriente de 68,24mA.

En la salida de convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,17V y 5,606V, la corriente 9,047mA y 69,243mA y la potencia 50,273mW y 396,497mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 48,5% con un voltaje de 5,606V y una corriente de 69,243mA y una eficiencia de 87,25%. La eficiencia del convertidor es de 85,423% en promedio, lo cual muestra el circuito trabaja de manera efectiva ya que las pérdidas de energía existentes en los componentes del convertidor son del 14,577%.

- 3,5V en el electrolizador.

La Tabla 18 corresponde a las mediciones sobre la segunda curva, el electrolizador se alimentó con un voltaje de 3,5V en la entrada, una corriente de 0,474A y un flujo de hidrógeno de 0,34cc/s, el ciclo útil se varió desde 35% hasta 70% con pasos de 5%. Los resultados sobre la entrada del convertidor muestran que el voltaje disminuye desde 8,204V hasta 2,616V, la corriente aumenta desde 7,923mA hasta 32,977mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 828,1mW y la mínima fue 80,007mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 52,5%, con un voltaje de 6,055V y una corriente de 132,96mA.

En cuanto a la salida convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,123V y 5,942V, la corriente 9,38mA y 122,41mA y la potencia 57,71mW y 750mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 52,5% con un voltaje de 5,942V y una corriente de 122,41mA y una eficiencia de 90,57%. La eficiencia del convertidor es de 87,31% en promedio, lo cual muestra el circuito trabaja de manera efectiva ya que las pérdidas de energía existentes en los componentes del convertidor son del 12,69%.

- 3,75V en el electrolizador.

La Tabla 19 muestra las mediciones hechas sobre la tercera curva, el electrolizador se alimentó con un voltaje de 3,75V en la entrada, una corriente de 1,16A y un flujo de hidrógeno de 0,42cc/s, el ciclo útil se varió desde 35% hasta 70% con pasos de 5%. Los resultados sobre la entrada del convertidor muestran que el voltaje disminuye desde 8,178V hasta 2,802V, la corriente aumenta desde 9,61mA hasta 228,937mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 1150,6mW y la mínima fue 91,733mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 55%, con un voltaje de 5,653V y una corriente de 202,84mA.

En cuanto a la salida convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,148V y 5,936V, la corriente 9,61mA y 228,937mA y la potencia 91,733mW y 1150,6mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 55% con un voltaje de 5,653V y una corriente de 202,84mA y una eficiencia de 85,82%. La eficiencia del convertidor es de 85,09% en promedio, lo cual muestra el circuito trabaja de manera efectiva ya que las pérdidas de energía existentes en los componentes del convertidor son del 14,91%.

- 4V en el electrolizador.

La Tabla 20 muestra los resultados de la cuarta curva, el electrolizador tenía un voltaje de 4V en la entrada, una corriente de 1,59A y un flujo de hidrógeno de 0,506cc/s, el ciclo útil se varió desde 35% hasta 70% con pasos de 5%. Los resultados sobre la entrada del convertidor muestran que el voltaje disminuye desde 8,131V hasta 2,916V, la corriente aumenta desde 6,933mA hasta 291,553mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 1493,7mW y la mínima fue 66,993mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 55%, con un voltaje de 5,143V y una corriente de 284,85mA.

En cuanto a la salida convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,304V y 6,106V, la corriente 8,483mA y 203,64mA y la potencia 50,573mW y 1263,9mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 55% con un voltaje de 6,106V y una corriente de 203,64mA y una eficiencia de 84,59%. La eficiencia del convertidor es de 83,36% en promedio, lo cual muestra el circuito trabaja de manera efectiva ya que las pérdidas de energía existentes en los componentes del convertidor son del 16,64%.

- 4,25V en el electrolizador.

La Tabla 21 muestra las mediciones hechas sobre la quinta curva, el electrolizador se alimentó con un voltaje de 4,25V en la entrada, una corriente de 2,12A y un flujo de hidrógeno de 0,639cc/s, el ciclo útil se varió desde 35% hasta 70% con pasos de 5%. Los resultados sobre la entrada del convertidor muestran que el voltaje disminuye desde 8,373V hasta 3,096V, la corriente aumenta desde 10,21mA hasta 409,237mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 1774,133mW y la mínima fue 101,1mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 61%, con un voltaje de 4,643V y una corriente de 361,31mA.

En cuanto a la salida convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,132V y 6,074V, la corriente 11,87mA y 233,583mA y la potencia 71,5mW y 1460,5mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 61% con un voltaje de 6,063V y una corriente de 233,583mA y una eficiencia de 82,34%. La eficiencia del convertidor es de 81,97% en promedio, lo cual muestra el circuito trabaja de manera efectiva ya que las pérdidas de energía existentes en los componentes del convertidor son del 18,03%.

- 4,5V en el electrolizador.

En la Tabla 22 se muestra los datos última curva, el electrolizador se alimentó con un voltaje de 4V en la entrada, una corriente de 2,56A y un flujo de hidrógeno de 0,89cc/s, el ciclo útil se varió desde 35% hasta 70% con pasos de 5%. Los resultados sobre la entrada del convertidor muestran que el voltaje disminuye desde 8,411V hasta 3,269V, la corriente aumenta desde 8,797mA hasta 483,38mA, la máxima potencia obtenida en este caso fue de 1741,567mW y la mínima fue 87,103mW. El punto de máxima potencia se encontró en un ciclo útil de 60%, con un voltaje de 4,842V y una corriente de 351,447mA.

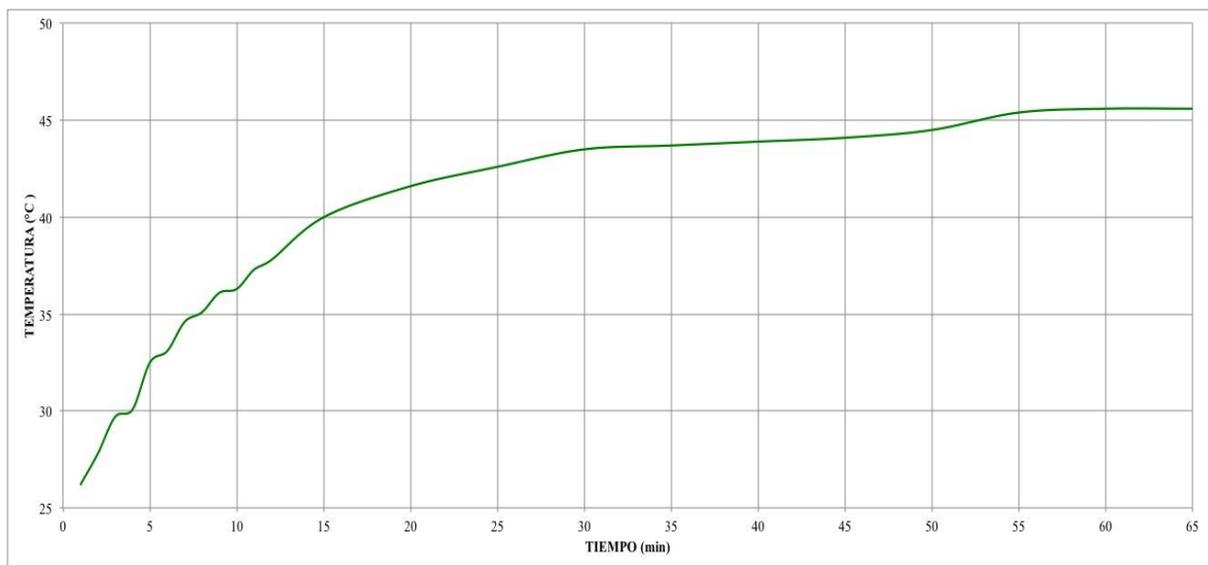
En cuanto a la salida convertidor (LEDs), se puede ver que el voltaje varía entre 5,137V y 6,214V, la corriente 10,647mA y 230,477mA y la potencia 62,947mW y 1534,233mW. La máxima potencia se encuentra en un ciclo útil del 65% con un voltaje de 6,114V y una corriente de 247,503mA y una eficiencia de 88,79%. La eficiencia del convertidor es de 82,73% en promedio, este valor a pesar de ser menor a la eficiencia de las curvas anteriores, se puede decir que es un valor de eficiencia favorable ya que las pérdidas son pequeñas. Por otro lado en esta curva se ve que el ciclo útil en el que se hacen máximas las potencias de entrada y de salida no coinciden, esto se debe a que la eficiencia en el 60% es de 83,91% mientras que en el ciclo útil del 65% la eficiencia es de 88,97%.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

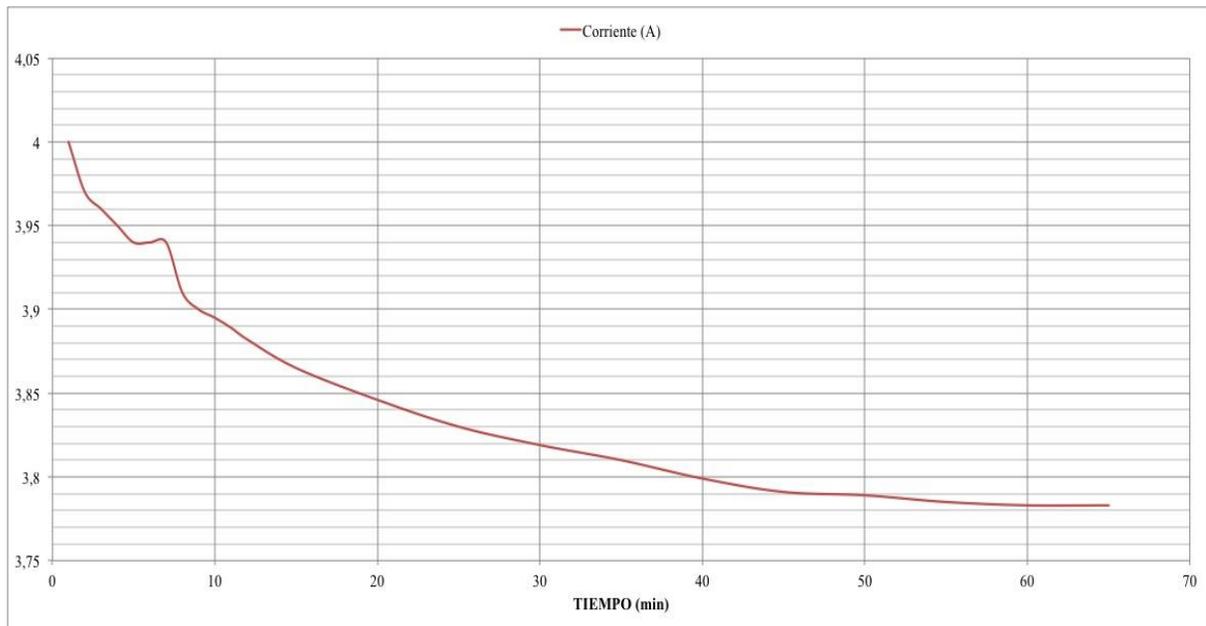
### 5.1. Caracterización estática del sistema de celdas de combustible

#### 5.1.1. Caracterización estática del electrolizador

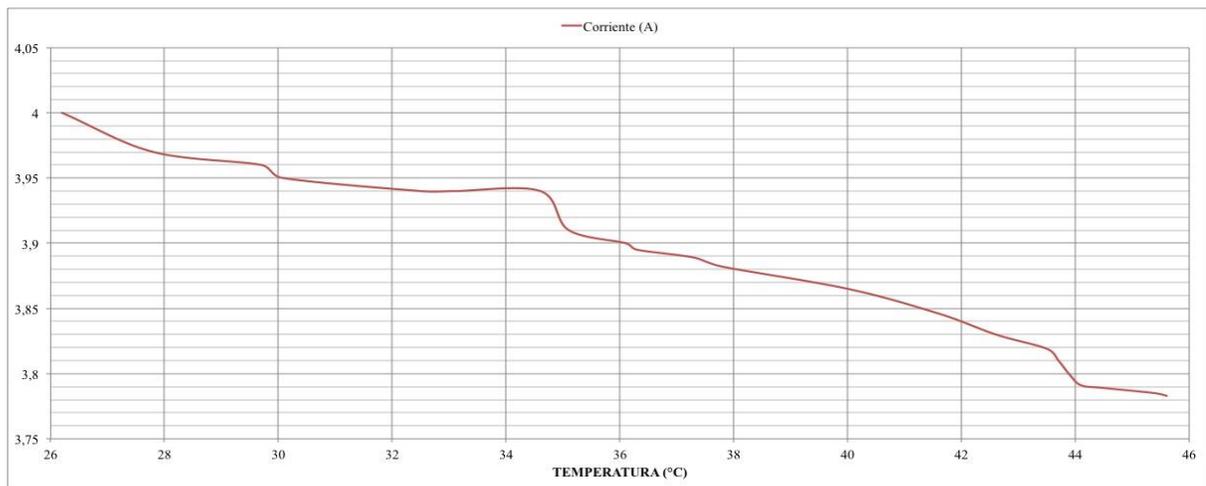
Para realizar el análisis de los resultados mostrados anteriormente en la tabla 3 se realizaron las siguientes gráficas donde se evidencia el comportamiento de los parámetros medidos.



**Gráfica 4: Comportamiento térmico del electrolizador con respecto al tiempo.**



**Gráfica 5: Comportamiento la corriente con respecto al tiempo.**



**Gráfica 6: Comportamiento la corriente con respecto a la temperatura.**

**Al realizar la caracterización estática del electrolizador se pudo observar que su comportamiento varía con el paso del tiempo, las gráficas muestran que la corriente varía dependiendo de la temperatura del electrolizador, la cual a su vez aumenta con el tiempo. Como se puede observar en la**

Gráfica 4, la temperatura del electrolizador tiene un crecimiento asintótico con respecto al tiempo, conforme pasa el tiempo la temperatura aumenta rápidamente hasta que comienza a llegar al equilibrio a los 55 minutos con una temperatura de 45,40°C y finalmente lo alcanza a los 60 minutos con 45,60°C. El electrolizador tuvo un aumento de 19,4°C durante 65 minutos de funcionamiento. La Gráfica 6 muestra cómo se comporta la corriente con respecto a la temperatura. Se puede ver como la corriente disminuye linealmente al aumentar la temperatura. La pendiente con la que cae la corriente es de  $-0,011^{\circ}\text{C}/\text{A}$ , y el cambio que se presenta en la corriente desde el inicio hasta el final de la prueba es de 217mA.

Las relaciones descritas anteriormente entre la temperatura con el tiempo y la temperatura la corriente, implican que exista también una relación en el comportamiento la corriente con el tiempo. Como se puede ver en la Gráfica 5 la corriente es inversamente proporcional al tiempo pues disminuye al aumentar el

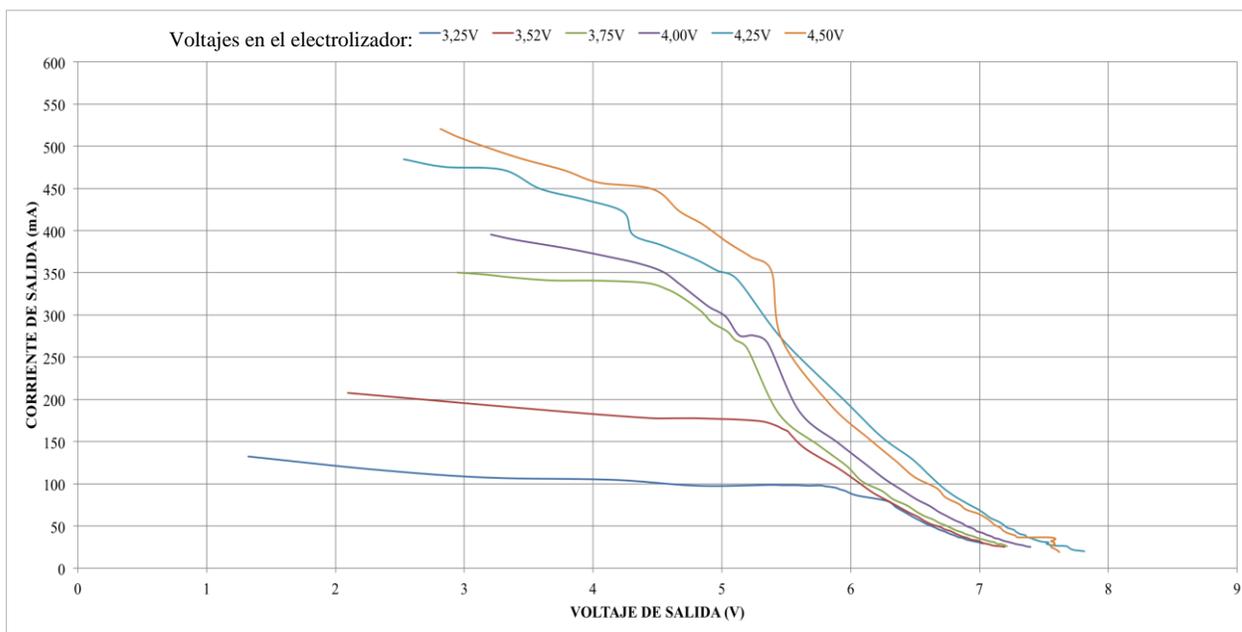
tiempo. La corriente presenta un decrecimiento exponencial con respecto al tiempo, esto se debe a que al superar los 60 minutos la temperatura se estabiliza, por tanto la corriente llega también al punto de equilibrio 3,783A.

### 5.1.2. Caracterización estática del arreglo de celdas tipo PEM

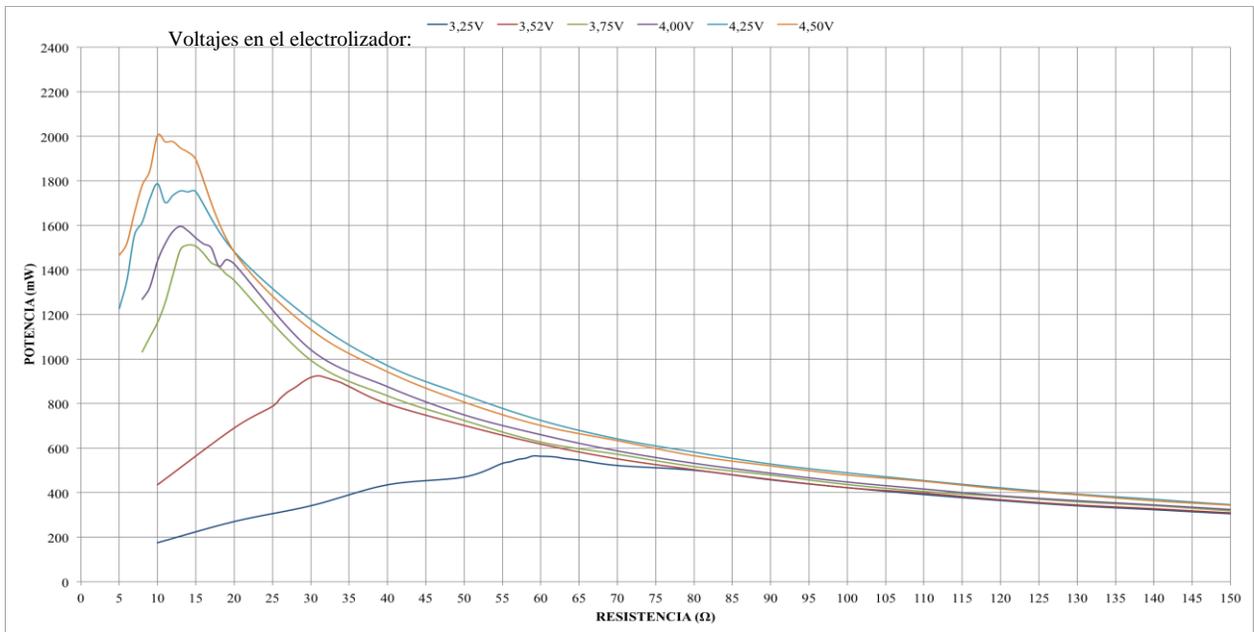
Para poder realizar el análisis de los resultados obtenidos en laboratorio, se graficaron los datos mostrados anteriormente en las tablas 4 a 15, los datos graficados corresponden a los valores promedio de las tablas. En este análisis se realizó la familia de curvas que describe el comportamiento de las celdas tipo PEM, para ello se realizaron 6 curvas diferentes en cada gráfica, cada curva corresponde a un voltaje de entrada en el electrolizador diferente, de 3,25V a 4,5V con intervalos de 0,25V, lo que varía el flujo de hidrógeno que entra al electrolizador. La Tabla 23 muestra el flujo de hidrógeno que se conseguía para cada valor de voltaje en la entrada del electrolizador.

VOLTAJE (V)	FLUJO (cc/s)
3,25	0,171
3,50	0,332
3,75	0,446
4,00	0,460
4,25	0,854
4,50	0,994

**Tabla 23: Flujo de hidrógeno según el voltaje en la entrada del electrolizador.**



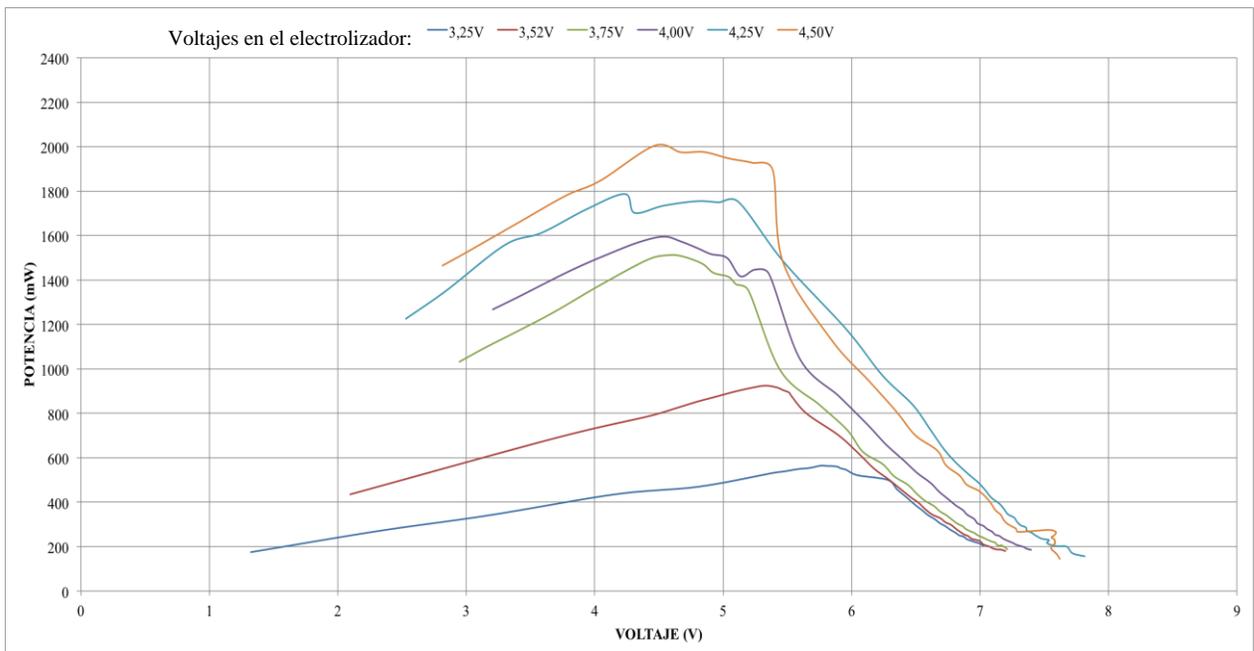
**Gráfica 7: Respuesta de voltaje vs corriente celdas tipo PEM.**



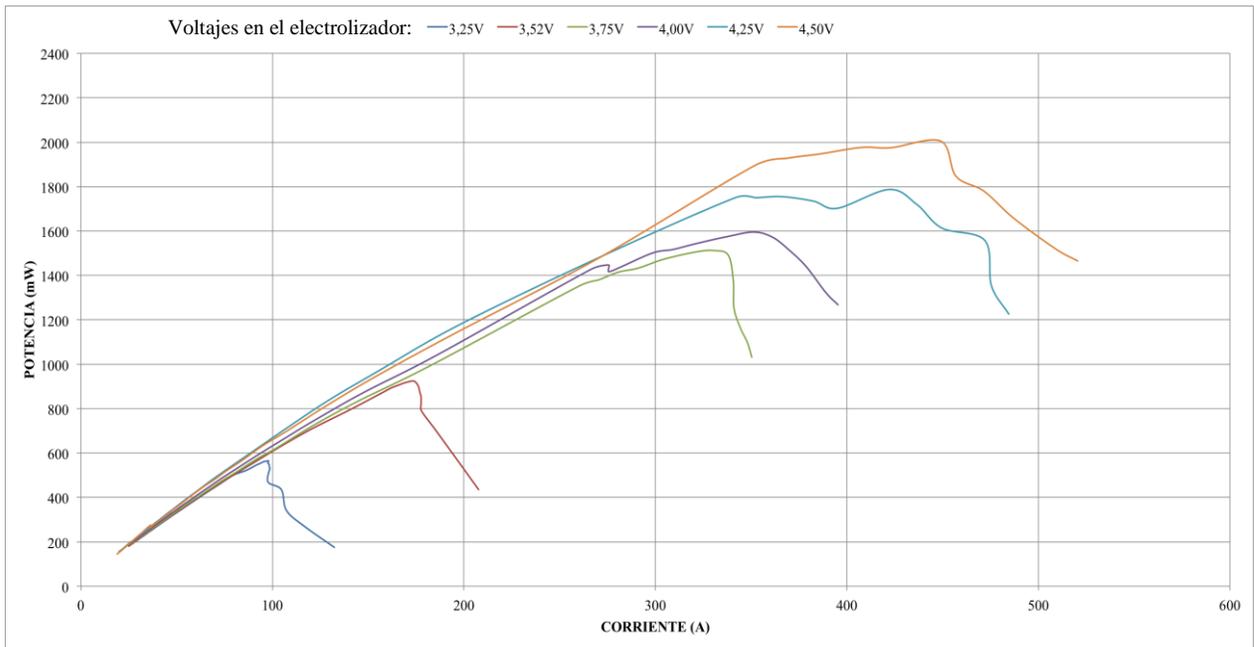
**Gráfica 8: Respuesta de potencia vs resistencia en la carga celdas tipo PEM.**

La Gráfica 7 muestra las curvas de corriente (mA) contra voltaje (V) a la salida de la celda de hidrogeno, se puede ver que los niveles de energía aumentan al aumentar el voltaje de entrada en el electrolizador. También se puede observar como la corriente disminuye a medida que el voltaje aumenta, en cada curva se ve un periodo en el que la corriente disminuye de manera tenue hasta llegar a un punto de voltaje donde cae con una pendiente mucho mayor. También se puede observar que el rango de voltaje donde se presenta el punto de máxima potencia se encuentra entre los 4V a 6V para todos los flujos de hidrógeno.

La Gráfica 8 corresponde a las curvas potencia (mW) contra resistencia ( $\Omega$ ) a la salida de la celda de hidrogeno. Se puede observar que para cada flujo de hidrógeno la potencia aumenta al aumentar el valor de resistencia hasta alcanzar un punto de máxima potencia (PMP), luego de este punto la potencia disminuye en forma exponencial. Se puede ver que los puntos de potencia máxima se encuentran entre los  $10\Omega$  a  $60\Omega$ , dentro de ese rango la potencia alcanza un máximo de 2W y un mínimo 500mW.



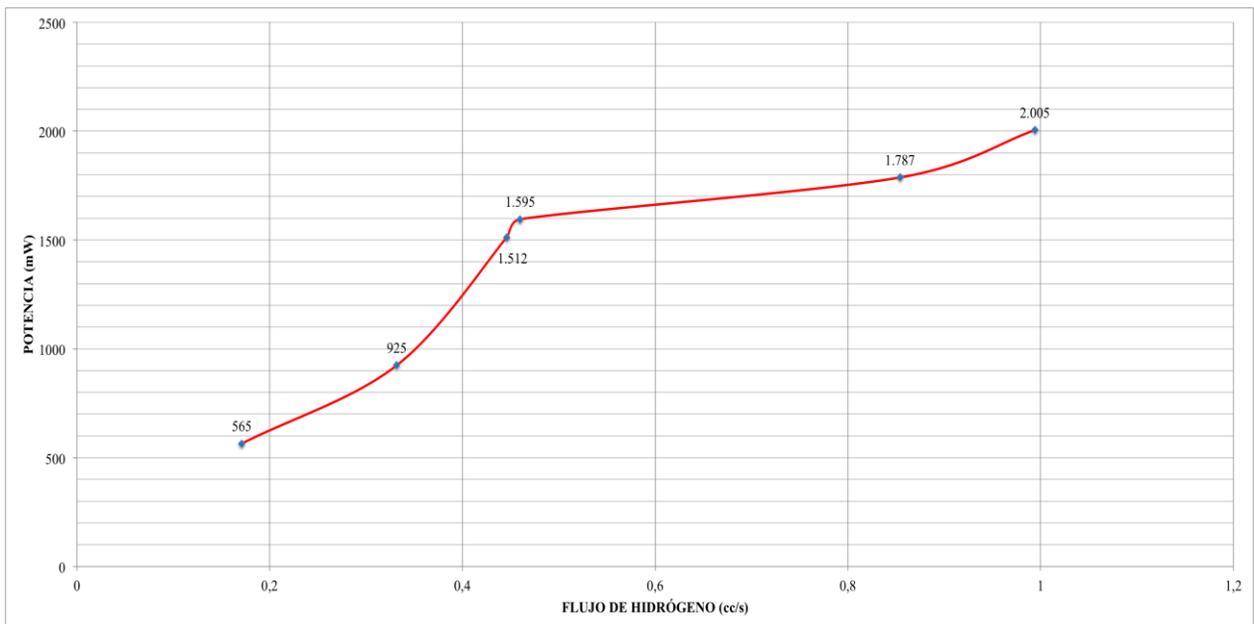
**Gráfica 9: Respuesta de potencia vs voltaje de salida en celdas tipo PEM.**



**Gráfica 10: Respuesta de potencia vs corriente de salida celdas tipo PEM.**

La Gráfica 9 muestra la respuesta de la potencia (mW) con respecto al voltaje (V) de las celdas tipo PEM. Se observa que la potencia comienza a aumentar al aumentar el voltaje hasta alcanzar su PMP, luego la potencia disminuye aunque el voltaje siga aumentando. Las potencias máximas para todos los flujos se encuentran en un rango de 4V a 6V, lo cual confirma lo visto en la Gráfica 7.

La Gráfica 10 muestra el comportamiento de la potencia con respecto a la corriente, y se puede ver como al alcanzar el punto de máxima potencia la corriente sigue aumentando aunque la potencia empieza a disminuir, lo que significa que en esos puntos existe un valor de pérdidas de energía notable.



### Gráfica 11: Potencia máxima entregada contra flujo de hidrógeno.

Por último se presenta la Gráfica 11, donde se ve la máxima potencia entregada por la celda de combustible en cada uno de los flujos donde se realizaron las medidas. Se puede observar que a medida que el flujo aumenta la potencia también lo hace, hasta llegar a un máximo de 2,005W con un flujo de 0,994cc/s, que corresponde a 4,5V de entrada en el electrolizador y con un valor mínimo de 565mW en un flujo de 0,171cc/s correspondiente a 3,25V en el electrolizador.

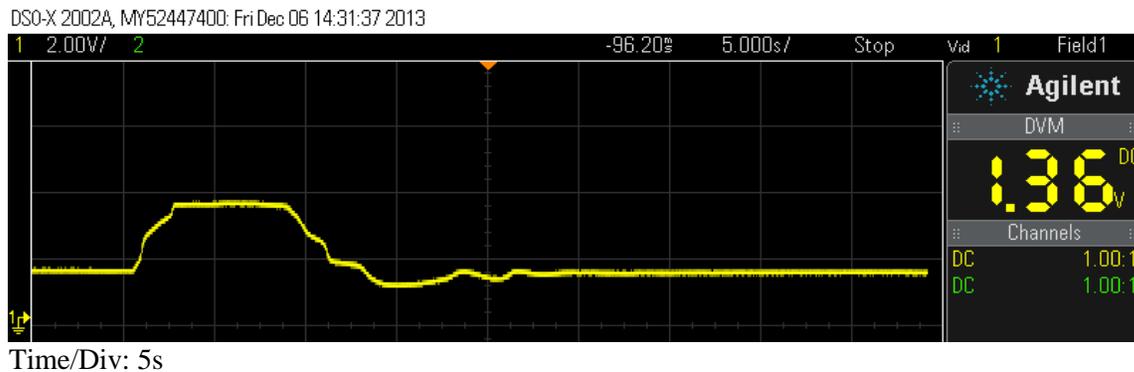
Por lo descrito anteriormente, se puede concluir que para todos los flujos de hidrógeno la máxima potencia entregada por la celda se presenta en valores bajos de resistencia, entre  $10\Omega$  a  $60\Omega$ , y en dentro de un rango de 4V a 6V entregados por la celda. Además el rango de potencia máximas que se pueden alcanzar en cada flujo varían desde 565mW hasta 2W.

## 5.2. Caracterización dinámica de la celda

### 5.2.1. Pasos de voltaje

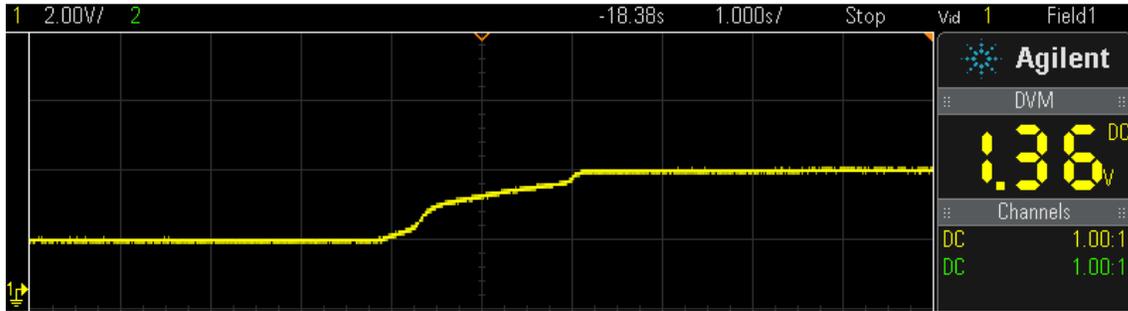
Los pasos en el voltaje se realizaron cambiando de manera inmediata el voltaje en el electrolizador, las mediciones se tomaron sobre la carga con diferentes valores de resistencia a la salida, los resultados se muestran a continuación.

- $10\Omega$  en la carga



Gráfica 12: Dos pasos en una carga de  $10\Omega$ .

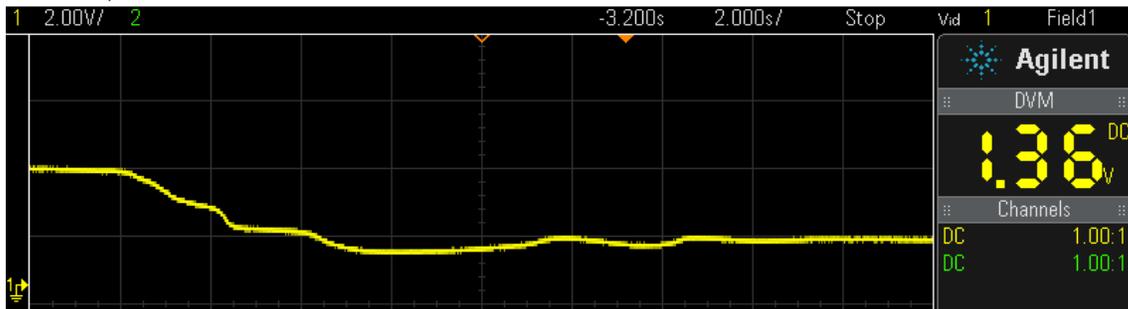
DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 14:32:13 2013



Time/Div: 1s

**Gráfica 13: Borde de subida en una carga de 10Ω.**

DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 14:32:37 2013



Time/Div: 2s

**Gráfica 14: Borde de bajada en una carga de 10Ω.**

En estas gráficas se muestra el comportamiento de la celda sobre una carga de 10Ω ante cambios abruptos en el voltaje de entrada. Se puede ver que en el cambio de 3,25V a 4,75V el sistema se demora 2s en estabilizarse, mientras que en el cambio de 4,75V a 3,25V el sistema tarda 14s en encontrar el equilibrio. Para este caso es evidente que los cambios de energía positivos son más rápidos que los cambios negativos.

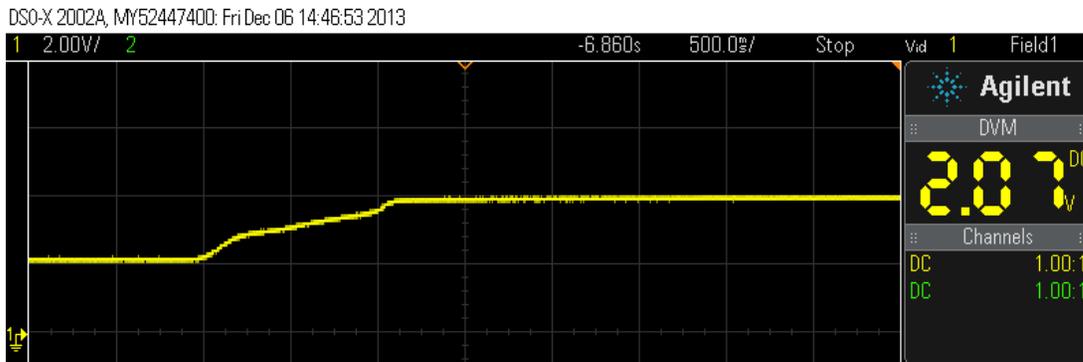
- 15Ω en la carga.

DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 14:46:11 2013



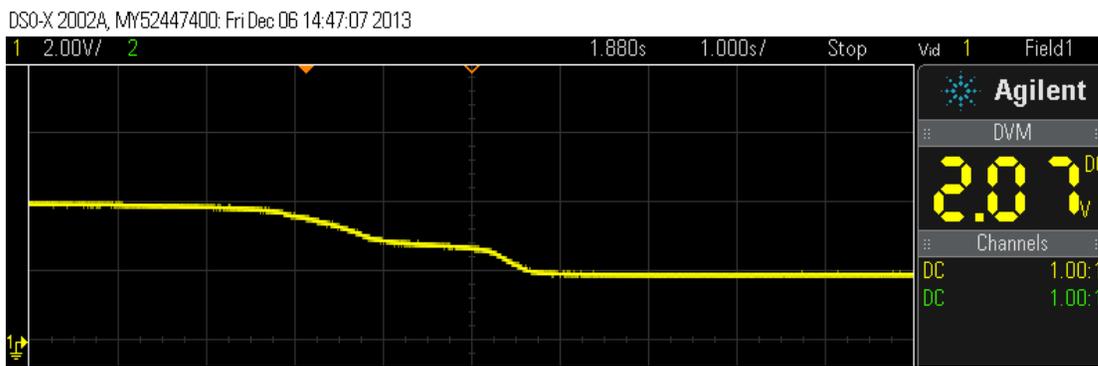
Time/Div: 2s

**Gráfica 15: Dos pasos en una carga de 15Ω.**



Time/Div: 500ms

**Gráfica 16: Borde de subida en una carga de 15Ω.**

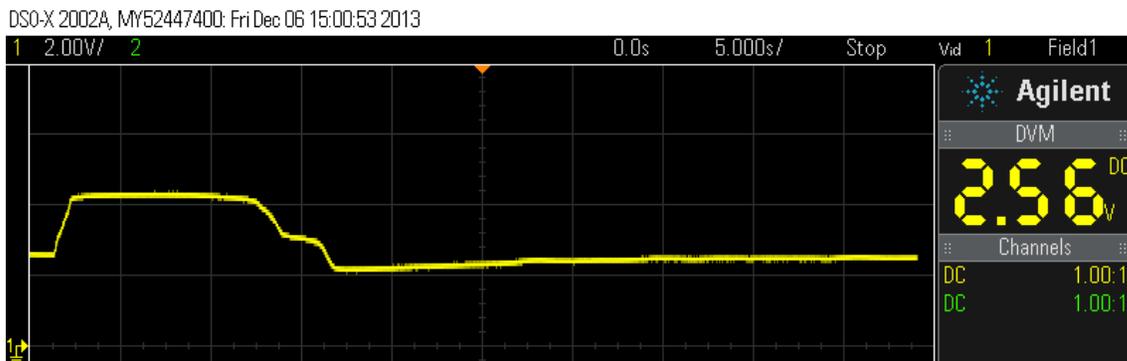


Time/Div: 1s

**Gráfica 17: Borde de bajada en una carga de 15Ω.**

En la Gráfica 15 a la Gráfica 17 se puede ver cómo se comporta la celda con una carga de 15Ω ante los cambios de voltaje. La Gráfica 15 y la Gráfica 16 muestran un borde de subida de 1s al cambiar de 3,25V a 4,75V y la Gráfica 17 muestra un borde de bajada (cambio en el voltaje de 4,75V a 3,25V) de 3,5s. Nuevamente se observa que el sistema responde más rápido al elevar el potencial que al bajarlo.

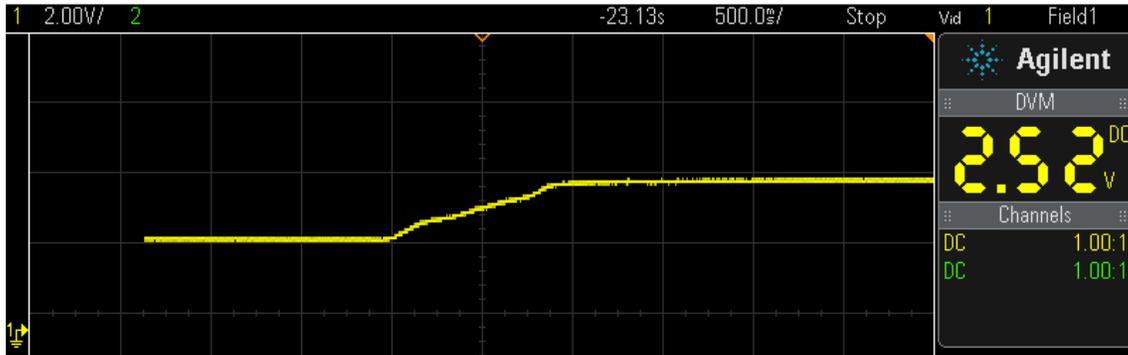
- 20Ω en la carga.



Time/Div: 5s

**Gráfica 18: Dos pasos en una carga de 20Ω.**

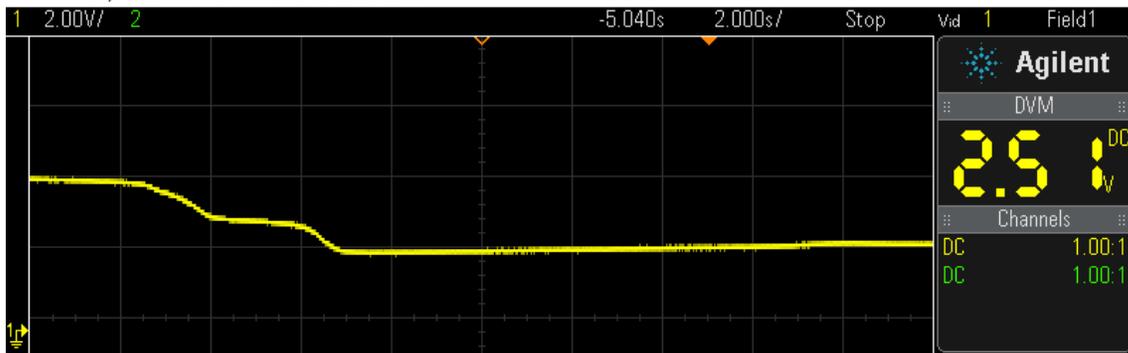
DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 15:01:57 2013



Time/Div: 500ms

**Gráfica 19: Borde de subida en una carga de 20Ω.**

DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 15:02:30 2013



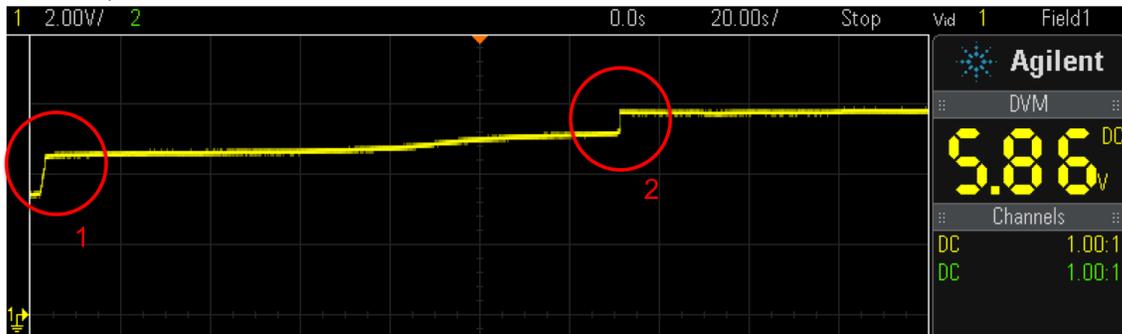
Time/Div: 2s

**Gráfica 20: Borde de bajada en una carga de 20Ω.**

En la Gráfica 18 a la Gráfica 20 describen el comportamiento la celda sobre una carga de 20Ω ante los cambios de voltaje. En este caso y como se ve en la Gráfica 19, el borde de subida es de 875ms, más rápido que los dos casos anteriores. Por otro lado la Gráfica 18 y la Gráfica 20 muestran que el tiempo de establecimiento tiene dos etapas, la primera donde el voltaje cae hasta el punto mínimo en 4,5s, y la segunda donde el voltaje comienza a aumentar hasta que se estabiliza en un tiempo de 10s.

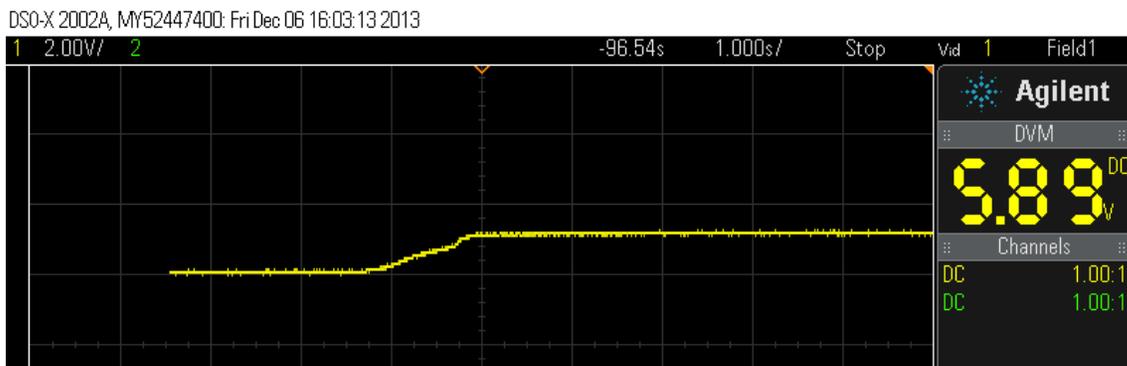
- 30Ω en la carga.

DSO-X 2002A, MY52447400: Fri Dec 06 16:02:08 2013



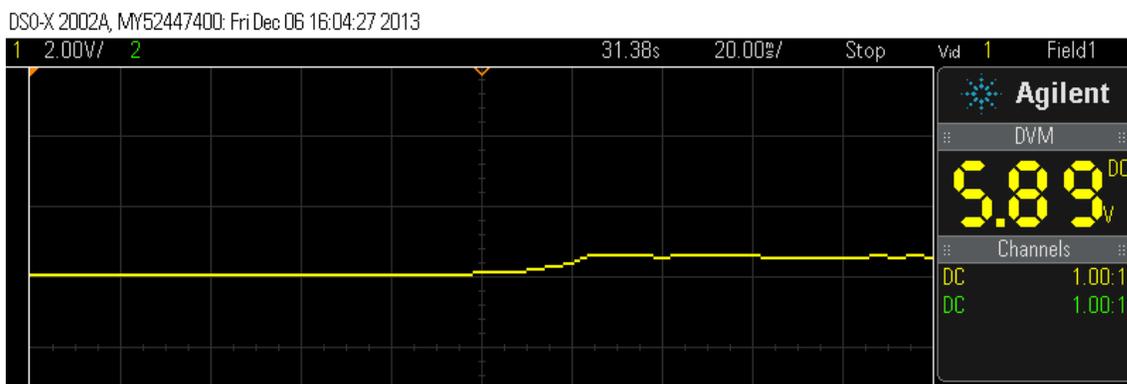
Time/Div: 20s

**Gráfica 21: Borde de subida en una carga de 30Ω.**



Time/Div: 1s

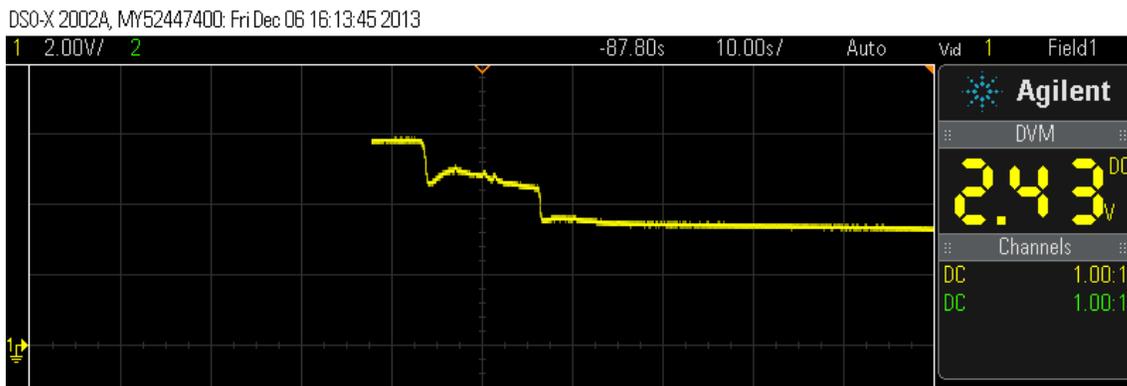
**Gráfica 22: Borde de subida sección 1 en una carga de 30Ω.**



Time/Div: 20ms

**Gráfica 23: Borde de subida sección 2 en una carga de 30Ω.**

En la Gráfica 21 a la Gráfica 23 muestran el borde de subida de la respuesta la celda de combustible sobre una carga de 30Ω ante un cambio abrupto de 3,25V a 4,75V. En la Gráfica 21 se puede ver que existen dos saltos durante el tiempo que dura en estabilizarse el sistema. El primer salto se ve con mayor resolución en la Gráfica 22 y se puede apreciar que tiene una duración de 1s. El segundo salto se ve con mayor resolución en la Gráfica 23 y se ve que dura 25ms. El tiempo total en el que el sistema encuentra el equilibrio es entonces la suma de los dos saltos y el tiempo que hay entre un salto y otro, es decir 126,02s.



Time/Div: 10s

**Gráfica 24: Borde de bajada en una carga de 30Ω.**

La Gráfica 24 muestra el borde de bajada de la respuesta la celda de combustible sobre una carga de 30Ω ante un cambio abrupto de 4,75V a 3,25V. Se observa que el sistema no presenta una caída de voltaje

lineal ya que se registran picos durante la caída, sin embargo se puede ver que después de 15s se llega al equilibrio.



Time/Div: 50s

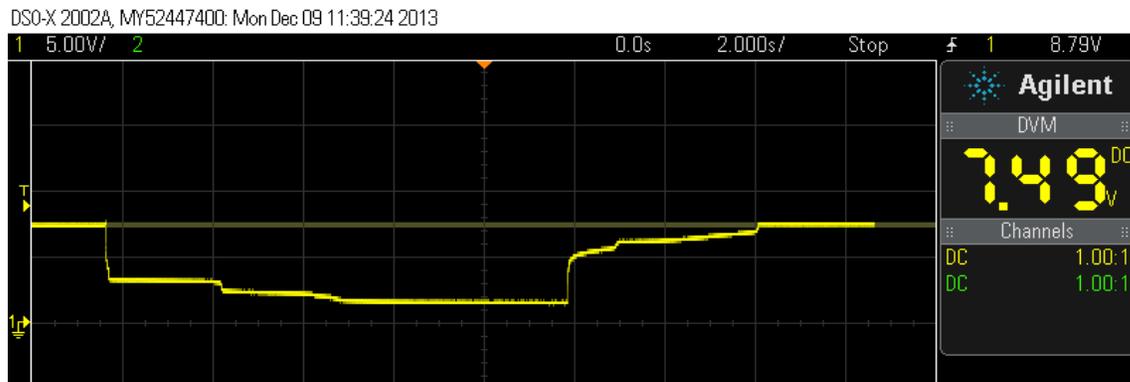
**Gráfica 25: Dos pasos en una carga de  $30\Omega$ .**

En la Gráfica 25 se puede ver cómo se comporta el sistema sobre una carga de  $30\Omega$  ante dos cambios abrupto de voltaje durante un tiempo de 225s. El primer cambio de voltaje se realizó en el momento t1 y el segundo cambio de voltaje en el momento t2. Se observa que el sistema no presenta un equilibrio constante, ya que tiene picos de caída luego de un tiempo de estabilización, es sistema tiende a buscar un punto de equilibrio pero no logra mantenerlo, por lo que cae repentinamente y vuelve a buscar el punto de equilibrio.

### 5.2.2.Pasos de carga

Los pasos en la carga se realizaron cambiando de manera inmediata el valor de la resistencia de salida de con diferentes voltajes de entrada en el electrolizador. Las mediciones se tomaron sobre la carga con diferentes valores de voltaje en la entrada.

- 3,25V en la entrada.



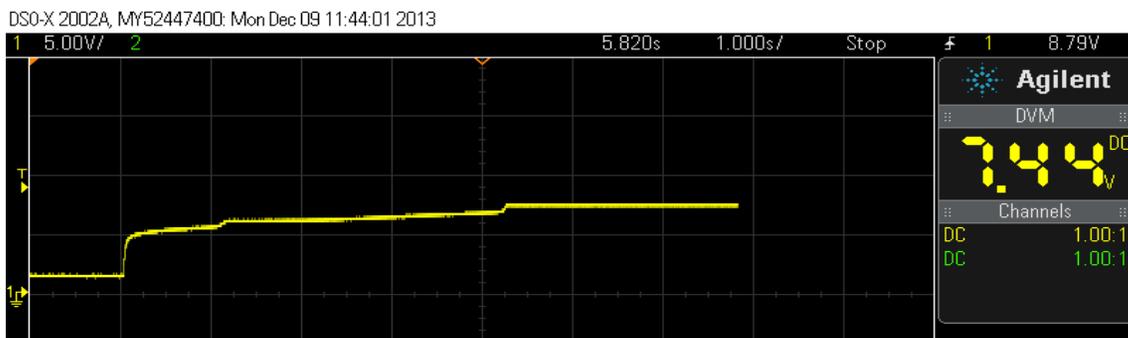
Time/Div: 2s

**Gráfica 26: Dos pasos con un voltaje de 3,25V.**



Time/Div: 1s

**Gráfica 27: Borde de bajada con un voltaje de 3,25V.**

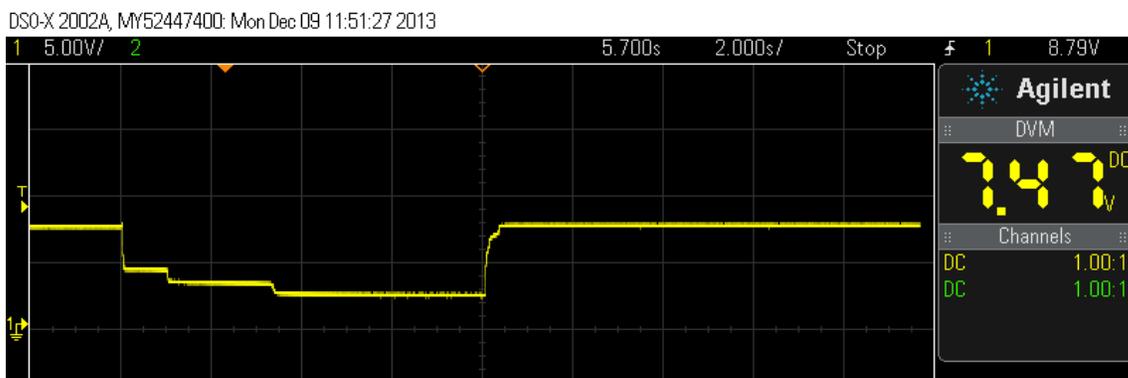


Time/Div: 1s

**Gráfica 28: Borde de subida con un voltaje de 3,25V.**

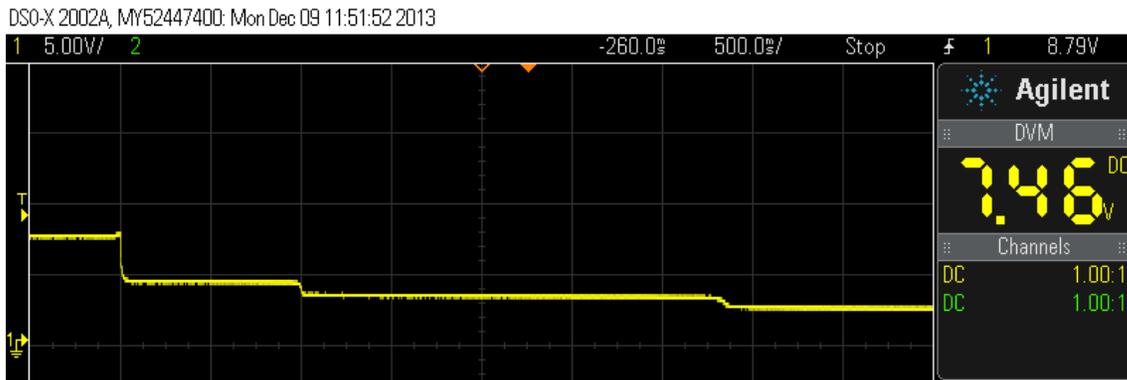
En la Gráfica 26 a la Gráfica 28 se muestra el comportamiento de la celda con un voltaje de entrada de 3,25V ante cambios abruptos en la carga de  $10\Omega$  a  $310\Omega$ . En las gráficas Gráfica 26 y Gráfica 27 se ve que el borde de bajada tiene un cambio en el voltaje medido prácticamente inmediato, sin embargo el sistema se demora 5s en llegar al punto de estabilidad. La Gráfica 28 muestra el borde de subida, en este caso sucede lo mismo que en el borde de bajada, se presenta un cambio inmediato en el voltaje seguido por un tiempo de establecimiento de 4,25s para llegar al equilibrio.

- 3.5V en la entrada.



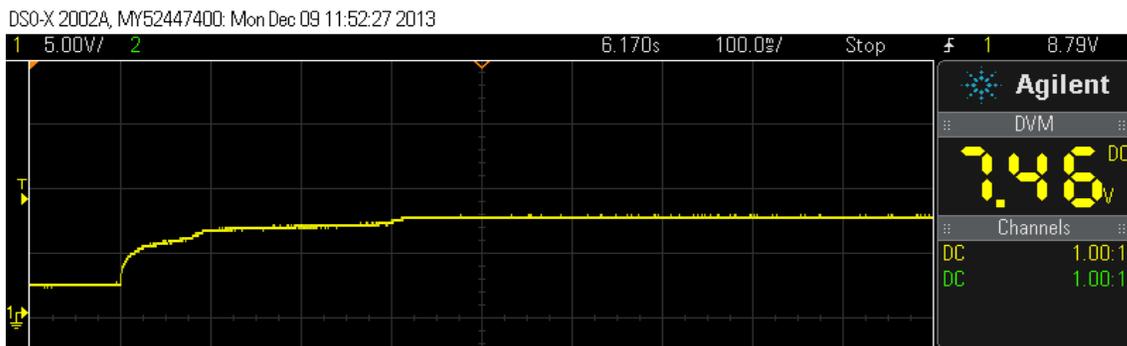
Time/Div: 2s

**Gráfica 29: Dos pasos con un voltaje de 3,5V.**



Time/Div: 500ms

**Gráfica 30: Borde de bajada con un voltaje de 3,5V.**

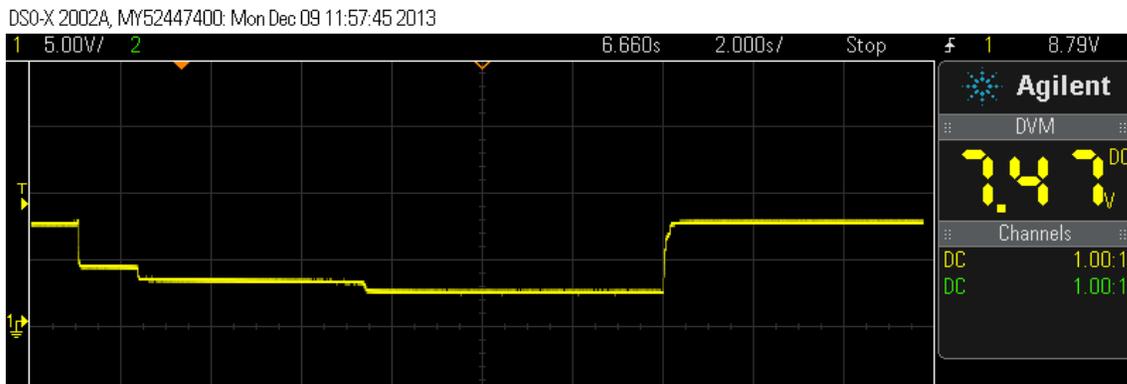


Time/Div: 100ms

**Gráfica 31: Borde de subida con un voltaje de 3,5V.**

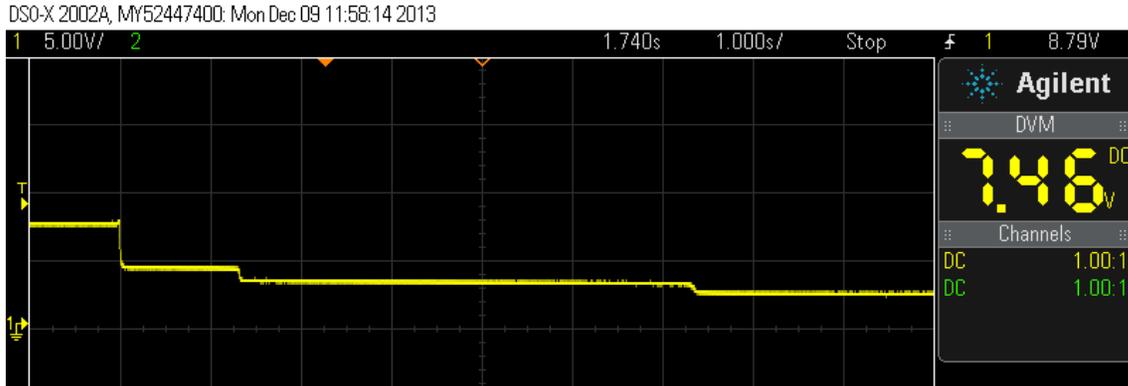
En la Gráfica 29 a la Gráfica 31 se muestra el comportamiento de la celda con un voltaje de entrada de 3,5V ante cambios abruptos en la carga de  $10\Omega$  a  $310\Omega$ . En las gráficas Gráfica 26 y Gráfica 27 se ve que el borde de bajada tiene un cambio en el voltaje medido inmediato, seguido por dos saltos hasta llegar a un punto de voltaje donde se establece, el tiempo que dura en llegar al equilibrio es de 3,375s. La Gráfica 31 muestra el borde de subida, que tiene un tiempo de 300ms, mucho más rápido que el primer cambio de carga.

- 3.75V en la entrada.



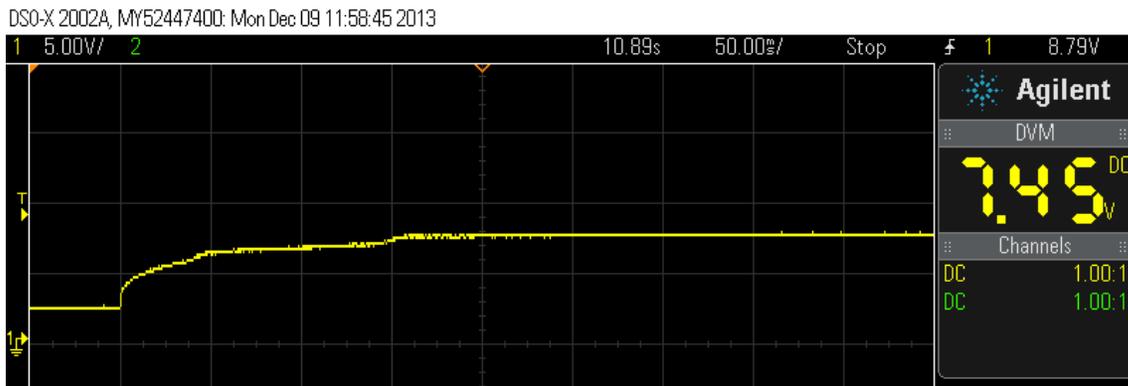
Time/Div: 2s

**Gráfica 32: Dos pasos con un voltaje de 3,75V.**



Time/Div: 1s

**Gráfica 33: Borde de bajada con un voltaje de 3,75V.**

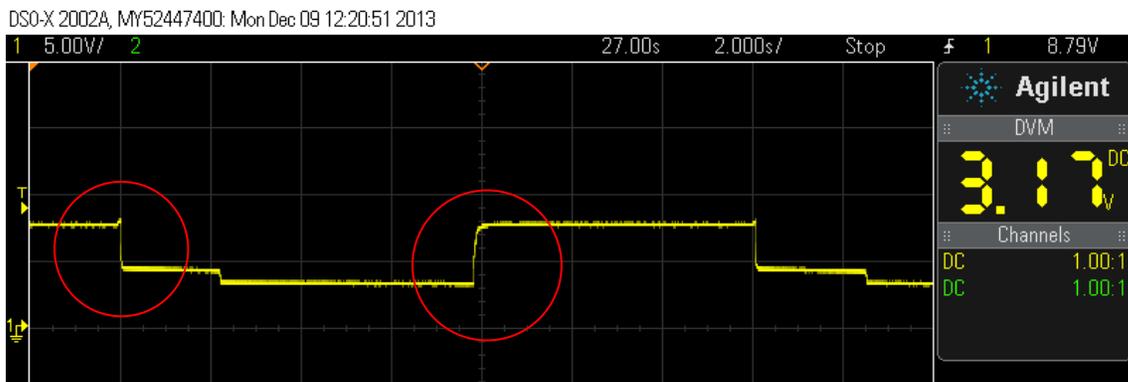


Time/Div: 50ms

**Gráfica 34: Borde de subida con un voltaje de 3,75V.**

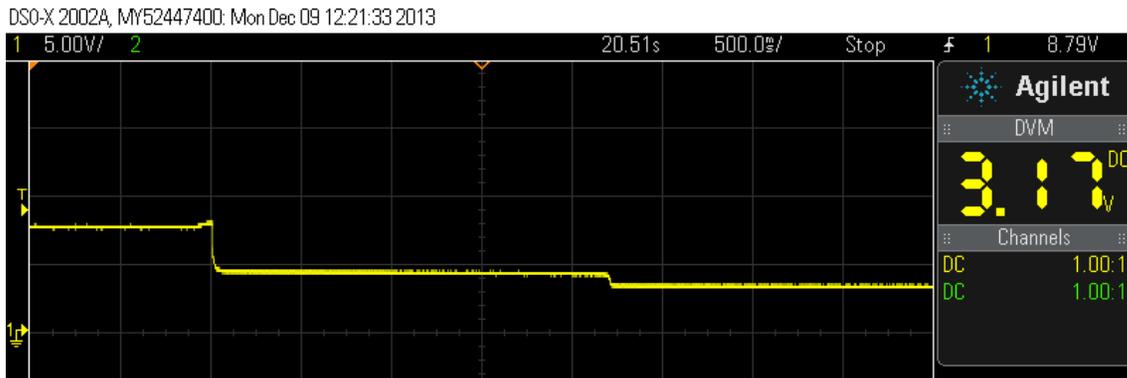
En la Gráfica 32 a la Gráfica 34 se muestra el comportamiento de la celda con un voltaje de entrada de 3,75V ante los cambios en la carga. En las gráficas Gráfica 32 y Gráfica 33 se ve que el borde de bajada se comporta igual que el caso anterior (con 3,5V en la entrada), en primer lugar tiene un cambio inmediato y luego existen dos saltos hasta llegar al equilibrio, este tiempo total es de 6,25s. La Gráfica 34 muestra el borde de subida de 200ms.

- 4.0V en la entrada.



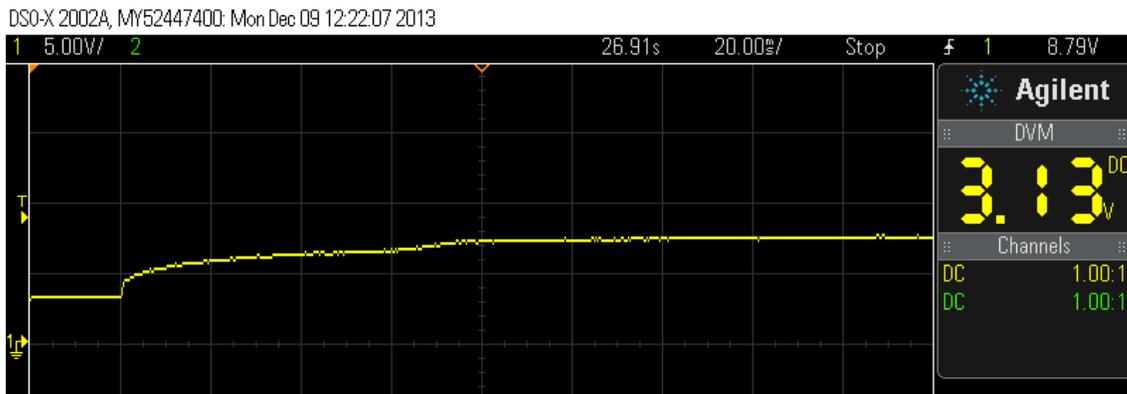
Time/Div: 2s

**Gráfica 35: Dos pasos con un voltaje de 4,0V.**



Time/Div: 500ms

**Gráfica 36: Borde de bajada con un voltaje de 4,0V.**



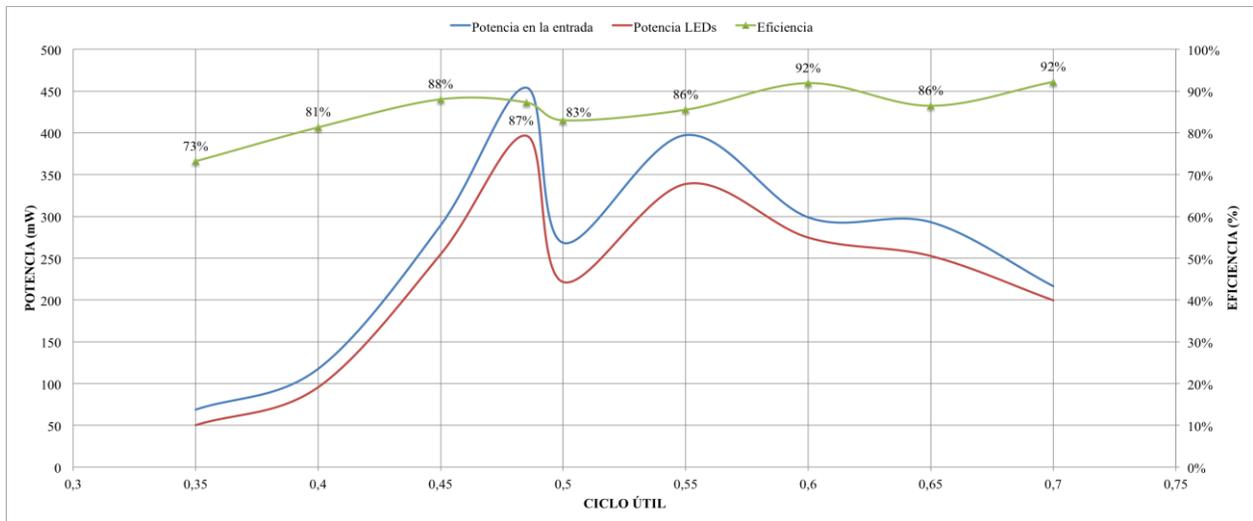
Time/Div: 20ms

**Gráfica 37: Borde de subida con un voltaje de 4,0V.**

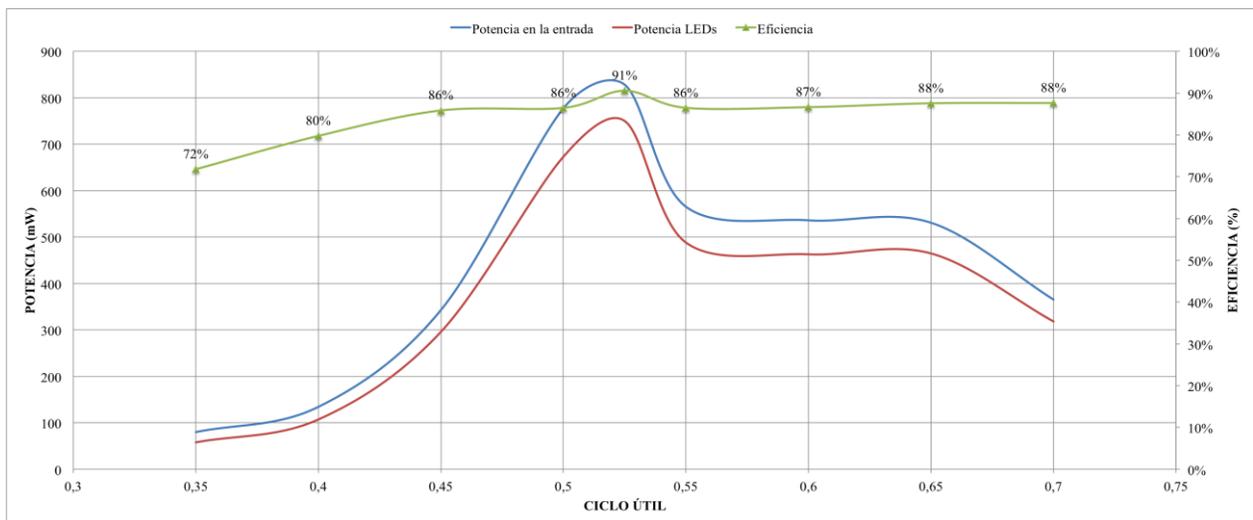
En la Gráfica 35 a la Gráfica 37 se muestran el comportamiento de la celda con un voltaje de entrada de 4V ante los cambios en la carga. Se puede observar que este caso presenta el mismo comportamiento de los dos casos anteriores, el borde de bajada tiene un cambio inmediato seguido por dos saltos hasta llegar al equilibrio, este tiempo total es de 2,125s. La Gráfica 37 muestra el borde de subida de 80ms.

### 5.3. Implementación del convertidor Ćuk con las celdas de hidrógeno tipo PEM.

Para realizar el análisis del funcionamiento del sistema completo, se graficaron los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio mostrados en las tablas 16 a 21. Cada gráfica muestra la respuesta del convertidor en para los diferentes flujos de hidrógeno que ingresaban a la celda de combustible. Las gráficas comportamiento de la potencia de entrada y la potencia de salida del convertidor, al igual que la eficiencia, con variaciones en el ciclo útil.



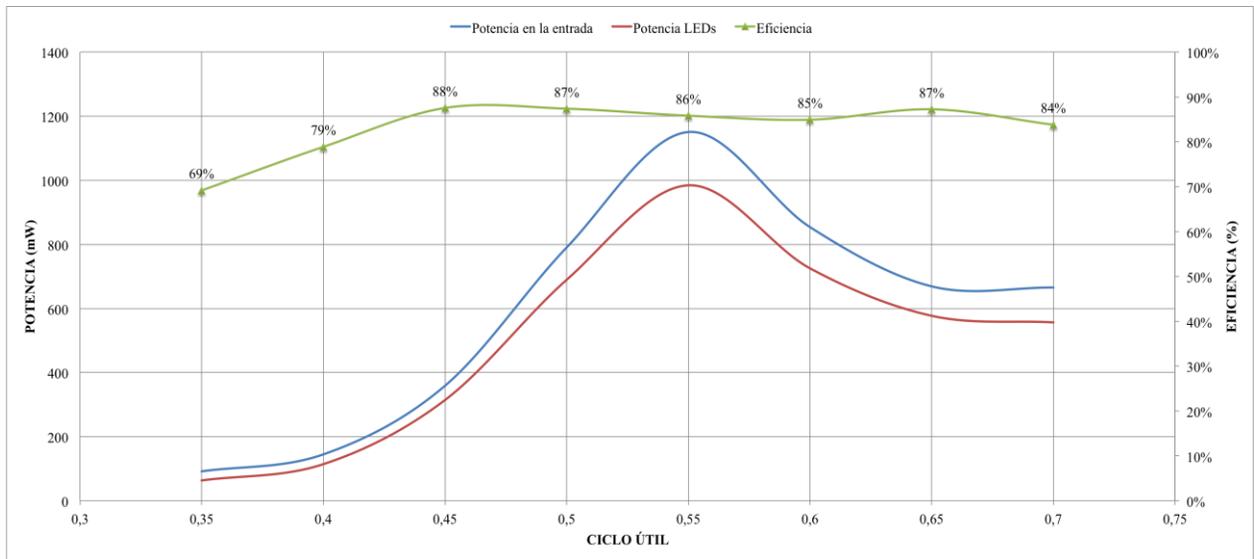
**Gráfica 38: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,25V en el electrolizador.**



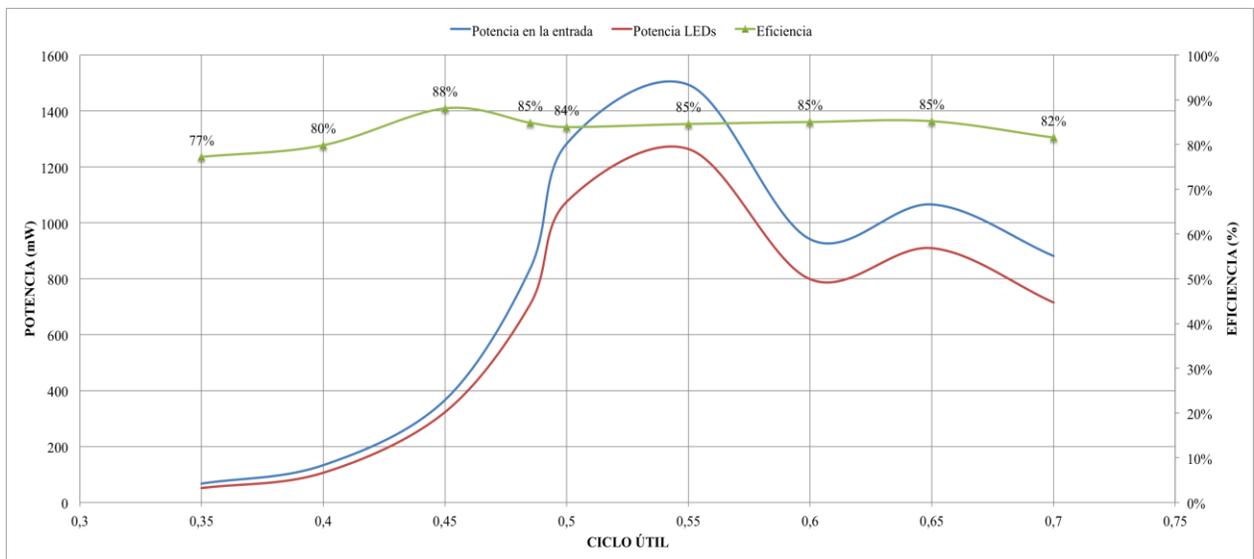
**Gráfica 39: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,5V en el electrolizador.**

La Gráfica 38 corresponde a un flujo de 0,171cc/s, es decir 3,25V en la entrada del electrolizador. Se puede ver que la potencia máxima de entrada es de 450mW y la potencia máxima en la salida es de 400mW, con una eficiencia del 87% en un ciclo útil de 48,5%.

La Gráfica 39 muestra la curva con 3,5V en la entrada del electrolizador, con un flujo de 0,332cc/s. La potencia máxima de entrada es de 750mW y la potencia máxima en la salida es de 850mW, con una eficiencia del 91% en un ciclo útil de 52,5%.



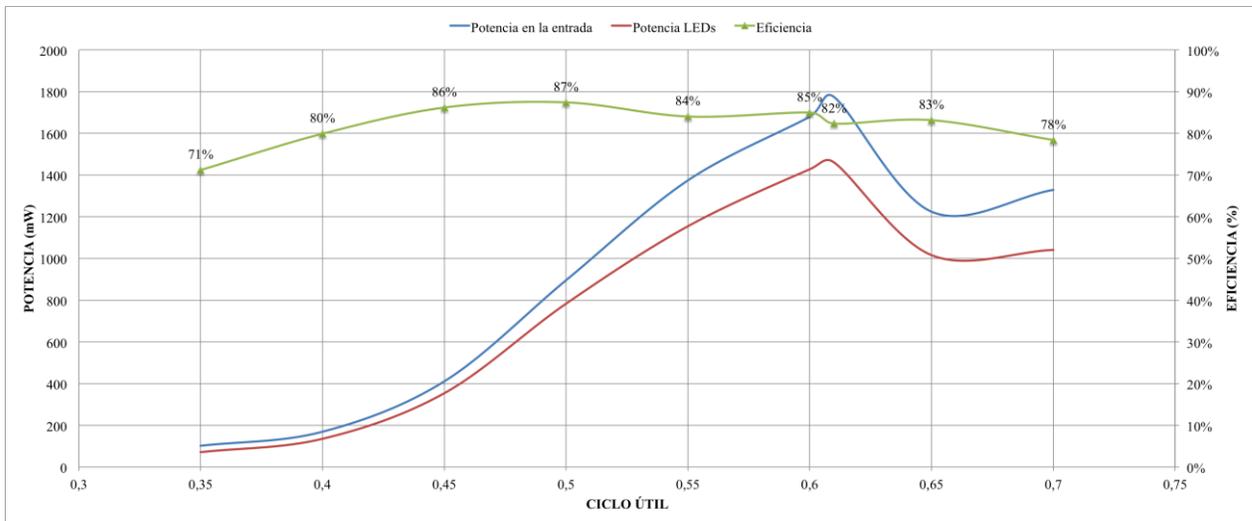
**Gráfica 40: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 3,75V en el electrolizador**



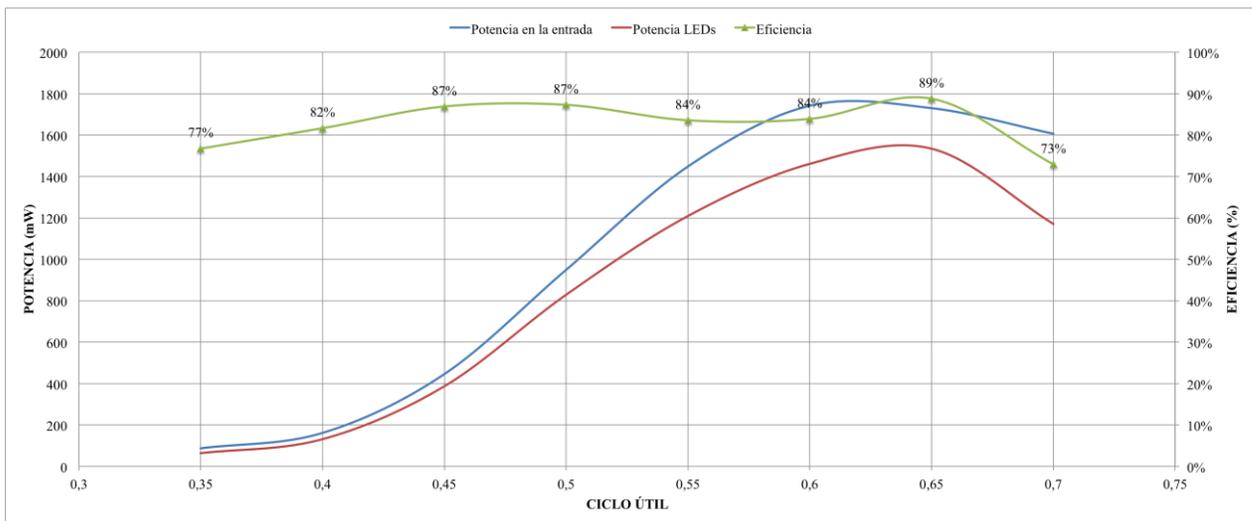
**Gráfica 41: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4V en el electrolizador.**

La Gráfica 40 corresponde a un flujo de 0,446cc/s con 3,75V en la entrada del electrolizador. Se puede ver que la potencia máxima de entrada es de 1W y la potencia máxima en la salida es de 1,15W, con una eficiencia del 85% en un ciclo útil de 55%.

La Gráfica 41 muestra la curva con 4V en la entrada del electrolizador, con un flujo de 0,46cc/s. La potencia máxima de entrada es de 1,2mW y la potencia máxima en la salida es de 1,5mW, con una eficiencia del 85% en un ciclo útil de 55%.



**Gráfica 42: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4,25V en el electrolizador.**



**Gráfica 43: Señales de potencia a la entrada y a la salida del convertidor con 4,5V en el electrolizador.**

La Gráfica 42 corresponde a un flujo de 0,854cc/s con 4,25V en la entrada del electrolizador. Se puede ver que la potencia máxima de entrada es de 1,43W y la potencia máxima en la salida es de 1,8W, con una eficiencia del 82% en un ciclo útil de 61%.

La Gráfica 43 muestra la curva con 4,5V en la entrada del electrolizador, con un flujo de 0,994cc/s. La potencia máxima de entrada es de 1,5mW y la potencia máxima en la salida es de 1,73mW, con una eficiencia del 89% en un ciclo útil de 65%.

Se observa en las 6 gráficas se evidencia que el comportamiento de la potencia de salida coincide con el de la potencia de entrada, lo cual muestra que el convertidor funciona de manera adecuada. También se puede ver que la eficiencia cambia en cada ciclo útil, en general la eficiencia tiende a aumentar a mayor valor de ciclo útil y se encuentra entre un 80% y 90% lo cual permite afirmar que el convertidor tiene el comportamiento deseado y su respuesta esta dentro de lo diseñado. Además, las gráficas también permiten ver que en cada curva el punto de máxima potencia se encuentra en un valor de ciclo útil diferente, lo que hace que se requiera de un control que permita variar el ciclo útil dependiendo del flujo de entrada, y aunque existen máximos locales de potencia en diferentes valores de ciclo útil los máximos absolutos se encuentran alrededor del 50 y 60%.

## 6. CONCLUSIONES

Luego de realizar este trabajo de grado, con los resultados obtenidos y el análisis de cada etapa realizada se puede concluir lo siguiente:

1. Al realizar la caracterización estática de la celda de hidrógeno y graficar la familia de curvas que describen su comportamiento, se encontró que para flujos de hidrogeno bajos a la entrada de la celda, esta responde como una fuente de corriente y a medida que aumenta el flujo se comporta como una fuente de voltaje.
2. La caracterización estática de la celda de combustible muestra que la celda tipo PEM estudiada entrega la máxima potencia de salida en un rango de 4V a 6V para todos los flujos medidos, y con cargas en la salida de bajo valor, entre  $10\Omega$  a  $60\Omega$  con corrientes que van desde los 100mA a los 450mA.
3. La máxima potencia que entrega la celda de combustible es diferente en cada flujo de hidrogeno, el punto óptimo de operación se encuentra en el mayor valor de potencia al que se puede llegar, 2,005W con un flujo de 0,994cc/s.
4. La caracterización dinámica de las celdas de combustible muestra que a cambio inmediatos de voltaje en la entrada del electrolizador, las celdas tipo PEM tienen una respuesta lenta, pues el tiempo de estabilización se encuentra en el orden de segundos, donde el menor registrado es de 1s y el mayor de 126s, este tiempo aumenta al aumentar la carga en la salida.
5. Las curvas dinámicas de las celdas de combustible realizadas con cambios inmediatos en la carga con diferentes voltajes de entrada en el electrolizador muestran una respuesta rápida en los tiempos de subida y de bajada, pues se encuentran en un intervalo de 80ms a 6s, siendo más rápido el tiempo de estabilización en la bajada.
6. Por medio de la implementación de un control manual es posible modificar el ciclo útil en el que trabaja el convertidor y de esta manera encontrar fácilmente el punto de máxima potencia para cualquier entrada de flujo de hidrógeno en la celda tipo PEM.
7. El convertidor  $\dot{C}uk$  permite tener un voltaje regulado sobre los LEDs a pesar de las variaciones de voltaje en la entrada del convertidor, lo que genera que los LEDs trabajen siempre sobre el punto de operación deseado ya que son controlados en corriente.
8. Para una implementación más precisa del convertidor con las celdas de combustible, se podría realizar como trabajo futuro un circuito de control sobre la señal del mosfet por medio de un MPPT, que se encargue de variar el ciclo útil hasta encontrar la máxima potencia en la salida, y así sin importar las variaciones en el voltaje de entrada mantener siempre la máxima potencia posible sobre los LEDs.
9. Al implementar el convertidor  $\dot{C}uk$  con la celda tipo PEM se presentan puntos de máxima potencia locales para diferentes flujos de hidrógeno en la entrada de la celda. Esto presentaría un desafío en el momento de implementa un algoritmo de control de MPPT en un trabajo futuro

## 7. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

1. GONZÁLEZ, A. *Producción, Almacenamiento y distribución del hidrógeno*. Madrid: Asociación Española del Hidrógeno e Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial; recuperado de: [http://www.udg.edu/Portals/88/proc\\_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf](http://www.udg.edu/Portals/88/proc_industrials/5%20-%20Otros%20Combustibles-Hidrogeno.pdf)
2. BALLÓN, D., CUENTAS, J. y DELGADO, A. (2012). *Hidrógeno: la verdadera energía del motor*; recuperado de: <http://prezi.com/inrk4gzs2g3p/motor-hidrogeno-analisis-bmw-serie-7/>
3. American Honda Motor Co, Inc. *FCX clarity, vehículo electrónico con celda de combustible*; recuperado de: <http://automobiles.honda.com/spanish/fcx-clarity/>
4. LEIVA, R., HERRERA, C. y BOLOCCO, R. (2008) *Hidrógeno y su potencial uso en la matriz energética Chilena*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María; recuperado de: [http://www.archivochile.com/Chile\\_actual/patag\\_sin\\_repre/03/chact\\_hidroy-3%2000028.pdf](http://www.archivochile.com/Chile_actual/patag_sin_repre/03/chact_hidroy-3%2000028.pdf)
5. H-TEC; *Operating Instructions: Junior Stack Experimentation Set*, (Item 2095). Alemania; Recuperado de: [http://www.h-tec.com/fileadmin/content/edu/Downloads/BDA\\_U102\\_en.pdf](http://www.h-tec.com/fileadmin/content/edu/Downloads/BDA_U102_en.pdf)
6. LINARES, J.I. y MORATILLA, B.Y. (2007). *El Hidrógeno y la Energía: Volumen 2 de Avances de Ingeniería: Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*. Madrid: Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI y Universidad Pontificia Comillas.
7. The Oslo Hydrogen refueling station. (2001); recuperado de: <http://chic-project.eu/cities/phase-1-cities/oslo/oslo-refuelling/oslo-hydrogen-refueling-station>
8. Westbrook (2001) The electric car: development and future of Battery, hybrid and fuel cell cars; página web: <http://img1.xooimage.com/files/3/8/2/prototipo-coche-electrico-889996.swf>
9. CASTELLANOS, N. y MOLINA M. (2013). *Modelado y simulación de una celda de combustible reversible de membrana polimérica para la producción de hidrógeno*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena; recuperado de: <http://190.25.234.130:8080/jspui/bitstream/11227/91/1/MODELADO%20Y%20SIMULACIÓN%20DE%20UNA%20CELDA%20DE%20COMBUSTIBLE%20REVERSIBLE%20DE%20MEMBRANA%20POLIMÉRICA%20PARA%20LA%20PRODUCCIÓN%20DE%20HIDRÓGENO.pdf>
10. GARCIA, J.C. (2012). *Producción de hidrógeno mediante electrolizadores*. España. Recuperado de: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/302-produccion-de-hidrogeno-mediante-electrolizadores-estado-del-arte-de-la-tecnologia-electrolizadore>
11. GUZMÁN, M. (2012). *Ensayo de un Electrolizador*. Madrid: Escuela técnica superior de ingeniería; recuperado de: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/5051b75229ccb.pdf>
12. CANO, U. (1999). *Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas; recuperado de: <http://www.iie.org.mx/reno99/apli.pdf>
13. RAMÍREZ, N., IZAGUIRRE, G. y TRUJULLO, N. (2010). *Modelado de una celda Tipo PEM*. Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez; recuperado de: <http://www2.uacj.mx/iit/culcyt/Septiembre-diciembre2010/14%20Art.11.pdf>
14. BERMÚDEZ, J.M. y HERNÁNDEZ, L. *Electrolizador para la generación de hidrógeno*. Santiago de Cuba: Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES); recuperado de: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia54/HTML/Articulo16.html>
15. GARZA, J. E. y ALVARADO, D. (2010). *Elaboración de celdas de combustible tipo PEM*. México: Universidad Autónoma de Coahuila e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores Monterrey; recuperado de: <http://www.veranos.ugto.mx/Memorias/12VeranoCienciaRegionCentro/documentos/79.pdf>

16. NACHEZ, A. *Aplicaciones de la conversión CC-CC Convertidor de Cuk*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario; recuperado de: <http://potencia.eie.fceia.unr.edu.ar/Fuentes%20conmutadas/Convertidor%20de%20Cuk.pdf>
17. ARQUES, M.A. *Electrolisis*. Blog física y química; recuperado de: <http://fisicayquimicavarques.com/electrolisis>
18. ROMERO, P. (2002). *Pilas de combustible. Energía sin humos*. La Rioja: Universidad de La Rioja; recuperado de: <http://www.cienciateca.com/fuelcells.html>
19. AMORTEGUI, J.C. (2011). *Realización de un Cargador de Baterías Solar para Dispositivos Portátiles*. Cataluña: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària; recuperado de: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1647pub.pdf>
20. Wayjun Technology Co. Ltd. (2013). *High Brightness 1W High Power White LED datasheet.V1.2.*; recuperado de: <http://www.wayjun.com/Datasheet/Led/High%20Brightness%201W%20High%20Power%20White%20LED.pdf>
21. Ferroxcube International Holding B.V. (2013). *Soft Ferrites and Accessories, data handbook*; recuperado de: [http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/FXC\\_HB2013.pdf](http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/FXC_HB2013.pdf)
22. GES-ELECTRONICS, a.s. (2014). *Ferrite core EA-77-625*; recuperado de: <http://www.ges.cz/en/feritove-jadro-ea-77-625-GES05503263.html>
23. MAÑANA, N. *Regulación, control y protección de máquinas eléctricas*. Cantabria: Universidad de Cantabria e Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación; recuperado de: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/maquinas-electricas/materiales/convertidores.pdf>
24. MOHAN, N., UNDELAND, T. y ROBBINS, W. (2009). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. McGrawHill.
25. BENAVENT, J.M., ABELLÁN, A. y FIGUERES, E. (1999). *Electrónica de potencia: teoría y aplicaciones*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
26. GALERA, V. (2002). *Simulador convertidores DC-DC*. Cataluña: Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària; recuperado de: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/197pub.pdf>
27. HOLLAR, P., POLI, F. y OTERO, L. *Celda electroquímica celular*. Buenos Aires: Escuela técnica 3 María Sánchez de Thompson; recuperado de: [http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/mercosul\\_proj\\_argentina\\_celda.pdf](http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/mercosul_proj_argentina_celda.pdf)
28. COLONEL WM T MCLYMAN, *Transformer and inductor desing handbook*. MARCEL DEKKER, INK