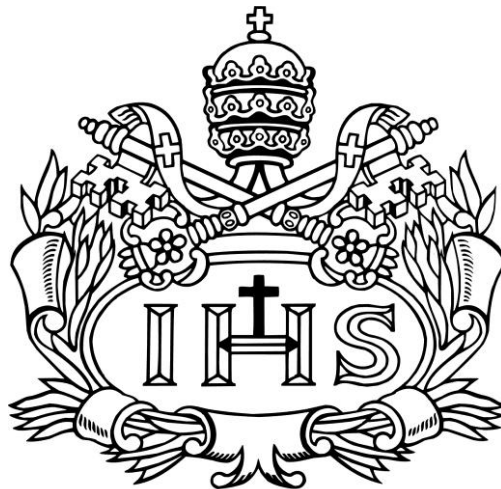


**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA RENOVABLE BASADO EN CELDAS DE  
COMBUSTIBLE PEM DE BAJA POTENCIA**

**JUAN CAMILO GUAVITA PERALTA**

**JUAN DIEGO NIÑO MORANTES**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C MAYO 2014**

**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍA RENOVABLE BASADO EN CELDAS DE  
COMBUSTIBLE PEM DE BAJA POTENCIA**

**JUAN CAMILO GUAVITA PERALTA  
JUAN DIEGO NIÑO MORANTES**

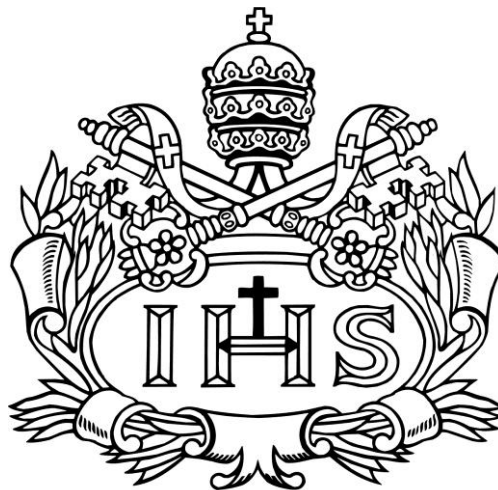
**Trabajo de grado para optar al título de:  
Ingeniero Electrónico**

**Director:**

**Ing. Diego A. Patiño PhD.**

**Co-Director:**

**Luis Camilo Jiménez M.sc.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C MAYO 2014**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen</b>	<b>6</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
<b>3. Especificaciones</b>	<b>21</b>
<b>4. Desarrollos</b>	<b>22</b>
a. Diseño convertidor buck	<b>22</b>
b. Implementación perfil de demanda de energía	<b>31</b>
c. Modelamiento controlador PI	<b>33</b>
d. Implementación controlador Labview	<b>38</b>
e. Implementación Interfaz Gráfica	<b>40</b>
f. Modelo e Implementación Convertidor	<b>42</b>
<b>5. Análisis y resultados</b>	<b>44</b>
a. Modelo estático de las celdas de combustible	<b>44</b>
b. Modelo del electrolizador	<b>46</b>
c. Respuesta del sistema con controlador	<b>49</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>Anexos</b>	<b>60</b>

## TABLA DE IMÁGENES

Fig. 1. Celda de combustible PEM [1] .....	9
Fig. 2. Conductividad del hidróxido de potasio [2] .....	10
<b>Fig. 3</b> Esquema de un electrolizador monopolar [2]. .....	11
<b>Fig. 4.</b> Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino [2]. .....	11
<b>Fig. 5</b> Pérdidas Celda de combustible PEM [2] .....	14
<b>Fig. 6.</b> Diagrama potencia celda de combustible PEM .....	15
<b>Fig. 7.</b> Modelo circuital dinámica celda de combustible PEM [3] .....	15
<b>Fig. 8.</b> cambio de tipo paso en la carga del inversor [4].....	17
<b>Fig. 9</b> voltajes y corrientes de la celda de combustible [4] .....	17
<b>Fig. 10.</b> Curva característica de la celda de combustible .....	18
<b>Fig. 11.</b> Modos de operación del convertidor.....	18
<b>Fig. 12.</b> Diagrama de bloques general.....	20
<b>Fig. 13.</b> Lazo de control convertidor buck [5].....	22
<b>Fig. 14.</b> Corriente en el inductor convertidor buck. ....	23
<b>Fig. 15.</b> Gráfica entre energía y gap de núcleo de ferrita .....	25
<b>Fig. 16.</b> Tabla área efectiva ferrita [7].....	26
<b>Fig. 17.</b> Tabla de conversión AWG a metros .....	27
<b>Fig. 18.</b> Diagrama de bloques LM3524.....	27
<b>Fig. 19.</b> Diagrama de Conexiones LM 3524. ....	28
<b>Fig. 20.</b> Diagrama de tiempos Mosfet y diodo. ....	30
<b>Fig. 21.</b> Diagrama de tiempos Mosfet y diodo después del circuito de manejo. ....	30
<b>Fig. 22.</b> Caracterización regiones de operación PEM. ....	31
<b>Fig. 23.</b> Topología perfil de demanda. ....	32
<b>Fig. 24.</b> Respuesta paso del sistema. ....	33
<b>Fig. 25.</b> Controlador PI en paralelo. ....	35
<b>Fig. 26.</b> Respuesta en frecuencia del sistema con tiempo muerto. ....	35
<b>Fig. 27.</b> Respuesta en frecuencia del sistema sin tiempo muerto. ....	36
<b>Fig. 28.</b> Respuesta paso con realimentación unitaria .....	37
<b>Fig. 29</b> Implementación Controlador. ....	38
<b>Fig. 30.</b> Entradas y salidas bloque PID. ....	39
<b>Fig. 31.</b> Anti-wind up. ....	40
<b>Fig. 32.</b> Interfaz en malla abierta.....	41
<b>Fig. 33.</b> Interfaz en malla cerrada.....	42
<b>Fig. 34.</b> Resultados simulación modelo buck. ....	42
<b>Fig. 35.</b> Respuesta paso convertidor.....	43
<b>Fig. 36.</b> Estructura diagrama de bloques en simulink modelo estático. ....	44
<b>Fig. 37.</b> Resultado simulación modelo estático. ....	45
<b>Fig. 38.</b> Caracterización modelo estático PEM. ....	46
<b>Fig. 39.</b> Diagrama de bloques simulink modelo electrolizador. ....	46
<b>Fig. 40.</b> Subsistema modelo eléctrico electrolizador.....	47
<b>Fig. 41.</b> Subsistema Caudal de hidrógeno electrolizador. ....	47
<b>Fig. 42.</b> Curvas características de potencia contra voltaje electrolizador.....	48

<b>Fig. 43.</b> Curvas características de potencia contra flujo de hidrógeno electrolizador. ....	49
<b>Fig. 44.</b> Respuesta paso del sistema con set point 2,5 V. ....	50
<b>Fig. 45.</b> Respuesta paso del sistema con set point de 2,45 V. ....	50
<b>Fig. 46.</b> Respuesta paso del sistema con set point de 2,15 V. ....	51
<b>Fig. 47.</b> Respuesta paso del sistema con set point de 2,11 V. ....	52
<b>Fig. 48.</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 15 a 13 $\Omega$ . ....	52
<b>Fig. 49.</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 13 a 10 $\Omega$ . ....	53
<b>Fig. 50</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 10 a 8 $\Omega$ .....	53
<b>Fig. 51</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 8 a 10 $\Omega$ . ....	54
<b>Fig. 52</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 10 a 13 $\Omega$ . ....	55
<b>Fig. 53.</b> Respuesta paso a disturbio en la carga 13 a 15 $\Omega$ . ....	55
<b>Fig. 54.</b> Respuesta del sistema a cambios bruscos en set point. ....	56
<b>Fig. 55.</b> Respuesta del sistema a cambios bruscos en la carga. ....	57

**RESUMEN:**

El siguiente documento presenta una solución para automatizar un Sistema de celdas de combustible PEM de baja potencia.

Con base en experimentos realizados con el sistema de celdas de combustible, se evidencia que es posible modificar su comportamiento cuando hay variación de flujo de hidrógeno entrante.

Teniendo en cuenta que el flujo de hidrógeno es generado por un electrolizador, se propone una solución poco convencional la cual consiste en manipular la energía eléctrica que pasa a través del electrolizador, con el objetivo de modificar la producción de hidrógeno y así, controlar el suministro del gas, el cual es uno de los reactantes presentes en la reacción química que permite la generación de energía eléctrica.

## INTRODUCCIÓN:

El presente proyecto desarrolla el tema de la automatización de un sistema de energía renovable utilizado de manera poco convencional en aplicaciones estacionarias, conocido como fuel cells o celdas de combustible, del tipo PEM (proton Exchange membrane) de baja potencia. Estos sistemas convierten energía química en energía eléctrica, tomando como principales insumos el hidrógeno y el oxígeno, haciendo que estos reaccionen por medio de un catalizador ubicado en la membrana intercambiadora de protones (PEM por sus siglas en inglés), para luego suministrar energía eléctrica DC.

Llevando a cabo el compromiso de automatizar este sistema, se pretende encontrar una alternativa a la creciente demanda de energía en aplicaciones estacionarias, demanda que ha saturado la forma de generación convencional, por lo cual es pertinente encontrar soluciones por medio de recursos renovables tales como energía solar, eólica, y en nuestro caso, energía electroquímica.

Se escogió el sistema de las celdas de combustible, debido a que es un sistema que en aplicaciones estacionarias es novedoso, ya que en la mayoría de los casos se utilizan en aplicaciones móviles tales como vehículos eléctricos para uso masivo (buses y transporte público) y para uso particular, además de contar con una eficiencia de energía mucho mayor que la que se encuentra en los otros sistemas de energía renovable.

Basando el objetivo del sistema en la cantidad de energía eléctrica que puede proveer, y sabiendo que depende necesariamente de la cantidad de hidrógeno suministrada, es necesario controlar este suministro para que, teniendo en cuenta la demanda energética requerida, haya más o menos cantidad de hidrógeno entrando a las celdas. Este procedimiento se debe realizar de manera automática, sabiendo que el tema que se desea explorar es el de suministrar energía a una aplicación estacionaria. Suponiendo que se está energizando un lugar de trabajo o de residencia, el suministro debería ser ininterrumpido, por lo cual es necesario que sea un sistema automatizado, justificando así, la realización de este trabajo de grado.

De acuerdo con lo anterior, se plantea como objetivo general implementar un sistema de control que permita automatizar el suministro de insumos que ingresan a las celdas de combustible. Como objetivos específicos, se plantea:

- Realizar la identificación de la celda de combustible mediante aproximaciones de primer o segundo orden, para obtener el modelo dinámico de la planta.
- Diseñar una ley de control tipo PID que permita regular el flujo de los insumos entrantes a las celdas de combustible para así modificar el comportamiento del suministro de energía eléctrica.
- Diseñar una interfaz gráfica que permita el monitoreo, tanto de los datos de entrada y salida del sistema, como del controlador implementado, así como la visualización de las medidas de eficiencia y demanda del suministro de energía eléctrica.
- Comprobar el funcionamiento de la acción de control implementando un protocolo de pruebas que permita mostrar la automatización del suministro de insumos que ingresan al banco de celdas de combustible.

El presente documento contiene referencias teóricas acerca de los fenómenos físicos y químicos que intervienen en la dinámica del dispositivo conocido como celda de combustible, así como teoría acerca de aproximaciones eléctricas que permitan la caracterización dinámica de este.

Se presenta también el diseño del convertidor DC/DC, del controlador PI, del perfil de demanda de energía y de la interfaz gráfica, enunciando criterios que permitan la posterior implementación de cada una de estas etapas.

Se presentan también las simulaciones de los modelos propuestos de la celda de combustible, del electrolizador, de la acción de control y del convertidor DC/DC para posteriormente validar los datos obtenidos en la implementación de la solución.

## MARCOTEÓRICO:

Dado que el objetivo que se tiene es el de automatizar un sistema de celdas de combustible, es conveniente enmarcar el proyecto en los siguientes parámetros conceptuales:

- a. Teoría acerca del funcionamiento general de las celdas de combustible.
- b. Teoría y generalidades acerca de funcionamiento del electrolizador.
- c. Modelamiento de un electrolizador.
- d. Fundamentos acerca de cómo obtener modelos de primer orden de la planta a controlar.
- e. Análisis de trabajos previos acerca del control de celdas de combustible.
- f. Convertidor Buck-Modelo Matemático.

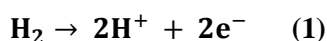
### a. Teoría acerca del funcionamiento general de las celdas de combustible:

Una celda de combustible es un dispositivo de conversión de energía electroquímica que convierte hidrógeno y oxígeno en electricidad y calor. Es similar a una batería en tanto que puede ser recargado mientras se está usando para generar energía. En lugar de recargarse usando electricidad, una celda usa hidrógeno y oxígeno. Las celdas de combustible difieren de las baterías en que la energía que almacena la batería la almacena en los productos químicos que posee, mientras que las celdas de combustible actúan como un convertidor; reactivos y productos están en tránsito dentro de la celda de combustible.

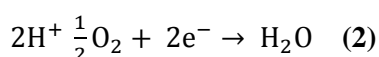
Son cuatro los elementos básicos de una celda de combustible PEM: Ánodo, cátodo, electrolito y catalizador (Ver fig.1).El ánodo es el punto negativo de la celda, el cual conduce los electrones que son liberados por las moléculas de hidrógeno. El cátodo es el punto positivo de la celda, el cual distribuye el oxígeno hacia la superficie del catalizador. El electrolito, o membrana intercambiadora de protones (PEM por sus siglas en inglés), es considerado el corazón de la celda de combustible, ya que es donde la reacción química ocurre.

Dos capas, una de difusión y otra de reacción la rodean. Finalmente, el catalizador es un material especial que facilita la reacción química de hidrógeno y oxígeno. Es usualmente hecho de polvo de platino finamente revestido sobre papel de carbón. Algunas de las críticas hacia la tecnología de celdas citan la limitada disponibilidad del platino como una restricción a la conversión de vehículos con motor de combustión interna a vehículos con motores eléctricos energizados con celdas de combustible.

En el ánodo de la celda, el hidrógeno se difunde a través de la parte porosa de este y de la capa de difusión hasta el catalizador de platino.



El ion de hidrógeno pasa a través del electrolito mientras los electrones pasan a través de un circuito externo. En el cátodo de la celda, el oxígeno está siendo forzado a pasar a través del catalizador, donde se forman dos átomos de oxígeno. Cada uno de estos átomos se cargan negativamente. La carga negativa atrae a los dos iones de hidrógeno a través de la membrana, donde se combinan con un átomo de oxígeno dos electrones del circuito externo para formar una molécula de agua.



El agua que resulta de las reacciones extraída del sistema debido al exceso de flujo de aire.

La reacción en una sola celda de combustible, solo puede generar al rededor 0.7 volts. Para incrementar este voltaje, las celdas de combustible pueden ser conectadas en serie y así el voltaje simplemente se incrementará. [1]



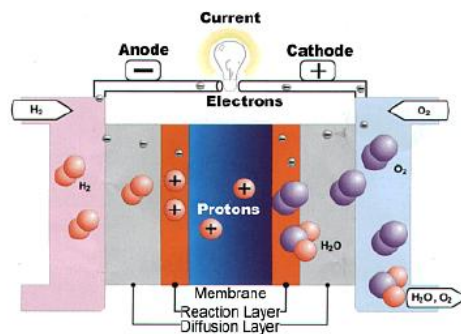


Fig. 1. Celda de combustible PEM [1]

### b. Teoría y generalidades acerca de funcionamiento del electrolizador:

Un electrolizador alcalino es un dispositivo en el que se produce la electrólisis del agua en el seno de un medio alcalino. En el electrolizador se produce la reacción no espontánea de separar el agua en hidrógeno y oxígeno al hacer circular una corriente continua de una manera conveniente.

#### Partes de un electrolizador.

Un electrolizador consta de varias celdas electrolíticas conectadas eléctricamente entre sí. Los procesos electroquímicos demandan requisitos particularmente altos en cuanto a protección contra la corrosión. La electrólisis convencional de agua con hidróxido de potasio como electrolito puede llevarse a cabo usando acero al carbono como material de construcción. Las áreas especialmente sujetas a ataque están revestidas con plásticos o cerámica o bien están niqueladas.

#### Electrodos.

Se encargan de conducir de manera conveniente la corriente eléctrica en el seno del electrolito para que se produzca correctamente el proceso de la electrólisis, el electrodo positivo se denomina ánodo y en su interfaz de separación con el electrolito se produce la semi-reacción de formación de oxígeno gaseoso y el electrodo negativo se denomina cátodo y en su interfaz de separación con el electrolito se produce la semi-reacción de formación del hidrógeno gaseoso.

Los requisitos que tienen que cumplir los electrodos son:

- Resistentes a la corrosión.
- Buena conductividad.
- Buenas propiedades catalíticas.
- Integridad estructural.

El cátodo está usualmente fabricado en acero. Para reducir el sobre voltaje de interfaz electrodo-electrolito la textura de la superficie puede ser activada y revestida con catalizadores diversos. El ánodo y los electrodos de celdas bipolares están normalmente hechos de níquel o acero recubierto en níquel. Junto al platino, que no puede usarse por razones económicas, este material tiene el sobre voltaje mínimo.

### Electrodo:

Se encarga de aportar los iones encargados de la conducción en el interior de la celda electrolítica. En este caso al tratarse de una electrólisis que emplea una solución en agua, el electrolito también aporta el reactivo de la reacción.

Para minimizar las pérdidas debidas a la resistencia del electrolito y debido a la resistencia notable de corrosión del acero inoxidable en este rango de concentración, se emplean soluciones de hidróxido de potasio al 25 - 40%. Otros electrolitos son hidróxido de sodio acuoso o cloruro de sodio. Dado que la conductividad de los electrolitos convencionales aumenta con la temperatura,

La Figura 1 muestra la conductividad del hidróxido de potasio como función de la concentración de electrolito y la temperatura. Queda claro observando esta figura que el rango óptimo de conductividad para el electrolito se encuentra entre 25 - 40 % y por consiguiente ésta es la concentración usada en los electrolizadores alcalinos comerciales.

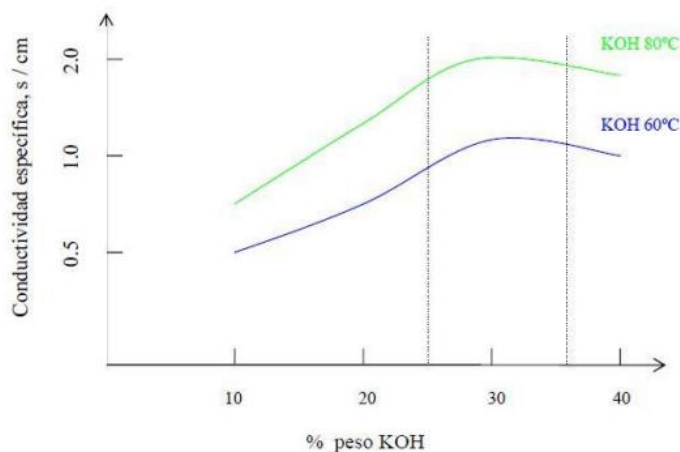


Fig. 2. Conductividad del hidróxido de potasio [2]

### Diafragma.

Separa el compartimento anódico y catódico solo permitiendo el paso de los iones que transmiten la carga del cátodo al ánodo. El diafragma en las unidades clásicas de electrólisis era inicialmente de amianto. Las mallas de amianto, que separan los electrodos uno del otro, estaban reforzadas con redes de níquel.

Debido a los riesgos para la salud involucrados con el uso de amianto, actualmente se usan ya materiales sustitutos, como los diafragmas de óxidos cerámicos basados en polisulfonatos.

### Principios de funcionamiento.

Un electrolizador alcalino emplea una solución alcalina, normalmente hidróxido de potasio como electrolito.

En la configuración monopolar las celdas electrolíticas están conectadas eléctricamente en paralelo, los cátodos de todas las celdas electrolíticas están conectados entre sí y al igual que los ánodos, pero tanto ánodos como cátodos están físicamente separados, ver figura 3.

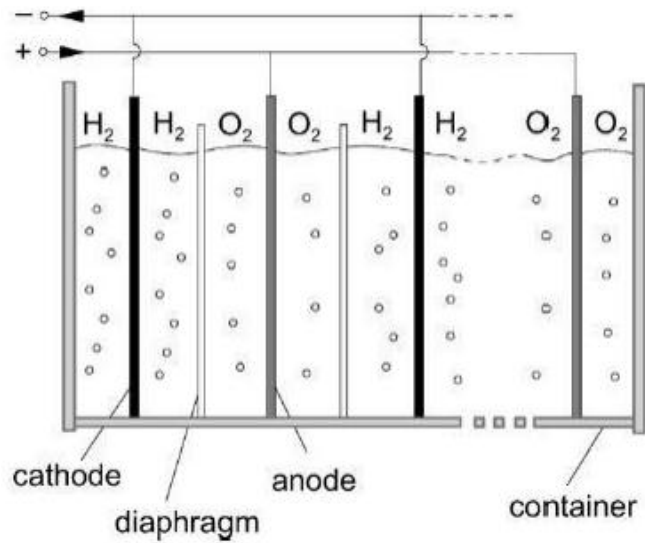


Fig. 3 Esquema de un electrolizador monopolar [2].

La figura 4 muestra la configuración básica de una celda electrolítica alcalina. Así, ánodo y cátodo se encuentran separados por un diafragma cerámico o de polisulfonato, el cual permite fluir a la corriente pero es impermeable a los gases. La celda está llena de un electrolito. Durante la electrolisis, se forma oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo, teniendo lugar las siguientes reacciones [11]:

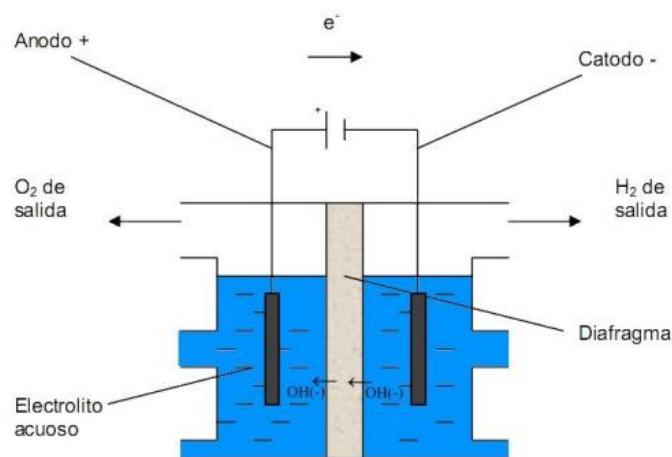
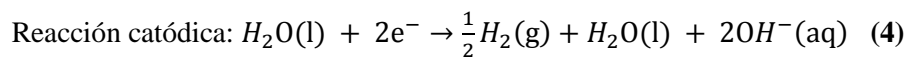
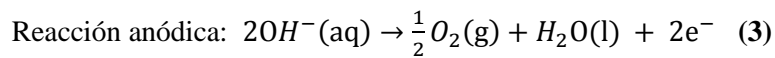


Fig. 4. Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino [2].

### c. Modelamiento de un electrolizador:

### Planteamiento eléctrico.

La curva característica de electrolizador determina los diferentes puntos de funcionamiento de este debido al efecto de los sobre voltajes que representan las irreversibilidades del proceso.

Este efecto se ve cuantificado por una serie de coeficientes  $r, s, t$  que se determinan experimentalmente y por el voltaje reversible y son dependientes de la temperatura del electrolito (T).

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A}I + s \cdot \log\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (5)$$

Donde  $U$  es la diferencia de potencial en bornes de una celda electrolítica,  $I$  es la corriente eléctrica que atraviesa dicha celda,  $U_{rev}$  es el voltaje reversible y  $\log\left(\frac{t}{A}I + 1\right)$  se refiere a logaritmo decimal. El voltaje reversible se define como:

$$U_{rev} = \frac{\Delta G_R}{zF} \quad (6)$$

Donde  $\Delta G_R$  es el incremento de energía libre de Gibbs,  $z$  es el número de moles de electrones intercambiados en la reacción de electrólisis, en este caso ( $z = 2$ ) y  $F$  es la constante de Faraday.

$$F \approx 96485,3383 \frac{C}{mol} \quad (7)$$

La dependencia de los coeficientes con la temperatura del electrolito (T) se obtiene mediante regresión una vez realizadas las medidas experimentales de tensión (U) e intensidad (I) para diferentes temperaturas.

$$s(T) = s_0 + s_1T + s_2T^2 \dots \quad (8)$$

$$t(T) = t_0 + \frac{t_1}{T} + \frac{t_2}{T^2} \dots \quad (9)$$

$$r(T) = r_0 + r_1T + r_2T^2 \dots \quad (10)$$

### Caudal de hidrógeno.

Se calcula el caudal de hidrógeno producido mediante la siguiente expresión:

$$\varphi_{H_2} = \eta_f \frac{NI}{zF} \quad (11)$$

Donde  $\eta_f$  es el rendimiento de Faraday que tiene en cuenta el efecto de las corrientes parásitas,  $N$  es el número total de celdas del electrolizador,  $z$  es el número de electrones transferidos en la reacción de la electrólisis del agua ( $z = 2$ ) y  $F$  es la constante de Faraday.

En este modelo se utiliza la expresión del rendimiento de Faraday ( $\eta_f$ ) propuesta por Ulleberg [2], donde se pone de manifiesto la dependencia de dicho rendimiento con la temperatura (T).

$$\eta_f = f_2 \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{\left(\frac{I}{A}\right)^2 + f_1} \quad (12)$$

La dependencia de  $f_1$  y  $f_2$  con la temperatura de electrolito (T) se obtienen experimentalmente mediante mediciones en diferentes puntos de funcionamiento, obteniendo expresiones polinómicas de la temperatura. [11]

$$f_1(t) = mf_1 \cdot T + nf_1 \quad (13)$$

$$f_2(t) = e_3 \cdot T^2 + e_2 \cdot T + e_1 \quad (14)$$

- **Implementación en Matlab y Simulink:**

#### Modelo eléctrico:

Este bloque calcula la intensidad y la diferencia de potencial de una celda electrolítica para una potencia dada. Para ello resuelve un sistema de dos ecuaciones algebraicas no lineales con 2 incógnitas:

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A}I + s \log\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (15)$$

$$P = U \cdot I \quad (16)$$

Dicho sistema se resuelve mediante una función realizada en Matlab® llamada *rho* que implementa el método de Newton donde las derivadas numéricas se calculan aplicando una regla de 2 puntos obteniéndose una buena precisión y convergencia (siendo la función tratar derivable en todo el dominio) con un coste computacional bajo, no viendo la necesidad de implementar un método de resolución de ecuaciones no lineales más elaborado o una regla de derivación con más puntos. [11]

#### d. Fundamentos acerca de cómo obtener modelos de primer orden de la planta a controlar:

Para poder obtener el modelo que posteriormente se controlará, se escogieron algunas fuentes bibliográficas que explican la dinámica de las celdas de combustible. Es necesario entender que este sistema se analiza no solo en estado transiente, también posee un modelo estático, que se muestra a continuación:

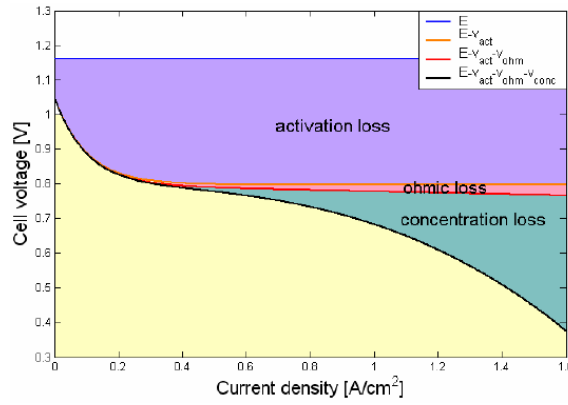
El monto de energía química liberado en la reacción depende de la presión del hidrógeno, presión del oxígeno y la temperatura de la celda. Usando el cambio de energía libre de Gibbs, este valor puede expresarse como:

$$\Delta g_f = \Delta g_f^0 - RT_{fc} \left[ \ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (17)$$

Donde  $\Delta g_f^0$  es el cambio en energía libre de Gibbs a presión estándar,  $R$  es la constante universal de gases,  $T_{fc}$  temperatura de la membrana y  $p_{O_2}$  junto con  $p_{H_2}$  son las presiones de los gases. Debido a que el desempeño eléctrico realizado por la celda es equivalente a la energía química liberada, el valor del voltaje de la celda a circuito abierto  $E$  se expresa en la siguiente ecuación:

$$E = 1,229 - 0,85 \times 10^{-3} \cdot (T - 298,15) + 4,31 \times 10^{-5} \cdot T \cdot (\ln_{p_{H_2}} + 0,5 \cdot \ln_{p_{O_2}}) \quad (18)$$

Para alcanzar el valor real de voltaje de la celda (en acoplamientos eléctricos)  $v_{fc}$ , las caídas de voltaje causadas por activación, concentración y pérdidas óhmicas deben ser restadas del voltaje a circuito abierto (Fig. 5).



**Fig. 5** Pérdidas Celda de combustible PEM [2]

Las pérdidas de activación en el ánodo y en el cátodo son el resultado de la ruptura y formación de enlaces químicos entre electrón y protón, y de las reacciones parásitas electroquímicas causadas por la migración del protón de hidrógeno través de la membrana con cero corriente. Esta caída de voltaje se calcula usando la fórmula:

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \ln(CO_2) + \xi_4 \ln(I) \quad (19)$$

Donde la caída de voltaje depende de coeficientes experimentales los cuales son coeficientes para métricos cinéticos, electroquímicos y de temperatura, así como de la corriente de operación de la celda y de la concentración de oxígeno que se da en ella.

Las pérdidas por concentración son causadas por las caídas en la concentración de los reactivos debido a los problemas en la dinámica del flujo entre el agua y el oxígeno sobre el lado del cátodo, y además de la resistencia electro-osmótica del agua que ocurre cuando el protón viaja a través de la membrana, la Caída de voltaje causada por estas pérdidas está descrita en la siguiente ecuación:

$$\eta_{con} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{I}{i_{lim}}\right) \quad (20)$$

Donde  $i_{lim}$  representa la densidad de corriente que causa una caída de voltaje drástica en la celda y B es la constante de voltaje de concentración.

Las pérdidas óhmicas se derivan de la resistencia de la membrana  $R_m$  cuyo valor depende de la resistencia específica de la membrana  $\rho_M$ , del área efectiva  $A$  y de la corriente de operación:

$$R_m = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (21)$$

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left(1 + 0,03 \left(\frac{T}{A}\right) + 0,062 \cdot \left(\frac{T}{303}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{l}{A}\right)^{2,5}}{\left(\Psi - 0,634 - 3 \cdot \left(\frac{l}{A}\right)\right) \cdot e^{\left(4,18 \cdot \left(\frac{T-303}{T}\right)\right)}} \quad (22)$$

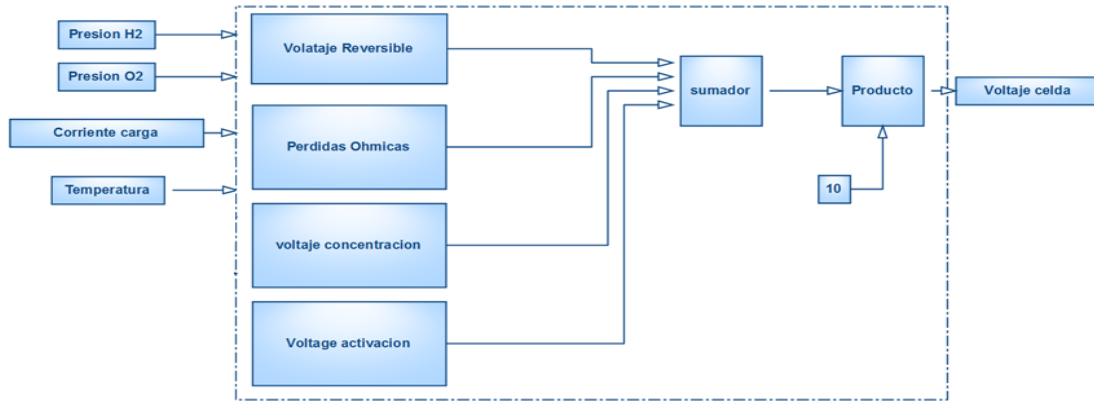
El término  $\Psi$  representa un valor de ajuste constante de 22. La caída de voltaje relacionada con pérdidas óhmicas se expresan como:

$$\eta_{ohm} = I \cdot (R_m + R_c) \quad (23)$$

Usando las caídas de voltaje calculadas y el voltaje a circuito abierto de la celda, el valor real del voltaje de la celda en condiciones estáticas puede ser usando la siguiente ecuación: [2]

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (24)$$

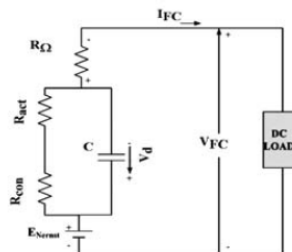
La figura 6 puede ilustrar mejor lo descrito anteriormente:



**Fig. 6.** Diagrama potencia celda de combustible PEM

La siguiente fundamentación teórica, se refiere al modelo dinámico de la celda de combustible:

En una celda de combustible PEM, los dos electrodos están separados por una membrana sólida la cual solamente permite que los iones de hidrógeno sean los que pasen, previniendo el movimiento de electrones. Los electrones en el ánodo fluirán a través de la carga externa y llegarán a la superficie del cátodo, por lo cual, los protones de hidrógeno serán atraídos al mismo tiempo. Por lo tanto, dos capas cargadas con polaridad opuesta son formadas a través de los límites entre la porosidad del cátodo y la membrana. Estas dos capas separadas por la membrana actúan como una doble capa cargada, la cual puede suministrar energía eléctrica; debido a estas propiedades, esta puede ser tratada como un capacitor. El modelo circuital de una celda de combustible considerando todos los efectos discutidos con anterioridad se muestran en la figura 4, donde las resistencias son las resistencias equivalentes para distintos tipos de pérdidas en las celdas de combustible.



**Fig. 7.** Modelo circuital dinámica celda de combustible PEM [3]

Este modelo de celda se describe mediante:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{1}{c} \cdot I - \frac{1}{\tau} \cdot V_d \quad (25)$$

Donde  $V_d$  representa el voltaje dinámico a través de la capacitancia equivalente (asociada con  $\eta_{act}$  y  $\eta_{conc}$ ),  $C$  es el equivalente de capacitancia eléctrica; y  $\tau$  es la constante de tiempo eléctrica de la celda dependiente de la temperatura de la celda dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = c \cdot (R_{act} + R_{conc}) = c \cdot \left( \frac{\eta_{act} + \eta_{conc}}{I} \right) \quad (26)$$

Incluyendo este término en la dinámica del comportamiento eléctrico, el resultante voltaje FC es definido, entonces, por lo siguiente:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{conc} - V_{ohm} \quad (27)$$

Usando (25), (26) y transformaciones de Laplace, fue la función de transferencia (28):

$$V_{fc} = E - \left( \frac{R_{act} + R_{conc}}{sC \cdot (R_{act} + R_{conc}) + 1} + R_{ohm} \right) \cdot I \quad (28)$$

Por otro lado, en algunos artículos, la presión del hidrógeno,  $P_{H_2}$ , y la del oxígeno,  $P_{O_2}$ , se suponen constantes pero esos valores varían en distintas condiciones.

Escogiendo como constante el valor para estas presiones puede haber reducción en la exactitud del modelo. La relación entre el flujo molar de cualquier gas (hidrógeno) a través de la válvula y la presión parcial dentro del canal puede expresarse como:

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (29)$$

Con,  $P_{H_2}$ , la presión parcial del hidrógeno;  $K_{an}$ , la constante de la válvula del ánodo;  $M_{H_2}$ , la masa molar del hidrógeno;  $K_{H_2}$ , y la constante de la válvula molar de hidrógeno.

$$\frac{d}{dt}(p_{H_2}) = \frac{R \cdot T}{V_{an}} \cdot (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (30)$$

Con,  $R$ , la constante de gas universal;  $T$ , temperatura absoluta;  $V_{an}$ , volumen del ánodo,  $q_{H_2}^{out}$  flujo de hidrógeno a la salida;  $q_{H_2}^{in}$ , flujo de hidrógeno a la entrada y  $q_{H_2}^r$ , flujo de hidrógeno que reacciona de acuerdo con las relaciones electroquímicas básicas entre el flujo de hidrógeno y el sistema de corriente de la celda, la tasa de flujo del hidrógeno que reacciona está dada por:

$$q_{H_2}^r = \frac{NI}{2F} = 2I \cdot K_r \quad (31)$$

Donde  $K_r$ , es un parámetro del modelo constante, el cual tiene un valor de  $\frac{N}{4F}$ .

Las ecuaciones del modelo hasta ahora aceptan como entradas las presiones parciales de los gases. Derivando la ecuación de gas, una relación específica es derivada entre la presión parcial y la tasa de flujo entrante del combustible; la presión parcial del hidrógeno y el oxígeno se da en las siguientes ecuaciones:

$$p_{H_2} = \frac{1}{1 + \tau_{H_2} \cdot S} \cdot (q_{H_2}^{in} - 2I \cdot K_r); \quad p_{O_2} = \frac{1}{1 + \tau_{O_2} \cdot S} \cdot (q_{O_2}^{in} - 2I \cdot K_r); \quad \tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{R \cdot T \cdot K_{H_2}}; \quad \tau_{O_2} = \frac{V_{an}}{R \cdot T \cdot K_{O_2}} \quad (32)$$

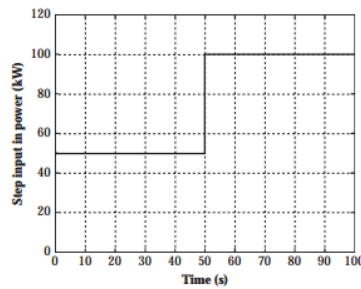


Con  $K_{H_2}$ , constante molar de válvula para hidrógeno;  $K_{O_2}$ , constante molar de válvula para oxígeno;  $\tau_{H_2}$ , tiempo de respuesta para hidrógeno;  $\tau_{O_2}$ , tiempo de respuesta para oxígeno. [3]

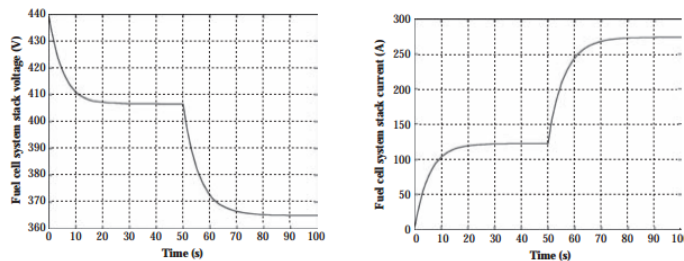
**e. Análisis de trabajos previos acerca del control de celdas de combustible:**

En el texto “*Microgrids and active distribution networks*” se encontró una apéndice donde se desarrolla de manera muy similar a lo que se busca desarrollar en este trabajo de grado. En el texto se comienza desarrollando un modelo matemático del sistema de celdas de combustible, donde se desarrolla un modelo para la celda y otro para el que maneja la dinámica de suministro de hidrógeno y oxígeno y agua, debido a que el sistema manejado en este ejemplo es de 500 kW. Un sistema de esta potencia, necesita un sistema de hidratación en su núcleo, con el fin de mantener el funcionamiento deseado.

Después, en el mismo documento y luego de realizar el modelado, se le coloca una etapa de acondicionamiento de potencia, compuesta un conversor tipo buck, que adecúa la señal DC que sale de la celda contra ruidos para luego transmitirla a un inversor, el cual permitirá obtener una señal AC. La adecuación de esta señal no será un punto importante en este trabajo de grado; lo importante será manipular el voltaje y la corriente de la celda de combustible en función del flujo de hidrógeno de la celda de combustible. Este texto tiene unas graficas útiles para el trabajo de grado: muestra el comportamiento del voltaje y corriente de la celda de combustible cuando se realizan variaciones en la carga.



**Fig. 8.** cambio de tipo paso en la carga del inversor [4]



**Fig. 9** voltajes y corrientes de la celda de combustible [4]

Como se puede observar en las figuras 8 y 9, ante un cambio en la carga, el voltaje en la celda tiende a disminuir mientras que la corriente en la carga tiende a aumentar, siendo congruente con la curva de polarización del dispositivo mostrada a continuación:

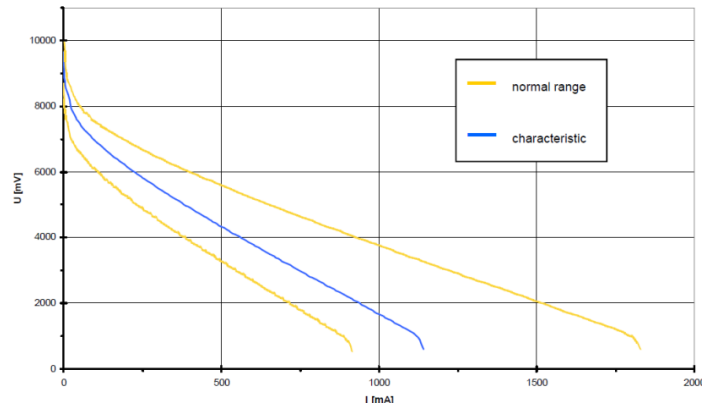


Fig. 10. Curva característica de la celda de combustible

Como se puede observar en la figura 10, la relación entre corriente y voltaje es de tipo inversa, siendo congruente con los resultados mostrados en las figuras 8 y 9.

Cabe aclarar que en la referencia anteriormente consultada, no realizan modificación de flujo de hidrógeno, que es uno de los objetivos de este trabajo.

Para fundamentar teóricamente el sistema propuesto para controlar el voltaje de entrada del electrolizador, es necesario enunciar los cálculos del convertidor DC-DC que permitirá alimentar dicho electrolizador entre un rango de voltaje determinado. Así mismo, es pertinente adjuntar los cálculos del diseño del controlador PID que será el responsable de regular la repuesta de voltaje de la celda de acuerdo a un set point predeterminado.

#### f. Convertidor Buck-Modelo Matemático:

El modelo matemático del convertidor se realizara después de obtener los valores de los componentes activos del convertidor; estos fueron hallados anteriormente. El modelado en esta ocasión será realizado asumiendo que este traba en modo de conducción continua (CCM). La técnica utilizada para obtener el modelo será por medio de espacio de estados. Básicamente para este convertidor, se definen dos condiciones de operación del interruptor Q: ENCENDIDO ( $u=1$ ) y APAGADO ( $u=0$ ). Los circuitos que ilustran los modos de operación del convertidor se muestran a continuación:

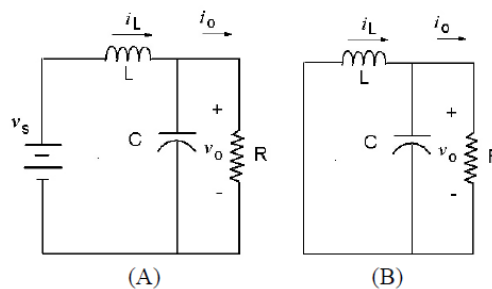


Fig. 11. Modos de operación del convertidor

Luego se toman dos estados del sistema que serán la corriente en el inductor  $i_L$  y el voltaje a la salida  $V_0$  el cual es el mismo del capacitor. Utilizando los circuitos anteriores, se obtienen las siguientes ecuaciones de los estados elegidos:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{V_0}{L} + \frac{V_s}{L}u \quad (33)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC} + \frac{i_L}{C} \quad (34)$$

Donde  $u$  es la variable de control del interruptor. Después de obtener (33) y (34), se toma un modelo promedio del sistema utilizando las siguientes ecuaciones:

$$x_1 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} i_l(r) dr \quad (35)$$

$$x_2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_o(r) dr \quad (36)$$

$$u = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(r) dr \quad (37)$$

Remplazando (37) en (35) y (36) se obtiene:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{x_2}{L} + \frac{V_s}{L} \hat{u} + \frac{\hat{V}_s}{L} u \quad (38)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{x_1}{C} + \frac{\hat{x}_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (39)$$

Después de obtener (39), se puede obtener el espacio de estados linealizado:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L \\ 1/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s/L \\ 0 \end{bmatrix} \hat{u} + \begin{bmatrix} U/L \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_s \quad (40)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (41)$$

Con el modelo linealizado, se obtienen las siguientes funciones de transferencia las cuales describen la salida del convertidor:

$$G_1(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{u}(s)} = \frac{V_0}{U} * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (42)$$

$$G_2(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{v}_s(s)} = U * \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (43)$$

$$G_3(s) = \frac{\hat{v}_0(s)}{\hat{i}_0(s)} = U * \frac{s*L}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (44)$$

Las ecuaciones (42), (43) y (44) representan el efecto de las variaciones del ciclo útil, al cual se le realizara el control, y las variaciones en el voltaje de entrada y la corriente de salida que se toman como perturbaciones.

## ESPECIFICACIONES:

El objetivo del trabajo de grado es diseñar e implementar un sistema basado en celdas de combustible automatizado que permita regular el suministro de hidrógeno, dada una carga específica, que sea capaz de entregar la corriente necesaria.

Las celdas de combustible, las cuales fueron proporcionadas por el departamento de física, cuentan con un electrolizador, un tanque de almacenamiento y por ultimo un juego de diez celdas de combustible. Existen unos sub-sistemas los cuales cumplen una función en específico. Estos sub-sistemas son los siguientes:

1. Conversor DC-DC.
2. Electrolizador.
3. Control PID.
4. Set de celdas de combustible.

El conversor DC-DC debe tener la capacidad de suministrar energía hacia el electrolizador cumpliendo con las especificaciones del mismo, es decir, suministrar voltaje desde 0 V hasta 4,5 V, con corriente demandada por el dispositivo que va desde los 800 mA (en condiciones de encendido) hasta los 5 A.

El electrolizador debe modificar su producción de hidrógeno a medida que se modifica el suministro de energía, llegando a su máxima producción cuando la fuente alcance valores cercanos a 4,5 V y a 5 A en corriente.

El control PID debe regular el voltaje de salida de la celda en un voltaje predeterminado (set point), teniendo en cuenta una demanda de energía que la celda debe ser capaz de suplir, compensando la caída de potencial registrada en la celda con la corriente de salida.

Las celdas de combustible deben proveer energía a una aplicación predeterminada, que represente la región bajo la cual el dispositivo opere en su región lineal. Se debe obtener una resistencia de carga a la salida que esté entre los 7  $\Omega$  y los 15  $\Omega$ , ya que con este rango se garantiza la correcta operación del sistema.

Para ilustrar mejor la manera como estos subsistemas se interconectan, se presenta el siguiente diagrama de bloques:

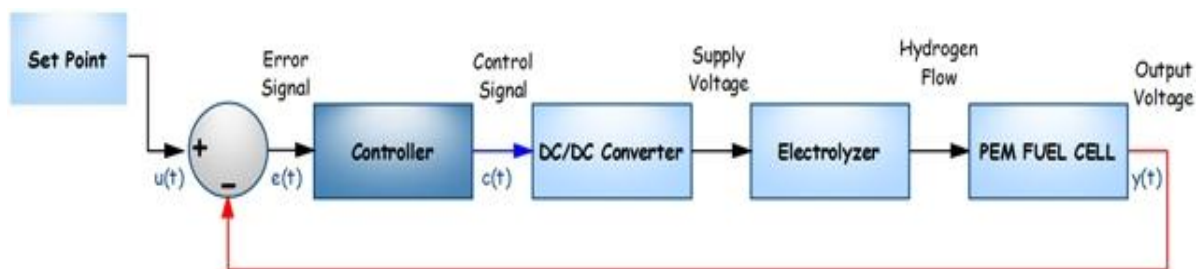


Fig. 12. Diagrama de bloques general.

**Protocolo de Funcionamiento:**

Es pertinente indicar que el sistema de celdas de combustible funciona siempre y cuando se siga un conjunto de pasos, ya que estos garantizan que el dispositivo se desempeñe adecuadamente.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Polarizar el electrolizador con 3,3 V.
2. Cerrar la válvula manual ubicada entre el tanque de almacenamiento del dispositivo y la celda de combustible, con el fin de almacenar el hidrógeno suficiente para que la celda inicie su funcionamiento normal.
3. Acumular hidrógeno en el tanque de almacenamiento.
4. Abrir la válvula manual y dejar que el hidrógeno fluya hacia la celda.
5. esperar aproximadamente 5 minutos antes de comenzar a utilizar el sistema, con el fin de que la reacción química presente se estabilice.
6. Conectar una carga a los terminales de salida de la celda e iniciar el proceso con la acción de control implementada.

A modo de precaución y por recomendación del fabricante, es necesario que, al momento de utilizar el sistema por primera vez, este contenga agua en el tanque del electrolizador y en el de almacenamiento, ya que si se enciende el sistema en seco, es posible que este se queme. La figura del sistema interconectado totalmente se encuentra adjunta en los anexos.

Asimismo, para mantener el funcionamiento óptimo de la acción de control, es necesario limpiar cuidadosamente los circuitos impresos que intervienen en el proceso. La suciedad causa molestias en estos dispositivos, generando problemas durante el procedimiento.

## DESARROLLOS

### a. Diseño Convertidor buck:

Para el diseño del convertidor buck, se presenta la siguiente topología:

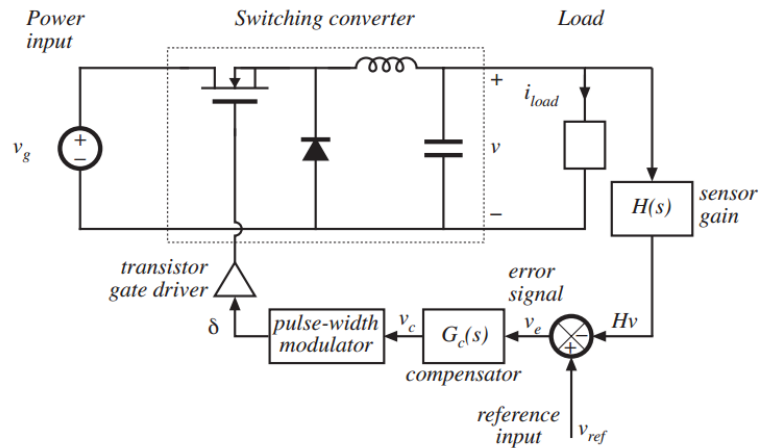


Fig. 13. Lazo de control convertidor buck [5]

Para desarrollarlo, se requieren los siguientes criterios:

Nombre	Variable	Valor
Voltaje Entrada	$V_g$	12 V
Voltaje de Salida	$V$	3,3 V a 4,5 V
Corriente de salida	$I_{load}$	0,8 A a 5,0 A
Rizado de Voltaje	$\Delta V_o$	<1% 100 mV
Rizado de Corriente	$\Delta I$	20% de $I_{load}$

Tabla 1. Criterios de diseño convertidor buck

Se presenta la siguiente relación de corrientes de entrada, inductancia y condensador:

$$I_l = I_c + I_{load} \quad (45)$$

Donde  $I_l$  es la corriente que pasa por la inductancia,  $I_c$  la corriente promedio del condensador e  $I_o$  la corriente de salida del convertidor.

Dado que la corriente promedio del condensador es cero, la relación queda:

$$\bar{I}_l = I_{load} \quad (46)$$

Entonces, se dice que la corriente de salida de la fuente es la corriente promedio de la inductancia, donde la corriente promedio es la misma de salida.

La siguiente gráfica muestra la corriente en modo continuo:

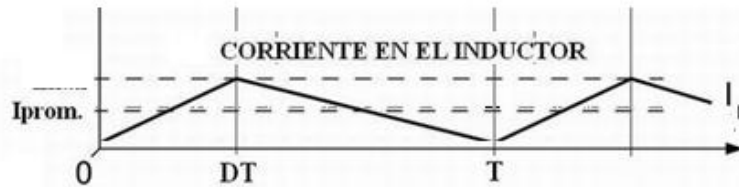


Fig. 14. Corriente en el inductor convertidor buck.

Se plantea entonces un  $I_o$  límite ( $I_{o\lim}$ ) pequeño, ya que es al valor de corriente a través de la inductancia que difícilmente se dará, es decir, se garantizará con este valor de inductancia, el funcionamiento de la misma en modo continuo. Para esto, se usa la siguiente relación:

$$I_{o\lim} = \frac{1}{T} \cdot \text{Area triángulo} = \frac{1}{T} \cdot ((1 - D) \cdot T \left(\frac{\Delta I_l}{2}\right)) \quad (47)$$

Siendo

$$\Delta I_l = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T}{L} \quad (48)$$

$$I_{o\lim} = \left(\frac{1-D}{2} \cdot \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T}{L}\right) = 100 \text{ mA} \quad (49)$$

Donde  $D=0,37$ ;  $V_i= 12 \text{ V}$ ;  $T= 20 \text{ us}$ , equivalente a una frecuencia de switcheo de 50 KHz. Por lo cual:

$$L_{teórica} = 175 \text{ uH} \quad (50)$$

Se recomienda usar una inductancia con un valor 25% más grande que el anteriormente calculado, por lo que el nuevo valor será:

$$L = 219 \text{ uH} \quad (51)$$

Entonces,

$$\Delta I_l = 0,25 \text{ A} \quad (52)$$

Se necesita encontrar el valor del condensador, por lo cual se utiliza la siguiente relación:

$$C = \frac{\Delta I_l}{8 \cdot \Delta V_o \cdot f} \quad (53)$$

Por lo tanto,

$$C = 6,34 \mu F \quad (54)$$

Para garantizar una mejor respuesta a la hora de filtrar el rizado, se recomienda utilizar un condensador diez veces más grande, es decir un  $C = 63,4 \mu F$ . Debido a que este no es un valor comercial, se escoge un valor cercano pero más alto, siendo este

$c = 68 \mu F$  Que maneje 5 V, siendo este el valor máximo que soportará el elemento.

- **Construcción Inductancia:**

Para poder construir la inductancia, es necesario utilizar un núcleo de ferrita que permita mejor almacenamiento de energía para garantizar que el embobinado entregue la corriente demandada según sea el caso.

Se necesita obtener un factor de energía para poder escoger la ferrita adecuada. Este factor se da de la siguiente forma:

$$E[J] = I_{max}^2 \cdot L \quad (55)$$

Siendo

$$I_{max} = I_o + \frac{\Delta I}{2} \quad ; \quad L = 219 \mu H \quad (56)$$

$$I_{max} = 5 A + 0,125 A = 5,125 A \quad (57)$$

Por lo tanto

$$E = 5,75 \times 10^{-3} J \quad (58)$$

Sabiendo este valor, hay que remitirse a la siguiente gráfica, que relaciona referencias de ferritas con núcleo E, para encontrar la adecuada:



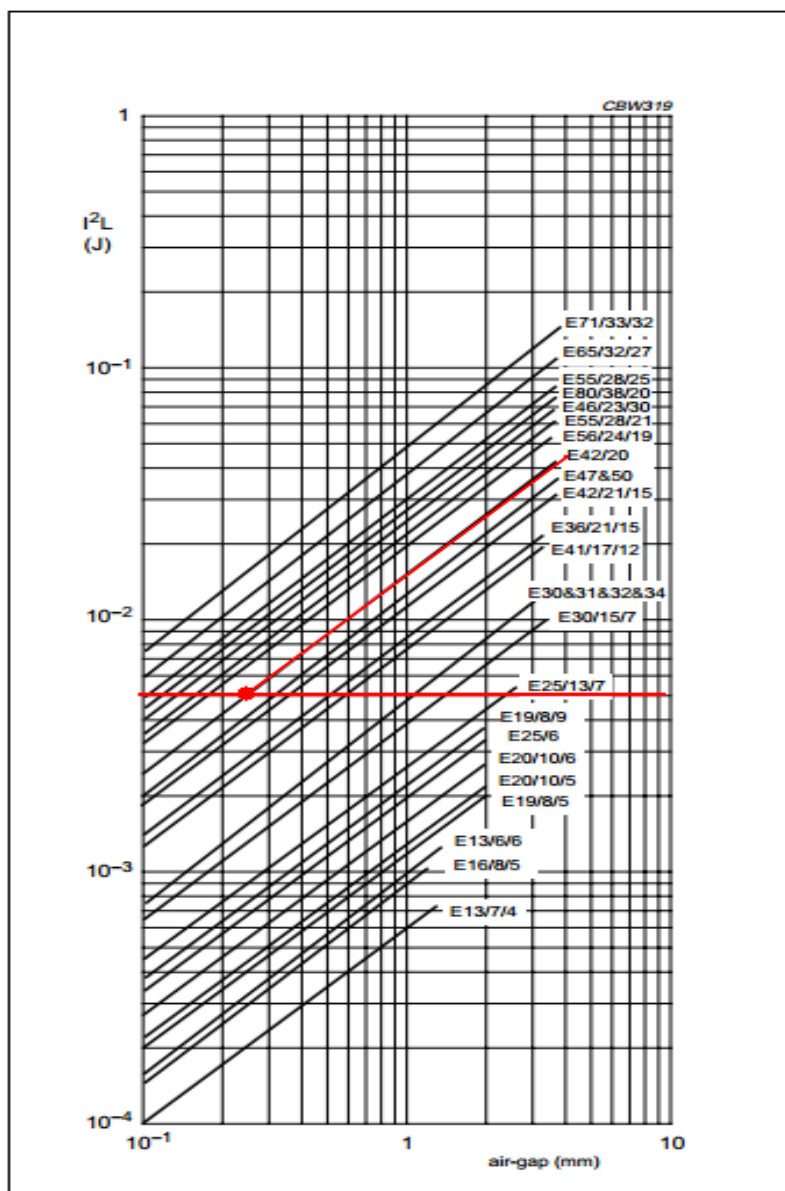


Fig. 15. Gráfica entre energía y gap de núcleo de ferrita

La línea roja corresponde al punto de energía encontrado anteriormente; se puede observar que hay varios puntos de cruce en esta gráfica, pero se escoge un punto de corte basado en un gap que esté entre 0,2 y 0,3 mm. Con estos valores, la referencia de ferrita es la E42/20 de la casa Ferroxcube.

Con esta ferrita, se puede saber cuál es el área efectiva en la cual se puede construir la inductancia. Esta ferrita en particular posee un área efectiva de  $178 \text{ mm}^2$ , de acuerdo con la siguiente figura:

## CORE SETS

### Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$\Sigma(l/A)$	core factor (C1)	0.548	mm <sup>-1</sup>
$V_e$	effective volume	17300	mm <sup>3</sup>
$l_e$	effective length	97.0	mm
$A_e$	effective area	178	mm <sup>2</sup>
$A_{min}$	minimum area	175	mm <sup>2</sup>
m	mass of core half	= 44	g

Fig. 16. Tabla área efectiva ferrita [7]

Al tener el área efectiva de la ferrita, se hace uso de la siguiente ecuación [13]:

$$B \geq Lp \cdot \frac{I_{max}}{Ae \cdot N} \quad (59)$$

Esta ecuación relaciona el número de vueltas de la inductancia con el campo magnético circulante a través de la ferrita, con el valor de la inductancia y con el área efectiva. Por lo tanto, se puede saber el número de vueltas necesario para fabricar el embobinado. Se asume  $B = 0,2$  T:

$$N \geq 31,52 \text{ vueltas} \quad (60)$$

Por lo que  $N=32$  vueltas.

El paso siguiente es el de calcular el calibre AWG del conductor por donde pasará la corriente de la inductancia. Este cálculo se realiza con el valor eficaz de la corriente, calculada de la siguiente forma:

$$I_{LRMS} = \sqrt{I_0^2 + \left(\frac{\Delta I I}{2 \cdot \sqrt{3}}\right)^2} = 5 \text{ A} \quad (61)$$

Teniendo este dato, se debe encontrar la densidad superficial de corriente, que está determinada así:

$$J = \frac{I_{LRMS}}{\text{Area en mm}^2} \quad (62)$$

Se supone una densidad de  $J = 3 \frac{A}{mm^2}$  [13], por lo cual se puede determinar el área:

$$\text{Area en mm}^2 = \frac{5 \text{ A}}{3 \frac{A}{mm^2}} = 1,66 \text{ mm}^2 \quad (63)$$

Con este valor, es posible encontrar el calibre que se desea, utilizando la siguiente tabla:

AWG to Metric Conversion Chart				
AWG Number	Ø [Inch]	Ø [mm]	Ø [mm <sup>2</sup> ]	Resistance [Ohm/m]
4/0 = 0000	0.460	11.7	107	0.000161
3/0 = 000	0.410	10.4	85.0	0.000203
2/0 = 00	0.365	9.26	67.4	0.000256
1/0 = 0	0.325	8.25	53.5	0.000323
1	0.289	7.35	42.4	0.000407
2	0.258	6.54	33.6	0.000513
3	0.229	5.83	26.7	0.000647
4	0.204	5.19	21.1	0.000815
5	0.182	4.62	16.8	0.00103
6	0.162	4.11	13.3	0.00130
7	0.144	3.66	10.5	0.00163
8	0.128	3.26	8.36	0.00206
9	0.114	2.91	6.63	0.00260
10	0.102	2.59	5.26	0.00328
11	0.0907	2.30	4.17	0.00413
12	0.0808	2.05	3.31	0.00521
13	0.0720	1.83	2.62	0.00657
14	0.0641	1.63	2.08	0.00829
15	0.0571	1.45	1.65	0.0104
16	0.0508	1.29	1.31	0.0132
17	0.0453	1.15	1.04	0.0166
18	0.0403	1.02	0.823	0.0210
19	0.0359	0.912	0.653	0.0264
20	0.0320	0.812	0.518	0.0333
21	0.0285	0.723	0.410	0.0420
22	0.0253	0.644	0.326	0.0530
23	0.0226	0.573	0.258	0.0668
24	0.0201	0.511	0.205	0.0842
25	0.0179	0.455	0.162	0.106
26	0.0159	0.405	0.129	0.134
27	0.0142	0.361	0.102	0.169
28	0.0126	0.321	0.0810	0.213

Fig. 17. Tabla de conversión AWG a metros

Se necesita un calibre AWG 14 para poder armar la inductancia del convertidor DC-DC.

- **Modulador de Ancho de Pulso (PWM):**

Para realizar el control por ancho de pulsos del convertidor, se optó por utilizar un circuito integrado que desempeña las funciones que se requieren para la correcta implementación del dispositivo. El circuito es el que corresponde a la referencia LM3524, cuyo diagrama de bloques es el siguiente:

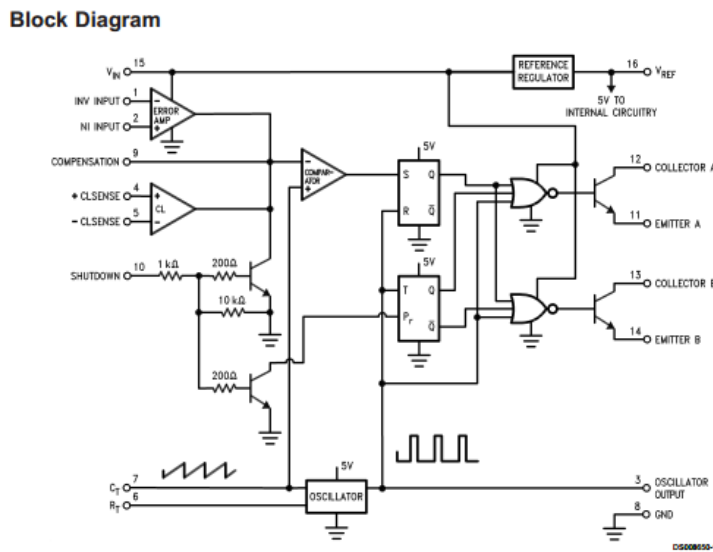


Fig. 18. Diagrama de bloques LM3524.

La frecuencia a la cual opera este integrado, es una frecuencia fija y está determinada por una resistencia  $R_t$  y un condensador  $C_t$  que se conectan al oscilador interno, como se muestra en la figura.

Dado que la frecuencia a la que se trabaja es de 50 KHz, los elementos escogidos son:

$$R_t = 2 \text{ k}\Omega ; C_t = 10 \text{ nF} \quad (64)$$

Para la adecuación del amplificador de error, se implementan dos divisores de voltaje, uno para cada entrada, teniendo en cuenta que el pin 1 es la realimentación de la fuente y el pin 2 es la entrada de la referencia del convertidor. Se implementa el divisor de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$V^- = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{out} ; V^+ = \frac{R_4}{R_3+R_4} * V_{ref} \quad (65)$$

$$\text{Siendo } V_{out} = 5 \text{ V} ; V_{ref} = 5 \text{ V} \quad (66)$$

Se suponen R3 y R4 del mismo valor, en nuestro caso, 10 K $\Omega$ .

Entonces:

$$V^+ = \frac{V_{ref}}{2} \quad (67)$$

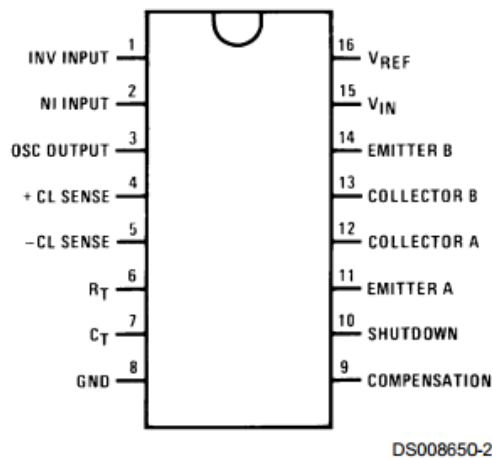
Se realiza la suposición de que  $V^- = V^+$  para garantizar que la señal de referencia será la misma que la salida del convertidor. Entonces:

$$\frac{V_{ref}}{2} = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{out} \quad (68)$$

Se supone un R1 de 10 K $\Omega$ , por lo que se debe averiguar R2 sabiendo que

$V_{ref} = V_{out}$ . Por simple inspección se determina  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

A continuación se presenta el diagrama de conexiones del circuito integrado:



**Fig. 19.** Diagrama de Conexiones LM 3524.

- **Mosfet de conmutación:**

Para escoger el mosfet que actuará como switch, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

A la hora de diseñar se puede seleccionar entre un MOSFET de canal N o uno de canal P. Normalmente los MOSFET de canal P no han sido tan populares y no se han considerado tan útiles como su contraparte de canal N, siendo una de las razones más notables la altísima resistencia en estado de encendido que presenta el canal P en comparación con los otros. Pero cuando no se cuenta con una referencia directa a tierra el MOSFET de canal P es más útil, ya que el canal N simplemente no puede superar su funcionalidad en estos casos.

Para que un MOSFET conmute adecuadamente requiere un voltaje VGS mínimo entre las terminales G (Gate) y S (Source), lo que implica que el voltaje en S se debe mantener preferiblemente con un valor fijo. En el convertidor Buck cuando un MOSFET canal N se enciende el voltaje en S tiende al voltaje en D (Drain), que es el voltaje de entrada Vg menos la caída de potencial en el transistor. Por lo tanto si se utilizara un MOSFET canal N, al encenderse el transistor VGS disminuirá por debajo del mínimo hasta que no sea capaz de encenderlo nuevamente.

En el caso en que el voltaje de entrada es menor al voltaje máximo de G especificado por el fabricante, entonces el primero puede ser utilizado fácilmente para manejar el transistor. Como en el MOSFET de canal P la terminal S se encuentra alimentada por el voltaje de entrada Vg que es fijo, no se necesita añadir ningún circuito externo para mantener VGS en el valor deseado. Por estas razones se utiliza en este convertidor un MOSFET canal P [12].

Se deben encontrar los valores máximos de corriente que debería ser capaz de soportar el transistor. Para ello se plantea la siguiente ecuación:

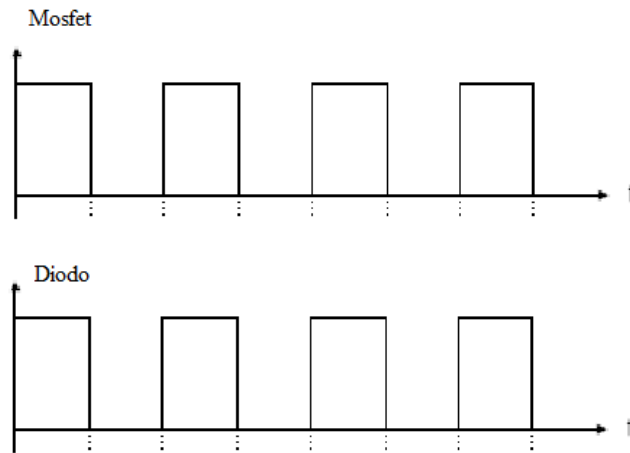
$$I_Q = D \cdot I_0 \text{ Siendo } D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{5}{12} = 0,42 ; I_0 = 5 A \quad (69)$$

$$I_Q = 2,1 A \quad (70)$$

Por lo que se debe seleccionar un mosfet que sea capaz de manejar esa corriente. Teniendo en cuenta que es una referencia fácil de conseguir, se optó por utilizar un IRF 9530N cuya hoja de especificaciones se encuentra anexada.

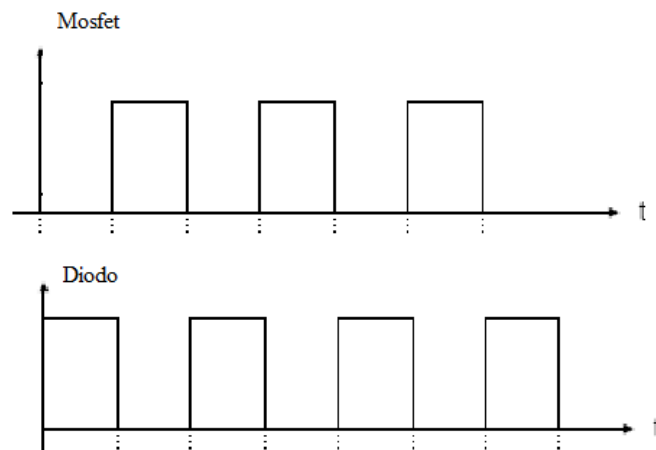
- **Circuito de manejo del mosfet:**

Antes de conectar el LM 3524 con el gate del mosfet, es necesario adecuar un transistor entre ellos que sea capaz de invertir la fase de la señal, debido a que se debe prender y apagar en intervalos de tiempo adecuados. El fenómeno que se presenta es el siguiente:



**Fig. 20.** Diagrama de tiempos Mosfet y diodo.

El intervalo de encendido de ambos dispositivos es el mismo, cuando se debería observar en tiempos contrarios. Por lo tanto, si se invierte la fase de la señal del circuito integrado, la respuesta quedaría de la siguiente manera:



**Fig. 21.** Diagrama de tiempos Mosfet y diodo después del circuito de manejo.

Se selecciona entonces un BJT 2N2222.

Se requiere también una resistencia que sea capaz de descargar la capacitancia que posee el transistor entre sus terminales gate y source, por lo que se usa una resistencia de 220  $\Omega$ . Si es más pequeña, el tiempo de descarga de esta capacitancia será mucho menor.

Para limitar la corriente que entra al BJT, se diseña una resistencia que irá conectada a la base, siguiendo los siguientes criterios:

$$I_c = \frac{V_s - V_{CE(sat)}}{220} = \frac{12 - 0,3}{220} = 50 \text{ mA} \quad (71)$$

Luego,

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{50 \text{ mA}}{150} = 300 \text{ } \mu\text{A} \quad (72)$$

$$R_b = \frac{V_s - V_{CE(sat-pwm)} - V_{BE}}{I_b} = \frac{12 - 1 - 0,7}{300 \text{ } \mu\text{A}} = 34,3 \text{ k}\Omega \quad (73)$$

- **Diodo de conmutación:**

Para escoger el diodo que debe conmutar a la misma frecuencia que el mosfet, se debe pensar en un diodo schottky, ya que al momento de conmutar lo hacen mucho más rápido que un diodo rectificador convencional.

Otra característica que se debe tener en cuenta es la corriente que debe manejar el dispositivo. Esta corriente se calcula de la siguiente forma:

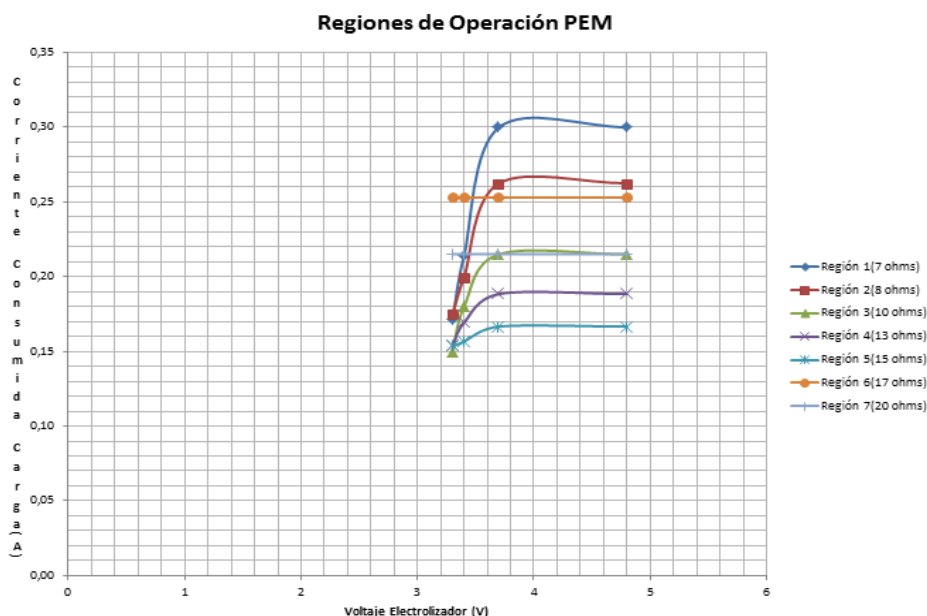
$$I_d = (1 - D) \cdot I_o = 2,97 \text{ A} \quad (74)$$

Se escoge un sb540, el cual maneja una corriente hasta de 5 A. Las especificaciones se encuentran en los anexos.

El circuito esquemático del convertidor se encuentra en la sección de anexos.

**b. Implementación Perfil de demanda de energía:**

Con el objetivo de mostrar en una aplicación el funcionamiento del sistema con controlador, se implementó un perfil de demanda de energía que consiste en encender 8 leds de manera secuencial, emulando cargas entre 8  $\Omega$  y 15  $\Omega$ , con un voltaje de salida de 2 V, esperando que la celda suministre corriente entre los 133 mA y los 250 mA. El criterio para escoger este rango de consumo de energía se da con base en la siguiente gráfica, la cual representa una caracterización del sistema a malla abierta (sin acción de control incluida):



**Fig. 22.** Caracterización regiones de operación PEM.

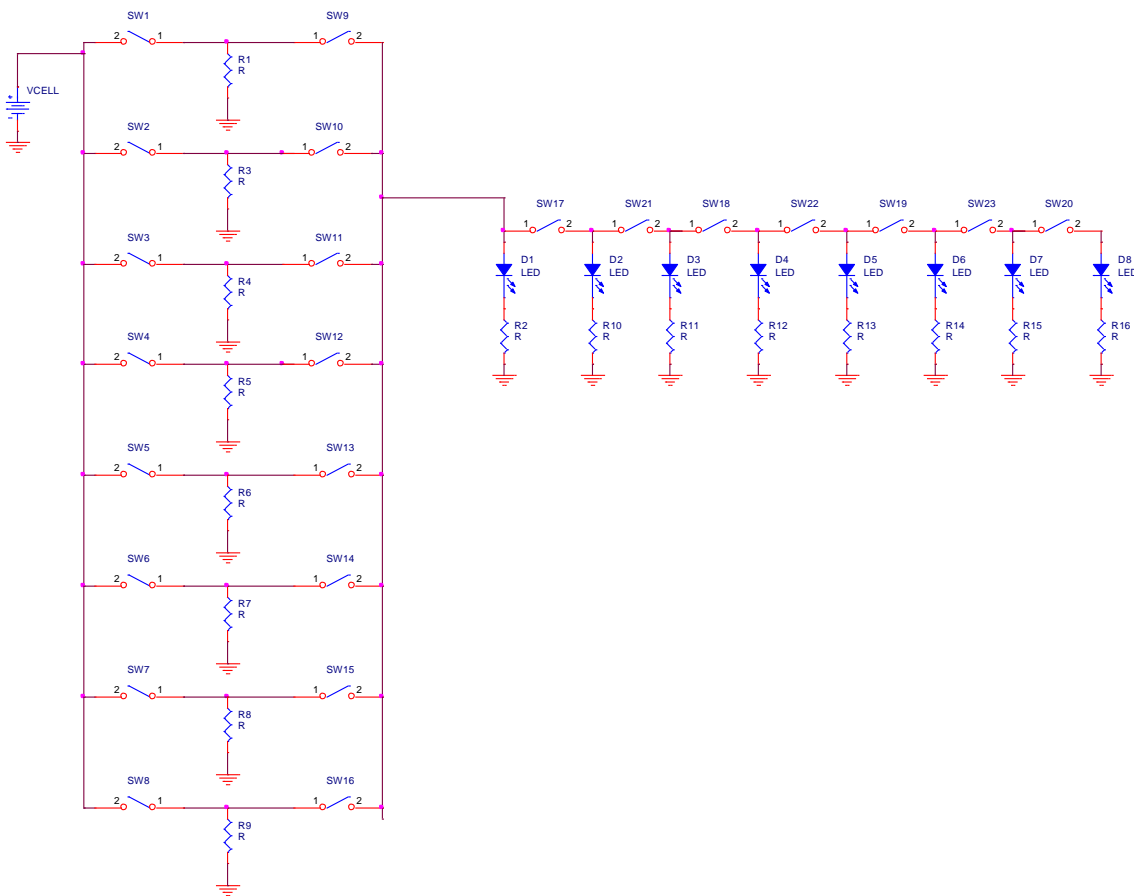
Esta gráfica muestra el comportamiento del sistema cuando es forzado a operar con cargas resistivas entre los 7 y 20  $\Omega$ . Se varía el voltaje del electrolizador, el cual variará la producción de hidrógeno y hará cambiar el voltaje a la salida de la celda. Dependiendo del valor de la carga, habrá una corriente consumida distinta en cada caso. Se puede observar que entre los 7 y los 15  $\Omega$ , a medida que varía el voltaje de entrada en el electrolizador, la corriente consumida por la carga aumenta, es decir, el voltaje de salida de la celda también lo hace. Cosa distinta pasa en las cargas de 17 y 20  $\Omega$ . En este punto, no importa cuánto se varíe el voltaje del electrolizador, la corriente consumida permanece constante. Es por esta razón que el rango de operación de la celda de combustible debe ir entre los 7 y los 15  $\Omega$ , porque es en este conjunto de valores donde se presentan cambios en la salida de la celda cuando hay disturbios de hidrógeno, generados por el voltaje a la entrada del electrolizador. Antes de los 7  $\Omega$  el voltaje de salida de la celda oscila, por lo que no es viable realizar alguna acción de control de suministro por debajo de este valor. La tabla de valores correspondiente a la gráfica se encuentra en los anexos.

Se escoge un valor de 2 V constante en la salida del sistema, porque es posible llegar a este punto de voltaje en la totalidad del rango de operación definido.

Los 8 leds representan la carga de 8  $\Omega$  y un solo led, representa la de 15  $\Omega$ .

Dado que los leds rojos pueden soportar corrientes de 20 mA, 8 leds solamente demandarían una corriente de 160 mA. Entonces, se plantea conectar resistencias en paralelo con cada LED que permitan que se consuman los 20 mA requeridos por estos y el resto fluya por las cargas conectadas en paralelo.

Siendo estas las condiciones, la topología básica es la siguiente:



**Fig. 23.** Topología perfil de demanda.



Se requiere entonces calcular los valores de las resistencias para que la corriente consumida por este perfil esté entre los 133 y 250 mA. Dado que son 2 V y 20 mA fluirán por cada led, se calculan los valores de la siguiente forma:

$$\text{Resistencias en los leds: } \frac{V_{\text{cell}} - 1V}{20 \text{ mA}} = 50 \Omega \text{ donde } V_{\text{cell}} = 2V \quad (75)$$

$$R1 \text{ Para corriente de 133 mA: } \frac{2V}{133 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 26,54 \Omega \quad (76)$$

$$R3 \text{ Para corriente de 143 mA: } \frac{2V}{143 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 16,26 \Omega \quad (77)$$

$$R4 \text{ Para corriente de 154 mA: } \frac{2V}{154 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 14,92 \Omega \quad (78)$$

$$R5 \text{ Para corriente de 166 mA: } \frac{2V}{166 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 13,7 \Omega \quad (79)$$

$$R6 \text{ Para corriente de 182 mA: } \frac{2V}{182 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 12,34 \Omega \quad (80)$$

$$R7 \text{ Para corriente de 200 mA: } \frac{2V}{200 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 11,11 \Omega \quad (81)$$

$$R8 \text{ Para corriente de 222 mA: } \frac{2V}{222 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 9,9 \Omega \quad (82)$$

$$R9 \text{ Para corriente de 250 mA: } \frac{2V}{250 \text{ mA} - 20 \text{ mA}} = 8,7 \Omega \quad (83)$$

Cabe mencionar que 133 mA se representarán solo con un LED y con su respectiva resistencia en paralelo, hasta llegar a encender 8 leds para poder representar 250 mA.

Con esta demanda se garantiza el cambio de carga para poder comprobar el funcionamiento de la celda de combustible con controlador implementado. El circuito esquemático se encuentra adjunto en los anexos.

### c. Modelado e implementación del controlador PI:

Para diseñar la estrategia de control, es necesario realizar una identificación del sistema, obteniendo la respuesta de este último en malla abierta ante una entrada tipo paso. En la figura 24, se puede observar la respuesta del sistema:

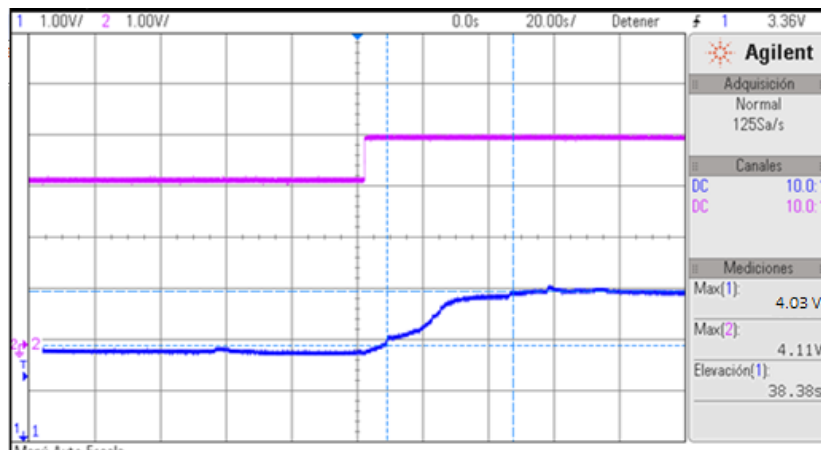


Fig. 24. Respuesta paso del sistema.

La entrada tipo paso (señal en morado) es de amplitud de 1 V, pasando de un voltaje inicial de 3V con corriente de 600 mA a uno final de 4.11 V con 4,2 A de corriente. La señal azul representa la respuesta del sistema en malla abierta. Con base en esta respuesta, se dedujo que es un sistema de primer orden más tiempo muerto. Esta respuesta concuerda con la expresión (28) desarrollada en el modelo eléctrico representado por una resistencia equivalente y un condensador. El tiempo muerto presente en la respuesta es consecuencia del tiempo en que se demora el gas en transportarse desde el electrolizador, a través de las mangueras hasta las celdas de combustible.

Con la respuesta obtenida anteriormente, se puede encontrar una expresión en Laplace que describirá el comportamiento de la planta en variables eléctricas; esta expresión describe un bloque que encierra todo el sistema cuya entrada es la señal de control que agrega la referencia al convertidor y la salida será el voltaje arrojado por la celda de combustible.

Se utilizó la configuración mostrada en la figura 26 conociendo de antemano que la respuesta paso del convertidor Buck es del orden de los milisegundos, al igual que el electrolizador. A pesar que este último es un dispositivo que realiza un proceso químico, se determinó que los cambios de flujo de hidrógeno responden en la misma escala de tiempo que el convertidor Buck. Por otro lado, la dinámica de la celda de combustible es del orden de los segundos, siendo más lenta que el conjunto convertidor-electrolizador. Debido a lo anterior y observando la respuesta paso, se puede concluir que la constante de tiempo de la gráfica corresponde exclusivamente a la dinámica de la celda, los cambios de voltajes en el convertidor y de flujo a la salida del electrolizador ocurren en el tiempo muerto presentado en la gráfica.

Con la respuesta mostrada en la figura 25, se realiza la posterior identificación de la planta:

$$K = 1,02 ; \tau = 22,5 \text{ s.} ; L = 2,5 \text{ s.} \quad (84)$$

$K$ : Ganancia de malla abierta [constante]

$\tau$ : Constante de tiempo del sistema [s]

$L$ : Tiempo Muerto [s]

Estos parámetros generan una función de transferencia descrita en la siguiente ecuación, donde la salida es el voltaje producido de la celda y la entrada es el voltaje de alimentación del electrolizador:

$$G(s) = \frac{1,03 \cdot e^{-2,5 \cdot s}}{22,5 \cdot s + 1} \quad (85)$$

El sistema posee otros parámetros, que se muestran a continuación:

$$ts = 5 \cdot \tau = 112,5 \text{ s.} ; tr = 90 \text{ s.} \quad (86)$$

El control implementado tendrá una estructura correspondiente a un controlador PI en paralelo no interactuante, mostrado en la figura 25:

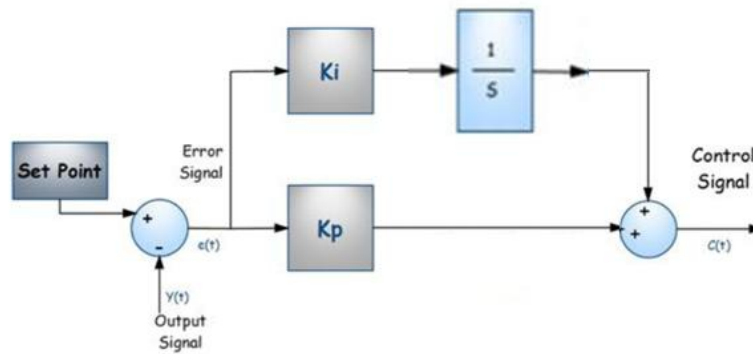


Fig. 25. Controlador PI en paralelo.

Al obtener un sistema de primer orden más tiempo muerto se deben tener en cuenta

- La presencia del tiempo muerto, tiende a reducir la ganancia última del sistema. Mediante la aproximación de Pade, se puede realizar una estimación de la ganancia y frecuencia ultimas del sistema con tiempo muerto; también, por medio de esta aproximación se puede utilizar el método aritmético para, posteriormente, diseñar el controlador con las especificaciones deseadas.
- Otro de los efectos del tiempo muerto se presenta en la respuesta en frecuencia del sistema.

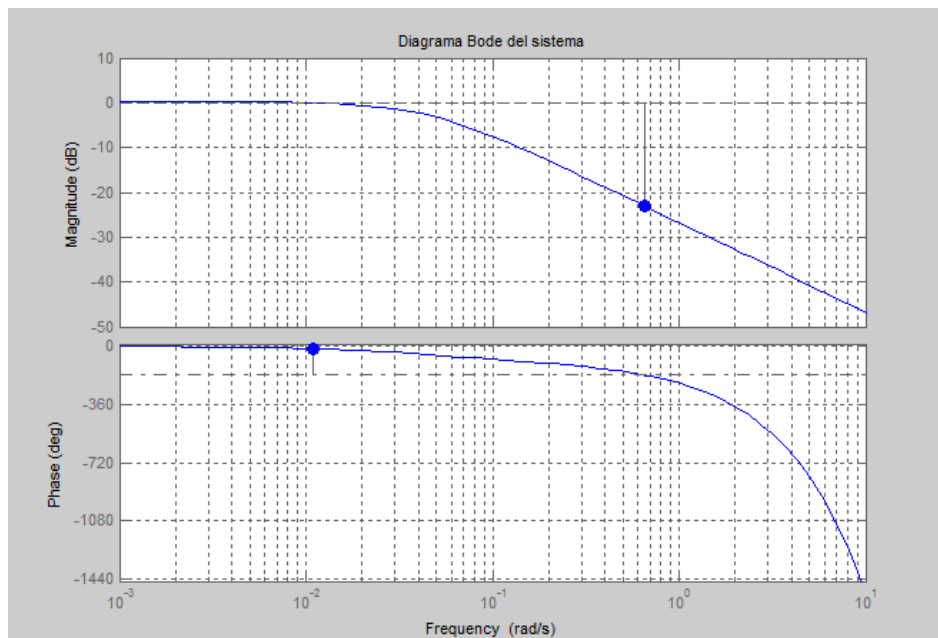
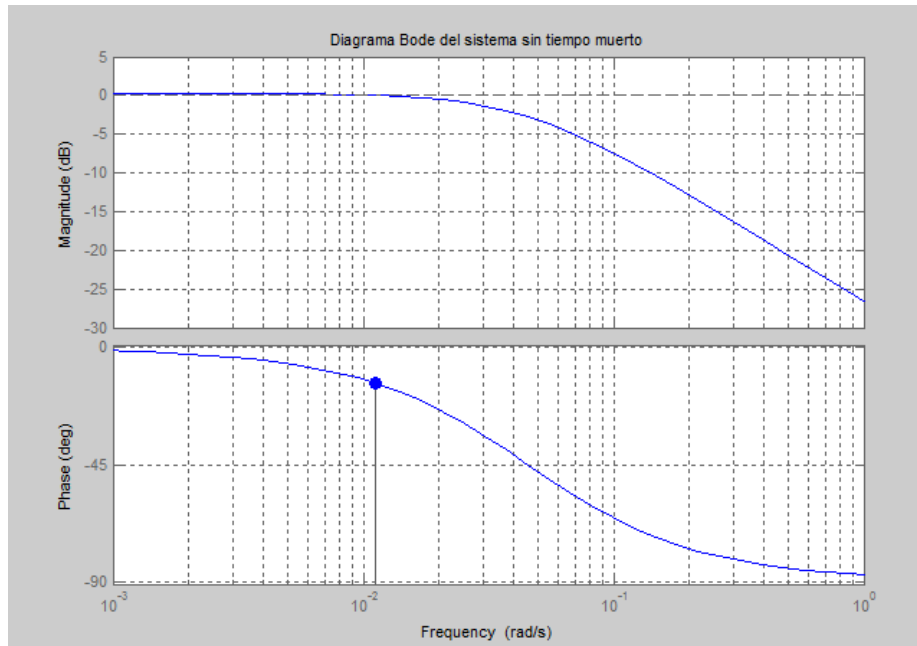


Fig. 26. Respuesta en frecuencia del sistema con tiempo muerto.

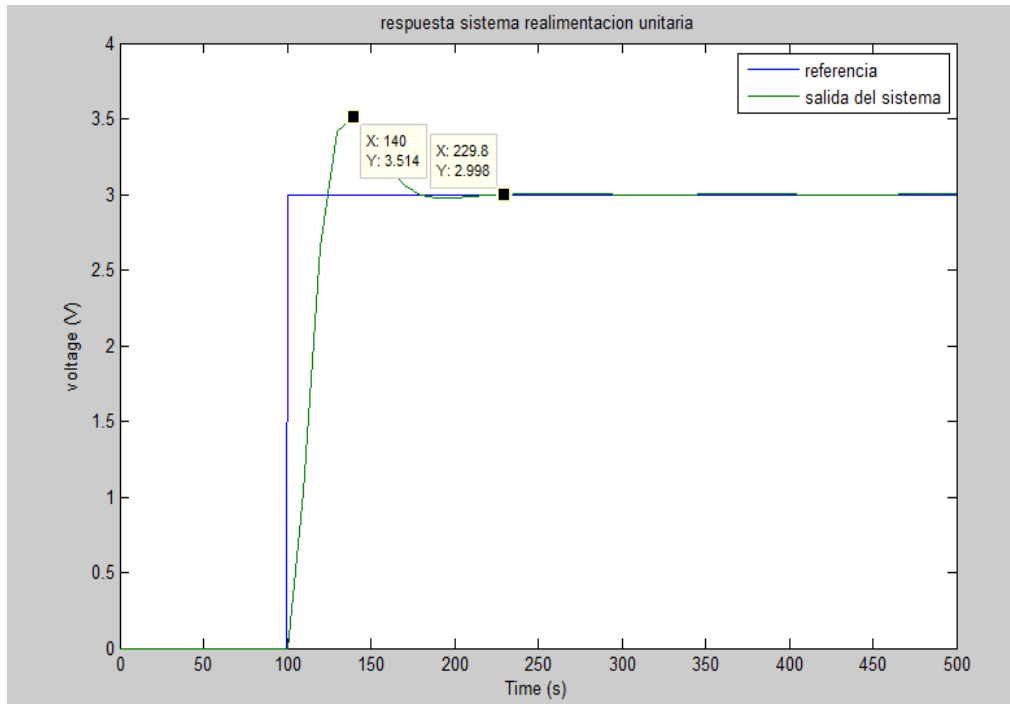


**Fig. 27.** Respuesta en frecuencia del sistema sin tiempo muerto.

En la Figuras 27 y 28 se ilustran las respuestas correspondientes al sistema con y sin tiempo muerto. El diagrama de bode presentado en la figura 28 presenta un margen de fase de 166 grados. Empieza desde cero grados a noventa grados aportados por el polo único de la planta. El sistema al ser de primer orden, no presenta márgenes de inestabilidad y no posee margen de ganancia. Por otro lado, la figura 27 presenta la respuesta en frecuencia del sistema al introducirle el tiempo muerto; Aunque el diagrama de magnitud no presenta cambios, el bode que muestra la fase del circuito sí presenta grandes diferencias con respecto al de la figura 28; en la figura 27 el diagrama de fase decae rápidamente mucho más allá de los 180 grados, introduciéndole un margen de ganancia al sistema de aproximadamente 30 decibeles. Debido a lo anterior si se utilizan controladores con ganancias grandes, se obtendrá como resultado un sistema realimentado inestable Así que el controlador que sea implementado tendrá ganancias suaves con el fin de que no se presente una acción integral agresiva [8].

Donde la dinámica es esencialmente de primer orden, un control PI es el adecuado, ya que al no tener acción derivativa, no hay riesgo de saturar el actuador ni tampoco hay amplificaciones de las señales de ruido [9].

Como punto de partida para diseñar el controlador, se obtuvo la respuesta del sistema con realimentación unitaria, simulada en matlab, la cual mostrará criterios de diseño tales como sobre pico porcentual y tiempo de establecimiento:



**Fig. 28.** Respuesta paso con realimentación unitaria

La figura muestra que dicho sobre pico es de aproximadamente 16% y el tiempo de establecimiento es de 229,8 s. Con base en esta respuesta, y teniendo en cuenta que un sobre pico en el sistema de celdas de combustible tiende a saturarlo, es necesario diseñar un controlador que elimine ese sobre pico, además de garantizar un tiempo de establecimiento más lento, para asegurar que el hidrógeno entra a las celdas paulatinamente y el sistema se comporte adecuadamente. Por lo tanto, se desea obtener una respuesta sobre amortiguada.

Entonces, los parámetros de diseño son los siguientes:

$$ts = 300 \text{ s.}; MP = 1 \% \text{ (87)}$$

Basados en el método matemático de diseño de controladores [8], es posible encontrar:

$$\omega = 0,016 ; \xi = 0,83 ; \alpha = 0,13 \text{ (88)}$$

La siguiente ecuación muestra la forma de un sistema realimentado:

$$M(s) = \frac{G_T(s)}{1+G_T(s) \cdot H(s)} \text{ (89)}$$

Donde

$$G_T(s) = G(s) \cdot C(s) \text{ (90)}$$

$$C(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s} \text{ (91)}$$

Usando la aproximación de pade, utilizada para sistemas de primer orden con tiempo muerto, se obtiene la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{1-1,25 \cdot s}{((1-1,25 \cdot s) \cdot (22,5 \cdot s+1))} \quad (92)$$

$$G_T(s) = \frac{(1-1,25 \cdot s) \cdot (K_p \cdot s + K_i)}{28,12 \cdot s^3 + 23,75 \cdot s^2 + s} \quad (93)$$

Cuyo polinomio característico es el siguiente:

$$P(s) = 28,12 \cdot s^3 + (23,75 - 1,25 \cdot K_p) \cdot s^2 + (K_p - 1,25 \cdot K_i) \cdot s + K_i \quad (94)$$

La anterior ecuación se iguala a la siguiente expresión:

$$P(s) = (s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2) \cdot (s + \alpha) \quad (95)$$

Donde  $\xi$ ,  $\omega_n$  and  $\alpha$  son valores conocidos.

Por lo tanto, las constantes del controlador son:

$$K_p = 0,13 ; K_i = 0,00224 \quad (96)$$

#### d. Implementación Controlador Labview:

La figura muestra la estructura utilizada en Labview para obtener la implementación del controlador:

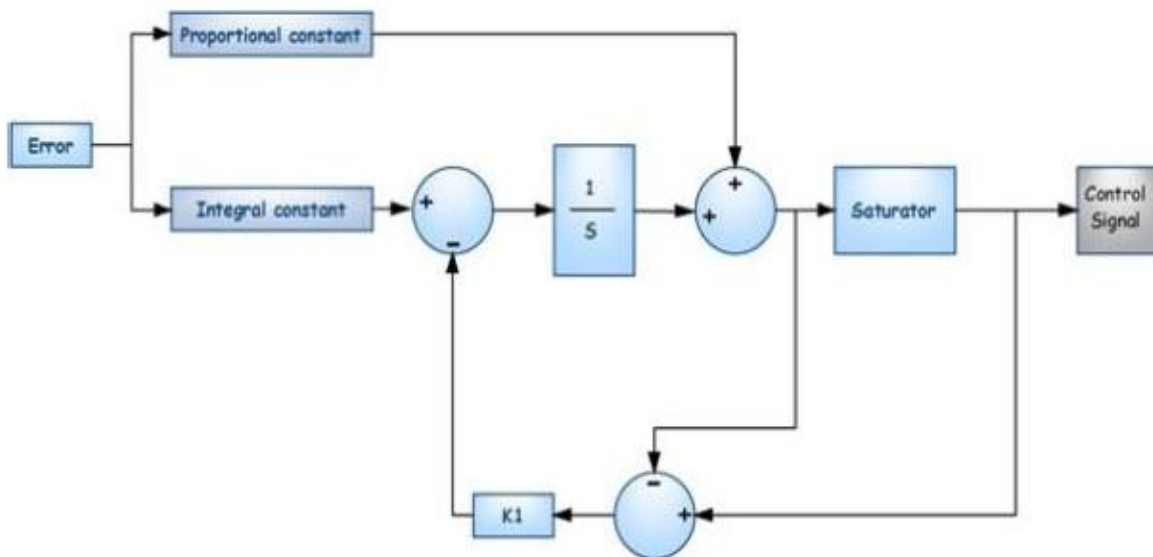
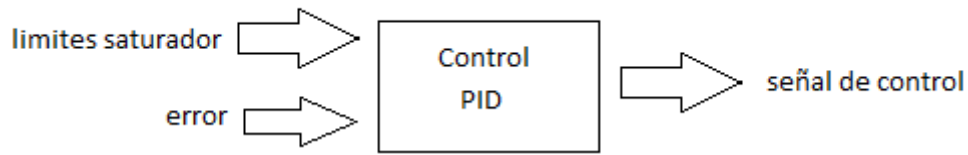


Fig. 29 Implementación Controlador.

Las entradas y salidas de este bloque se muestran a continuación:



**Fig. 30.** Entradas y salidas bloque PID.

En la figura 30 se puede observar que las señales de entrada del controlador son la señal de error y la señal del saturador y de salida la señal de control. Esta última será la referencia del convertidor Buck que regulará la producción de hidrógeno del electrolizador. Por otro lado también la señal de error viene de la diferencia existente entre la salida de la planta y el set point seleccionado. Dependiendo de la magnitud del error, el controlador generará la señal de control, con el objetivo de reducir el error existente entre las dos variables mencionadas anteriormente. La señal de control teóricamente, el valor necesario para cumplir su objetivo, pero si observamos las hojas de especificaciones del electrolizador, el cual tendrá un voltaje en su entrada dependiente de la señal de control arrojada por el controlador PID, dice que este voltaje de polarización debe estar entre el un rango de 0 V a 4.5 V. Es necesario proteger el actuador, para evitar daños en el sistema; para esto el controlador PID, posee un saturador el cual no permitirá que la señal de control sobrepase los valores estipulados por la entrada límites del saturador, como se puede observar en la figura 31.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, la señal de control debe estar dentro de unos límites preestablecidos. Si la señal alcanza estos límites, habrá saturación de la señal de control. Cuando la señal de control no se encuentra saturada, la realimentación extra que se encuentra encerrada en la figura 31 que es generada por la diferencia existente entre la señal de salida del controlador y la señal entrante a la planta, será cero y este lazo no existirá. Cuando Existe saturación, la señal de error será diferente a cero y el trayecto normal del lazo realimentado se interrumpe debido a que la señal que entra al proceso se encuentra en su valor saturado. En este caso, el lazo de realimentación extra cumple la función de llevar la salida del integrador a un valor tal que el error se vuelva cero. La tasa a la que el controlador es puesta en reset, está gobernada por la ganancia del lazo de realimentación de terminada por  $K=1/T_i$ , donde  $T_i$  es la constante de tiempo que determina que tan rápido es puesta en reset la señal integral. Esta constante se le conoce como “constante de tiempo de seguimiento”.

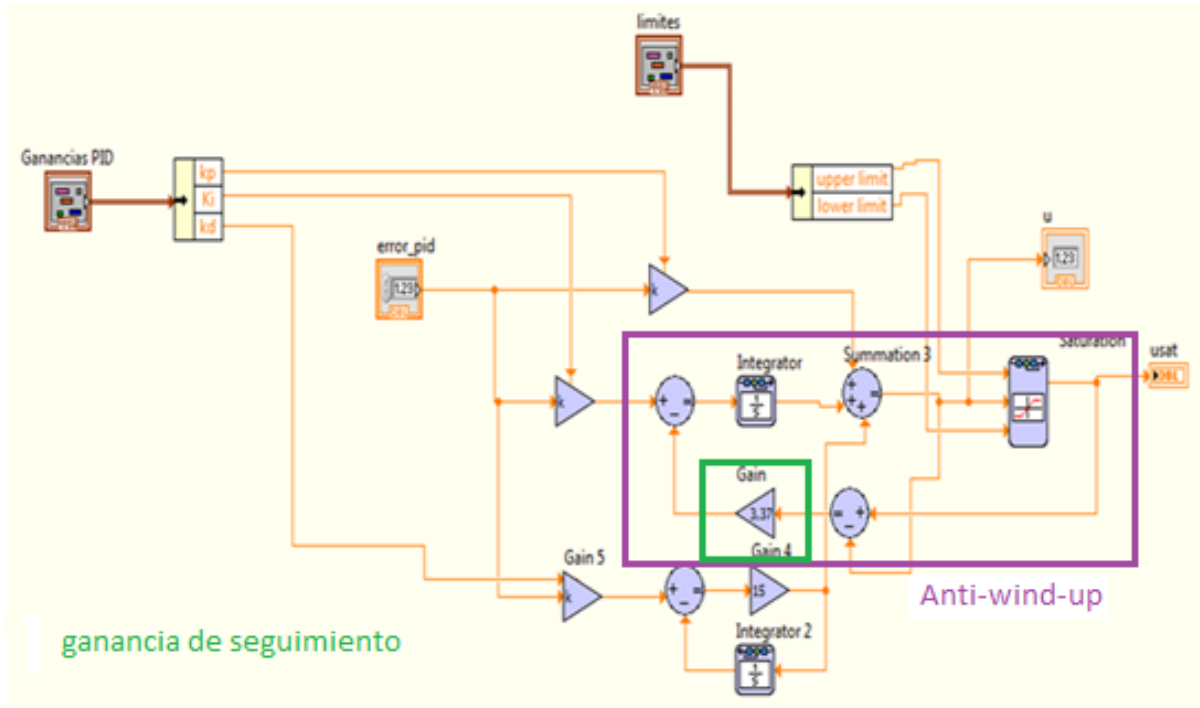


Fig. 31. Anti-wind up.

#### e. Implementación Interfaz Gráfica:

La interfaz gráfica se diseñó con el fin de permitirle al usuario la interacción con el sistema, sin afectar el correcto funcionamiento de este, además de presentar el monitoreo de las variables eléctricas que intervinieron en el proceso.

Con el fin de mostrar el funcionamiento del sistema, la interfaz se dividió en dos partes:

- En la primera parte se podrá encontrar la interfaz del sistema cuando se encuentra en “modo malla abierta”. Fue necesario implementar este modelo para poder arrancar el sistema de manera manual como se especifica en el protocolo de funcionamiento del sistema. Se trabajará en este modo hasta que el nivel en el tanque de almacenamiento sea el indicado para que la celda pueda comenzar a funcionar:



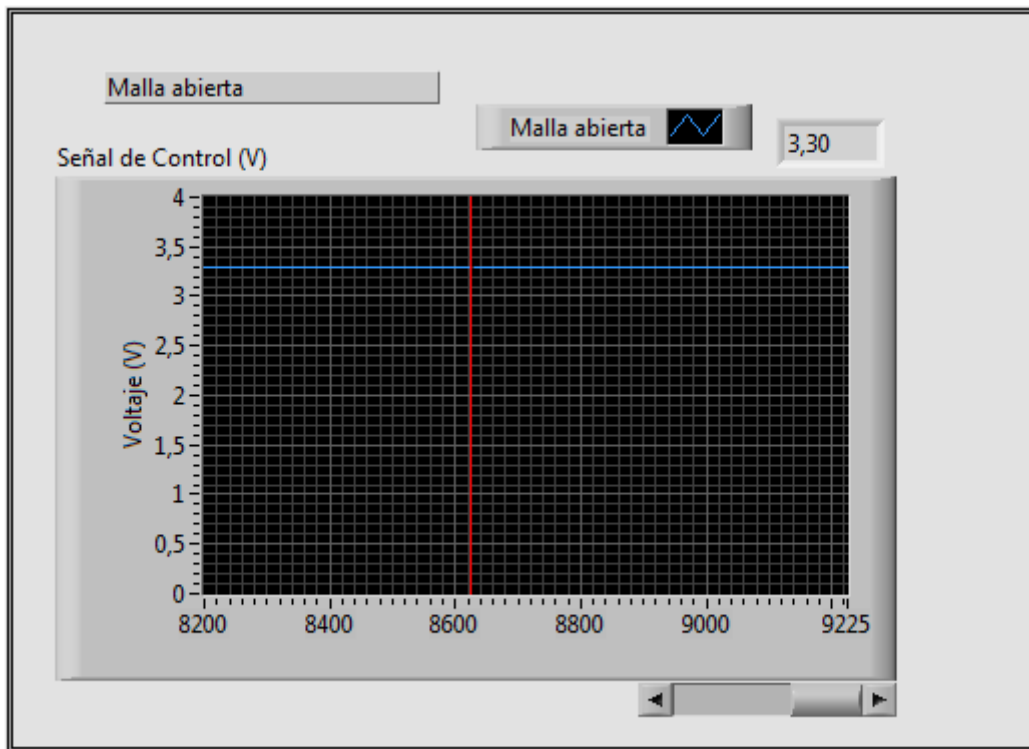


Fig. 32. Interfaz en malla abierta.

En la figura 32 se observa la señal de control, la cual actúa como el voltaje de referencia del convertidor DC-DC. Esta señal es la que determina la polarización del electrolizador, el cual, en modo malla abierta, tiene la función de llenar el tanque de almacenamiento. Asimismo se definirá el parámetro “set point” en el panel de malla cerrada en un valor igual a 3.3 V para garantizar el encendido del electrolizador.

- Después de llenar el tanque de almacenamiento hasta el nivel adecuado, la interfaz se cambiará a modo “malla cerrada”. En la figura 33 se puede observar la interfaz en este modo de funcionamiento. la descripción de cada componente se puede encontrar a continuación:
  - a. Bloque Parámetros controlador: Le permite al usuario ingresar las constantes del controlador en la sección “Ganancias PID”. La sección que limita la señal de control es un parámetro necesario en todo tipo de controlador con el fin de proteger el actuador frente a altos voltajes que pueden ser accidentalmente generados en la señal de control. Por último, en este bloque también se puede ingresar el set point del sistema, para poder iniciar el proceso de control.
  - b. La sección conocida como visualización y adquisición de señales, le permite al usuario ver el fenómeno transitorio de la salida ante cambios en el Set-point o disturbios en la carga; También permite visualizar el comportamiento transitorio de la señal de control, que es, como se mencionó anteriormente, el voltaje de polarización del electrolizador.
  - c. En la interfaz también se pueden encontrar parámetros tales como la tasa de muestreo, la cual le permite al usuario variar la frecuencia a la cual la gráfica mostrará los datos adquiridos. Debido a la dinámica del proceso, se configuró para que el sistema adquiera un dato por segundo. El control de mando también permite escoger la opción entre malla abierta y malla cerrada con el fin de facilitar el intercambio entre modos de funcionamiento.

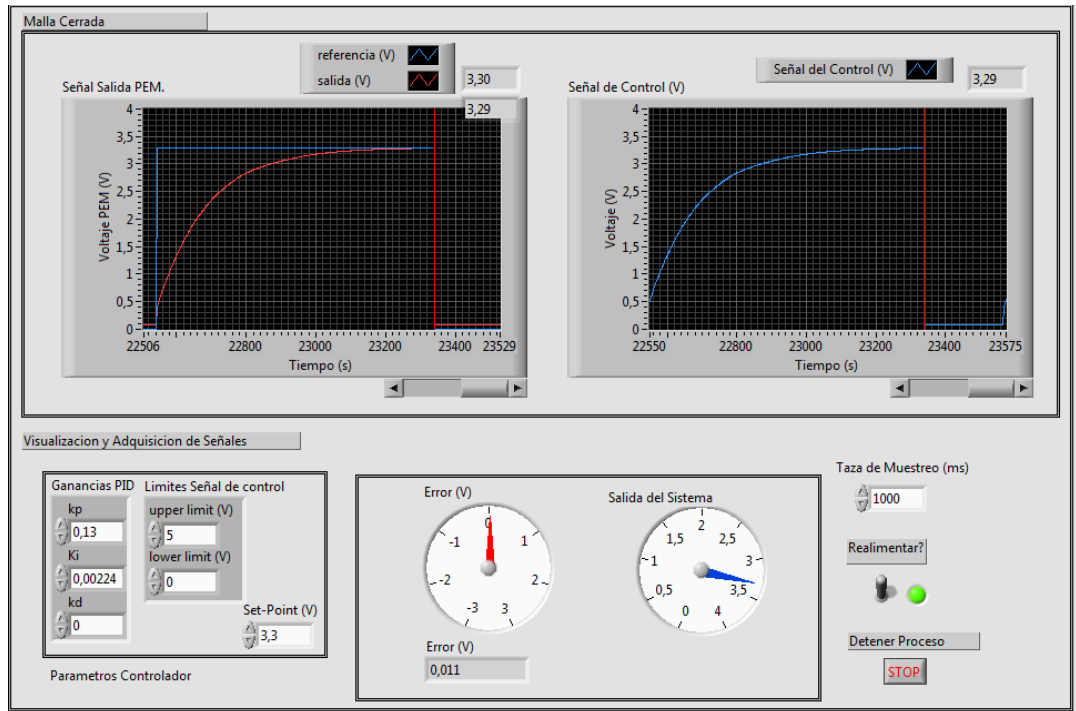


Fig. 33. Interfaz en malla cerrada.

#### f. Modelo e Implementación Convertidor Buck:

El desarrollo matemático mostrado anteriormente, fue implementado en el programa simulink con el fin de diseñar un controlador que le permita al convertidor seguir la señal de referencia asignada.

Se realizaron comparaciones del modelo de señal pequeña, con el circuito implementado con pérdidas; El convertidor Buck tiene la función de regular la producción de hidrógeno en el electrolizador, así que su respuesta debe ser sobre-amortiguada. La respuesta obtenida en el modelo de pequeña señal es la siguiente:

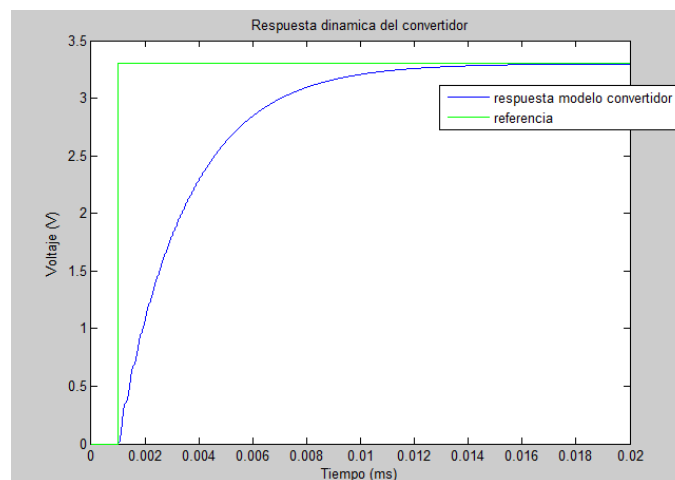
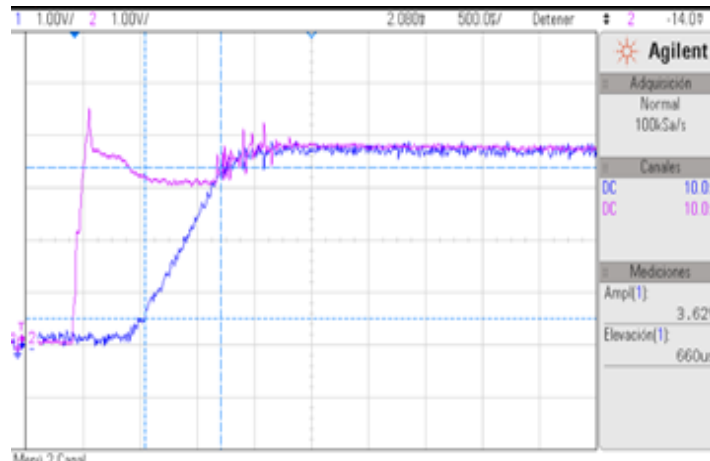


Fig. 34. Resultados simulación modelo buck.

Se puede observar que la señal es sobre-amortiguada con un tiempo de estabilización aproximado de 18 us. En la Figura 35 se puede observar la respuesta del circuito:



**Fig. 35.** Respuesta paso convertidor.

Se puede determinar que el tiempo de subida es de 1750 us. Al 63% del total del tiempo es 1106 us; aproximadamente, el tiempo de estabilización ante un paso de amplitud de 3.62 V es de aproximadamente de 10 ms, comportándose un poco más rápido que el modelo para este caso; esto se debe a el modelo es un modelo planteado sin perdidas de ningún tipo; por otro lado, el convertidor implementado, posee perdidas por conducción en cada componente y caminos de cobre y perdidas por conmutación de los componentes no lineales. Por otro lado, el modelo en pequeña señal tampoco tiene en cuenta el rizado del voltaje a la salida, el cual se puede observar en la figura 35.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

La automatización del suministro de hidrógeno del sistema de celdas de combustible necesita de un reconocimiento previo, con el fin de poder, en cierta medida, predecir resultados que ayudaran a alcanzar los objetivos propuestos desde el principio. Así, fue necesario realizar modelos y simulaciones que se presentan a continuación.

### a. Modelo estático de las celdas de combustible:

Teniendo en cuenta la teoría de celdas de combustible enunciada en el marco teórico, y teniendo en cuenta las ecuaciones (19), (20), (21), (22) y (23) se implementó un modelo en diagrama de bloques utilizando la herramienta SIMULINK. La estructura generada es la siguiente:

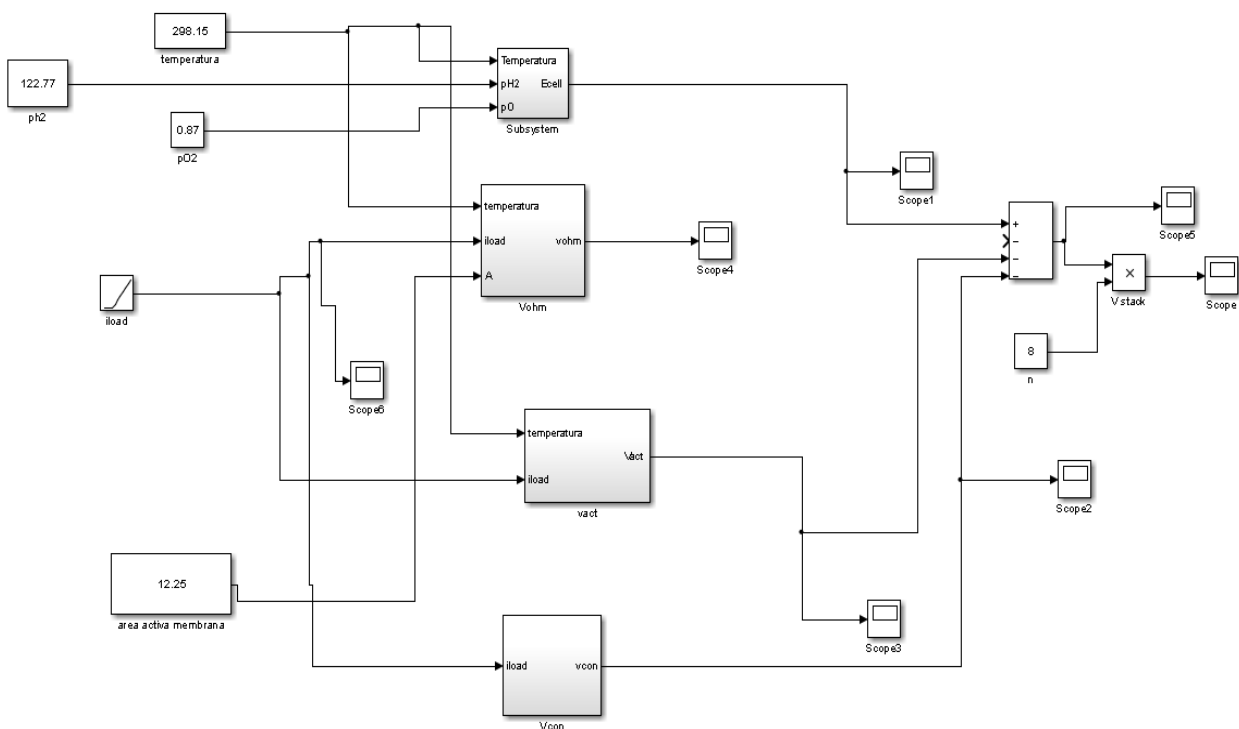


Fig. 36. Estructura diagrama de bloques en simulink modelo estático.

Se puede observar que el modelo contempla cinco posibles parámetros de entrada, los cuales son:

Presión del oxígeno, área de la PEM, temperatura, Presión del Hidrógeno y corriente de operación de la celda. Los primeros tres parámetros se asumen constantes por distintas razones. Por ejemplo, la temperatura se puede considerar constante, ya que, al ser un dispositivo de baja potencia, este valor no presenta cambios importantes en su magnitud. Igual sucede con la presión y temperatura del oxígeno; por un lado la presión tiene este comportamiento ya que esta ingresa de manera libre a la planta y por otro lado la temperatura, no presenta cambios, ya que es en un ambiente de laboratorio en donde la temperatura es relativamente constante.

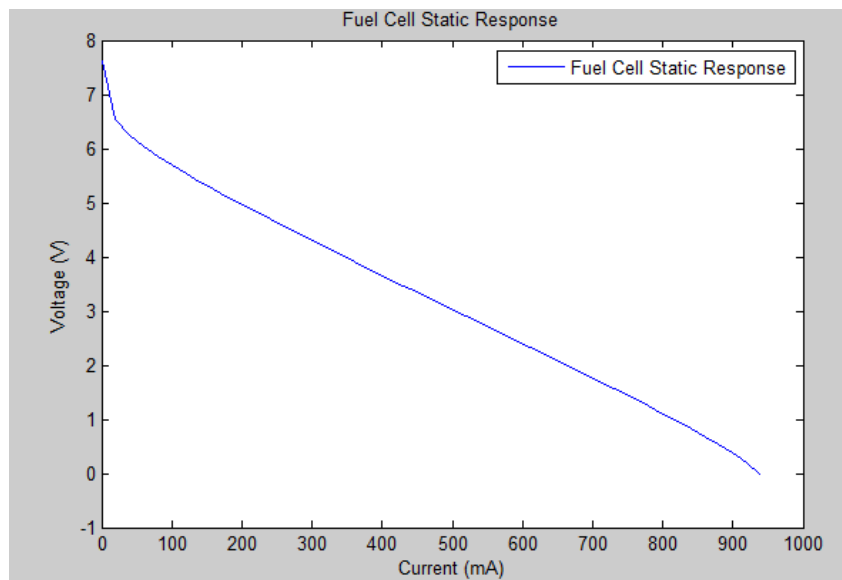
La presión del hidrógeno no es posible asumirla constante, debido a que proviene del electrolizador, el cual, a su vez, depende de la energía eléctrica que este consume. Cuando esta energía, representada en variables de

corriente y voltaje aumenta, también lo hace el flujo de hidrógeno entrante a la celda. La potencia entrante al electrolizador, la presión y el flujo del hidrógeno se pueden relacionar por medio de la siguiente expresión:

$$P_{H_2}[Pa] = \frac{p[W]}{\varphi\left[\frac{m^3}{s}\right]} \quad (97)$$

Entonces, la presión del hidrógeno depende necesariamente del flujo cambiante gracias a la energía eléctrica entrante al electrolizador.

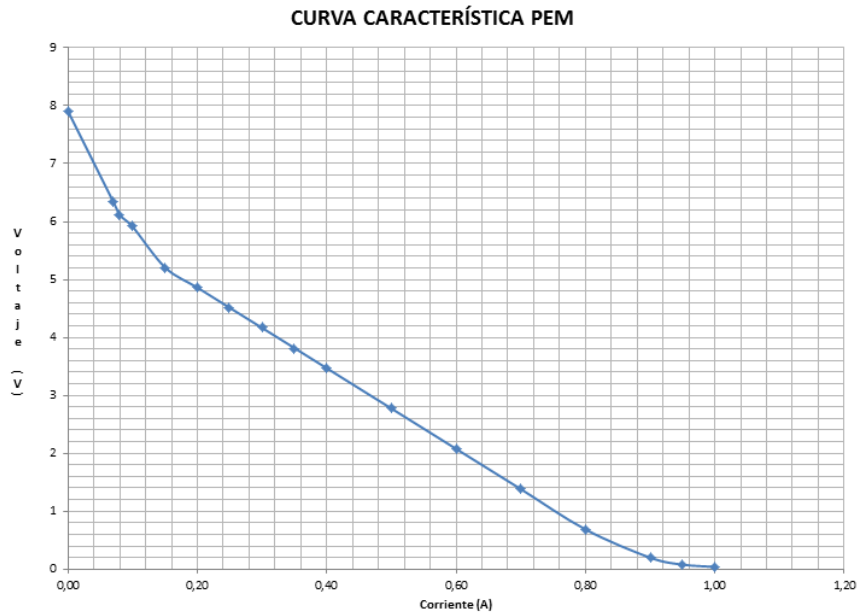
En cuanto al valor de la corriente de operación de la celda, con base en caracterizaciones del sistema que se mostrarán más adelante, se simuló una rampa que va desde 0 A hasta 1 A, que es el máximo valor entregado por el sistema utilizado. Con la rampa de corriente, se puede generar una gráfica de corriente contra voltaje, el cual es el objetivo de haber implementado la anterior estructura:



**Fig. 37.** Resultado simulación modelo estático.

Comparando esta gráfica con la figura 5, se puede observar que la tendencia se conserva. Es decir, el modelo implementado con SIMULINK tiene correspondencia con lo planteado teóricamente.

Se puede observar que, con 10 celdas de combustible conectadas en serie, cada una de 0,8 V en condiciones de circuito abierto (Corriente cero), se esperaría un voltaje total de 8 V. La simulación presenta un voltaje máximo de aproximadamente 7,5 V en este punto. Esta celda de combustible puede entregar una corriente máxima de 1 A en condiciones de corto circuito (Voltaje cero). La simulación muestra un valor de aproximadamente 995 mA en este punto. Para Corroborar el resultado anterior, a continuación se presenta la siguiente gráfica, obtenida luego de caracterizar el sistema con el fin de poder analizar su comportamiento. La tabla correspondiente se presenta en los anexos:



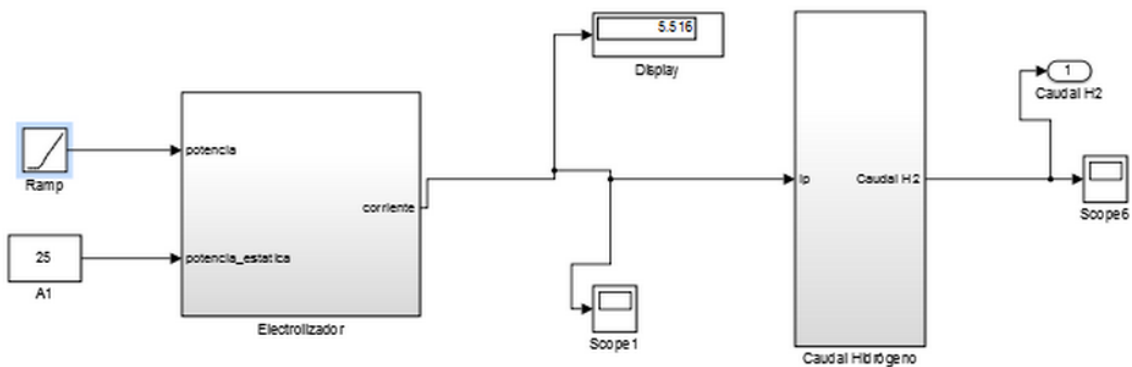
**Fig. 38.** Caracterización modelo estático PEM.

Se puede observar en la gráfica que, en condiciones de circuito abierto, el voltaje es de 7,9 V mientras que en condiciones de corto circuito, el cual no es absolutamente cero debido a un pequeño remanente de hidrógeno en la celda, la corriente es de 1 A. La correspondencia de los valores y la tendencia entre la gráfica de caracterización con el modelo en SIMULINK demuestran que el modelo fue implementado correctamente, soportando así la parte teórica con procesos experimentales. Las demás curvas correspondientes a diferentes puntos de operación del electrolizador se podrán encontrar en los anexos del documento.

Las diferencias existentes entre el modelo estático teórico y experimental se deben a fenómenos cinéticos y termodinámicos no lineales que no son tenidos en cuenta en el modelo desarrollado.

**b. Modelo del electrolizador:**

Con ayuda del software SIMULINK, fue implementado un modelo característico del electrolizador, el cual está basado en las ecuaciones (5-18) que constituyen la siguiente estructura:



**Fig. 39.** Diagrama de bloques simulink modelo electrolizador.

Estos bloques son subsistemas, cuya estructura interna se muestra a continuación:

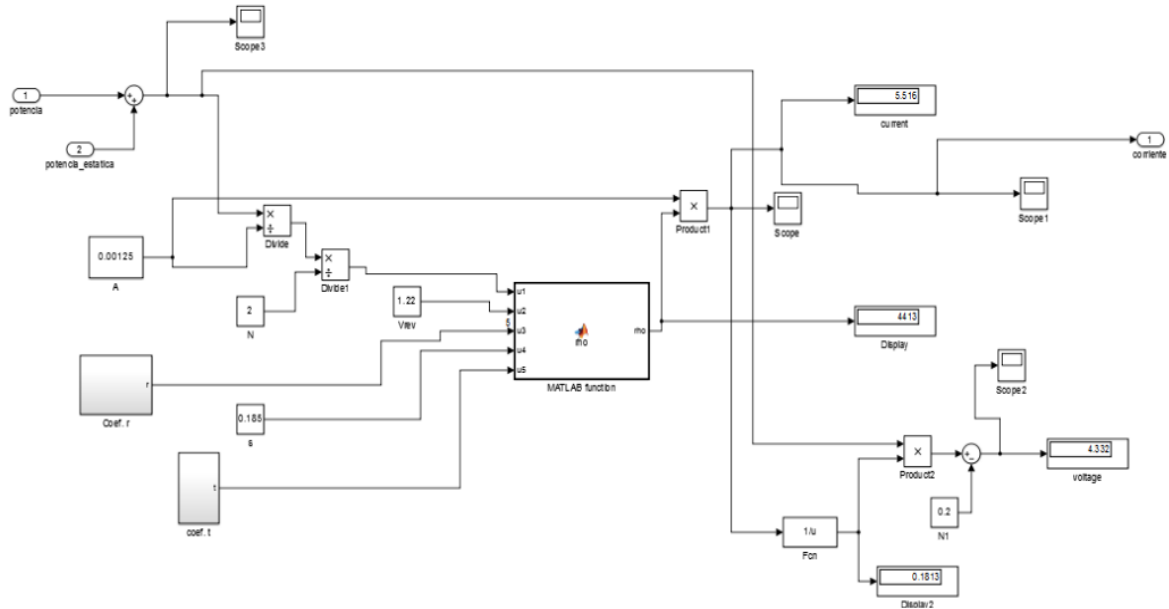


Fig. 40. Subsistema modelo eléctrico electrolizador.

La figura anterior describe el modelamiento de la parte eléctrica, basada en las ecuaciones (5-9).

El subsistema del caudal de hidrógeno contiene la siguiente estructura, la cual está basada en la ecuación (11):

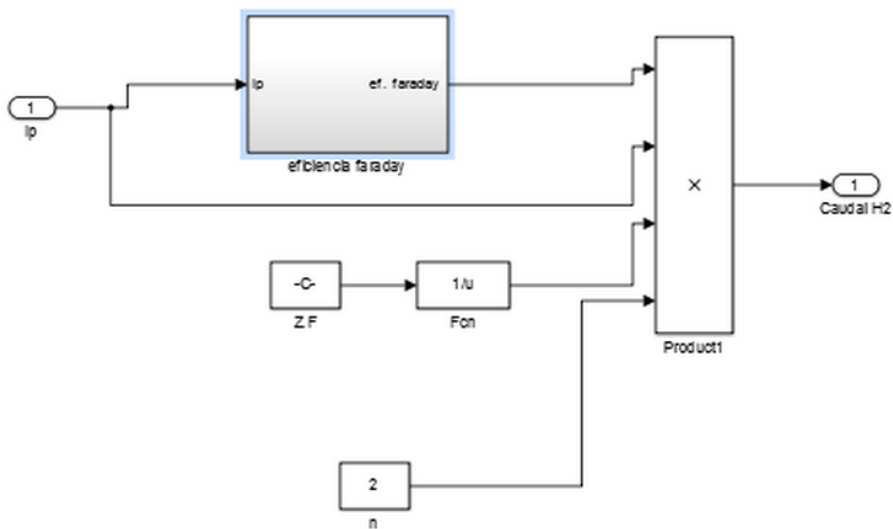
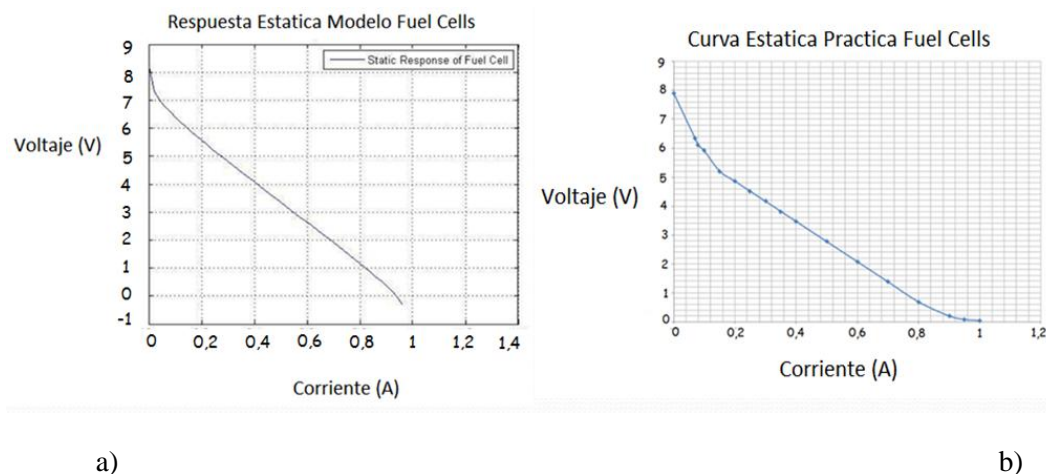


Fig. 41. Subsistema Caudal de hidrógeno electrolizador.

La potencia eléctrica es la entrada principal del sistema, simulándola como una rampa para poder generar en la gráfica de flujo y voltaje, un valor proporcional en el eje del tiempo. El modelo eléctrico, el cual es el responsable de generar la variable de voltaje y corriente del electrolizador, posee un bloque funcional, en el cual se implementó el método de Newton [11] con el objetivo de obtener mayor exactitud en las respuestas de la simulación.

Como parte del análisis del comportamiento del dispositivo, las siguientes figuras muestran la respuesta simulada y su contraparte caracterizada:



**Fig. 42.** Curvas características de potencia contra voltaje electrolizador.

La caracterización del electrolizador se realizó variando el voltaje de entrada al dispositivo y midiendo la corriente consumida por este. Para la gráfica de la derecha, la tabla correspondiente se encuentra en los anexos.

Antes de que el electrolizador llegue al voltaje de encendido, el consumo de corriente es mínimo, luego la potencia es pequeña. A medida que ese consumo aumenta, lo hará también el voltaje, debido a que el dispositivo se encuentra encendido y se le está pidiendo que genere más hidrógeno.

A continuación se presenta la tendencia del flujo producido por el electrolizador, dependiendo del cambio de potencia y de corriente en el mismo:



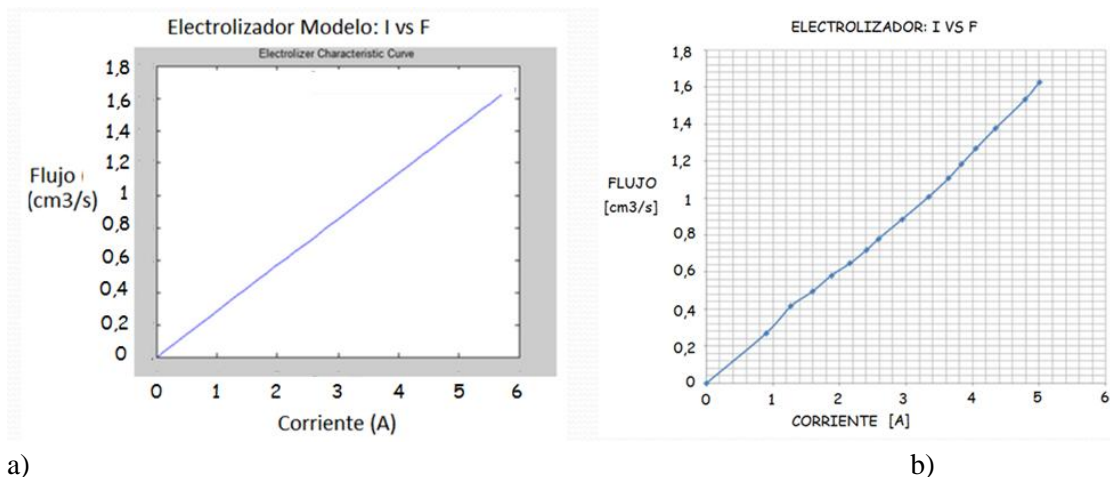


Fig. 43. Curvas características de potencia contra flujo de hidrógeno electrolizador.

La caracterización del flujo producido por el electrolizador se obtuvo llenando un tanque de almacenamiento de 80 cm<sup>3</sup> de volumen total, variando el voltaje de entrada del electrolizador. Se midió el tiempo en el cual el tanque se llenaba de 0 a 10 cm<sup>3</sup>, luego de 0 a 20 cm<sup>3</sup> y así sucesivamente, hasta llegar a 80 cm<sup>3</sup>. Se encontró la pendiente de esta tendencia lineal, la cual resulta siendo el flujo producido por el dispositivo, haciendo este procedimiento por cada cambio de voltaje. Este flujo se comparó con la potencia correspondiente y así se generaron las gráficas de la derecha.

Se puede observar que, tanto en la caracterización como en la simulación, la tendencia del flujo es lineal de pendiente positiva, lo cual permite corroborar, que a medida que aumenta la potencia de entrada al electrolizador, o en términos generales, la energía eléctrica, así mismo aumentará el flujo de hidrógeno producido.

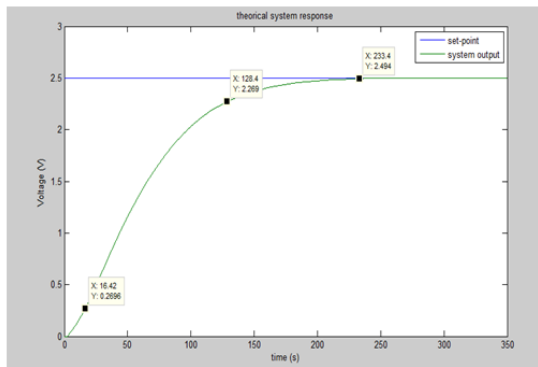
Las diferencias entre la simulación y la caracterización son mínimas, y se presentan ya que el modelo teórico nos permite realizar estimados de los valores, dado un valor de entrada único: energía eléctrica. Por otro parte, para las medidas experimentales, se tienen muchos más factores a considerar ya que la energía eléctrica entrante al dispositivo tiende a variar en algunas ocasiones debido a que la reacción química no utiliza siempre la misma cantidad de energía para producir la misma cantidad de hidrógeno. Aun así se puede determinar gracias a la tendencia de las gráficas obtenidas y a un error cuadrático cercano a la unidad, la validez del modelo implementado en simulink con la dinámica propia del dispositivo generador de hidrógeno.

### c. Respuesta del sistema con controlador:

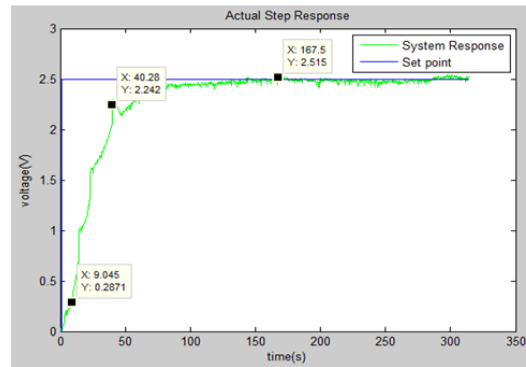
Los resultados mostrados a continuación corresponden a la validación del controlador implementado:

- **Set Point Variable según el valor de la carga resistiva:**

Dados los criterios de diseño del controlador PI, se obtuvieron las siguientes simulaciones, contrastadas con los resultados obtenidos en la implementación:



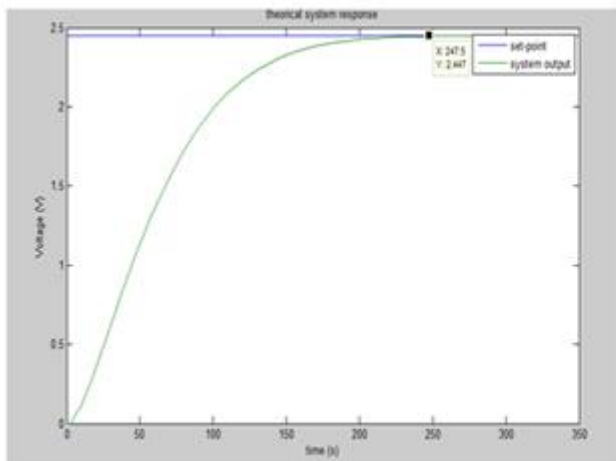
a)



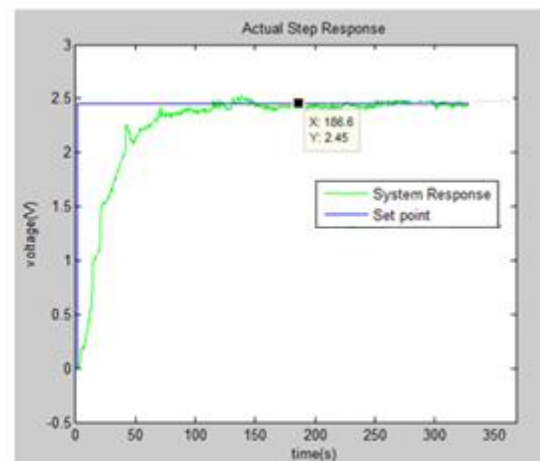
b)

**Fig. 44.** Respuesta paso del sistema con set point 2,5 V.

La figura anterior muestra el sistema respondiendo ante una entrada paso de 0 a 2,5 V. Esta respuesta se obtuvo con una carga resistiva de 15  $\Omega$ , la cual hace que el sistema sea capaz de llegar a un voltaje máximo de 2,5 V. Con base en la gráfica de la figura 23, esta carga se presenta como la más estable, ya que no registra cambios importantes de corriente consumida frente a los cambios de hidrógeno en la entrada. Es por eso, que su respuesta parece ser mucho más estable y más parecida a la respuesta ideal; y es por esta misma razón que el tiempo de establecimiento es mucho más rápido de lo esperado (167,5 s frente a 233,4 s de la simulación), debido a que es una condición óptima de funcionamiento del sistema.



a)

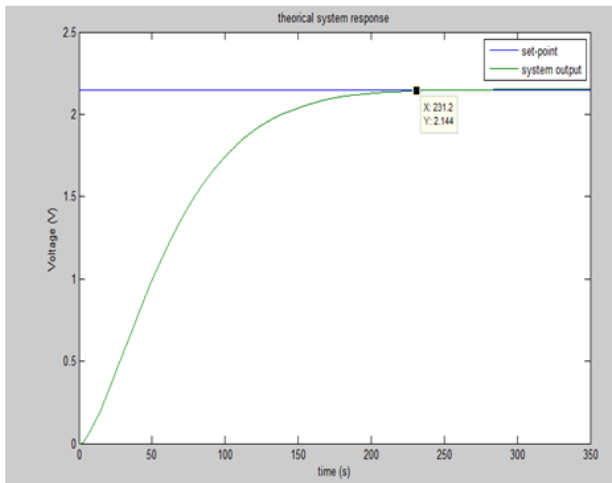


b)

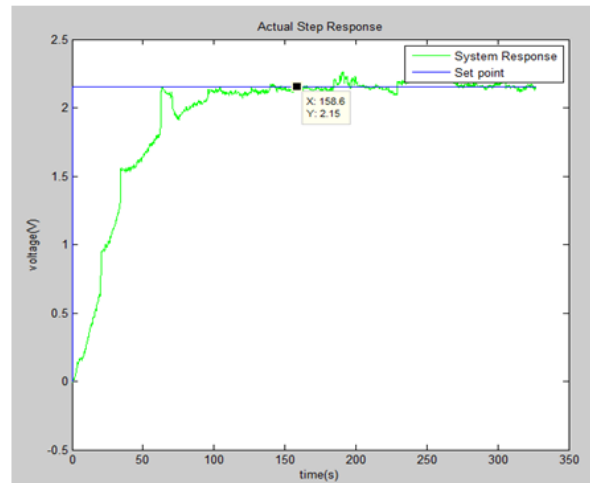
**Fig. 45.** Respuesta paso del sistema con set point de 2,45 V.

La respuesta de la figura anterior se da en condiciones de carga de 13 ohms, la cual fuerza al sistema a llegar a un máximo de 2,45 V. En este punto, la respuesta sigue siendo muy parecida a lo esperado, salvo unas pequeñas perturbaciones presentadas a los 50 segundos de transcurrido el proceso. Aun así se conserva el hecho de que la respuesta real del sistema es mucho más rápida de lo esperado, estableciéndose en 186,6 s

cuando en la simulación, el sistema aparentemente en esta ocasión tuvo un tiempo de establecimiento de 247,5 s.



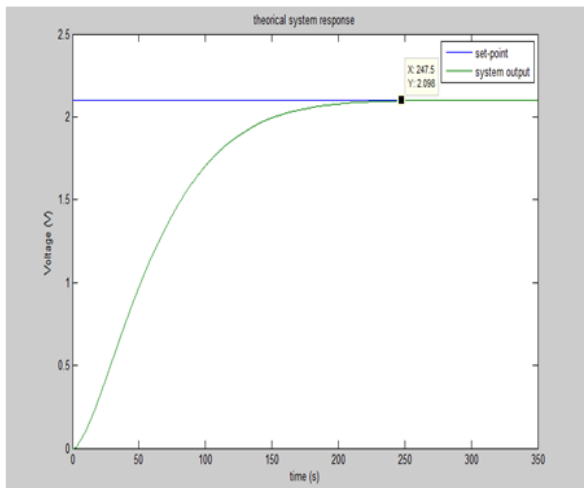
a)



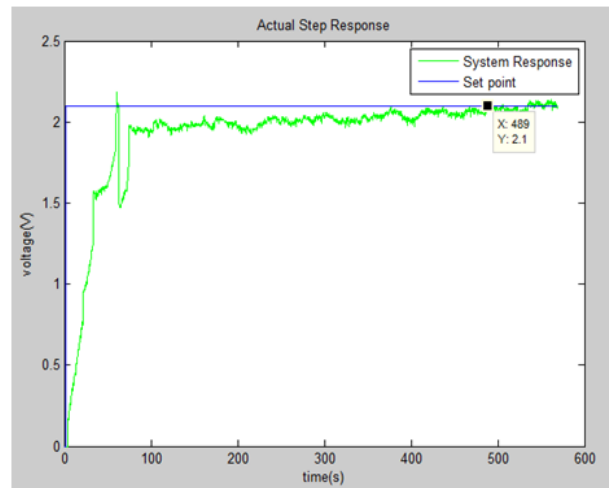
b)

**Fig. 46.** Respuesta paso del sistema con set point de 2,15 V.

La figura anterior muestra la respuesta del sistema con una carga resistiva de 10 ohms, la cual permite que el sistema llegue a 2,15 V como máximo valor. Bajo estas condiciones, el sistema posee perturbaciones más acentuadas a lo largo del proceso, debido a que se va acercando cada vez más al punto crítico de la región de operación de concentración que se da en los 7 ohms. Se sigue conservando la dinámica rápida de respuesta, situando el tiempo de establecimiento en 158,6 s frente a un tiempo de establecimiento de 231,2 s en la simulación.



a)



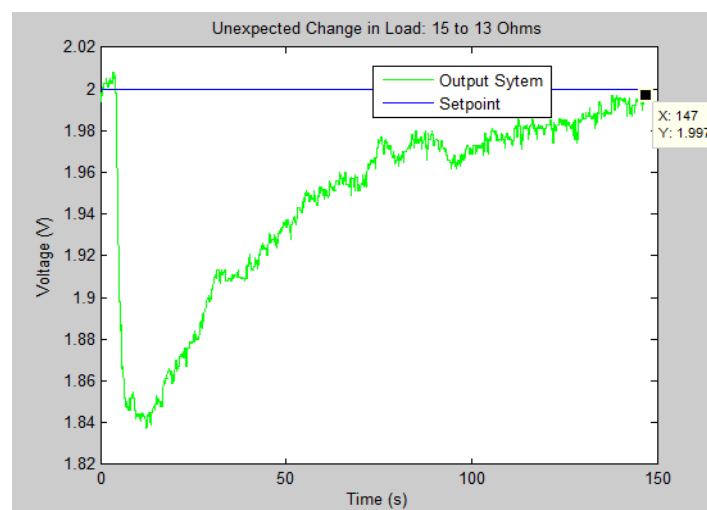
b)

**Fig. 47.** Respuesta paso del sistema con set point de 2,11 V.

La figura anterior muestra la respuesta frente a la condición de operación más crítica, es decir, cuando la resistencia de carga es de 7 ohms. La respuesta evidencia perturbaciones más acentuadas a lo largo del proceso, además de poseer dificultades a la hora de llegar a establecerse en la referencia requerida. Es la única condición donde el tiempo de establecimiento es mucho más lento que el esperado, situándose en los 489 s frente a 247,5 s de respuesta simulada.

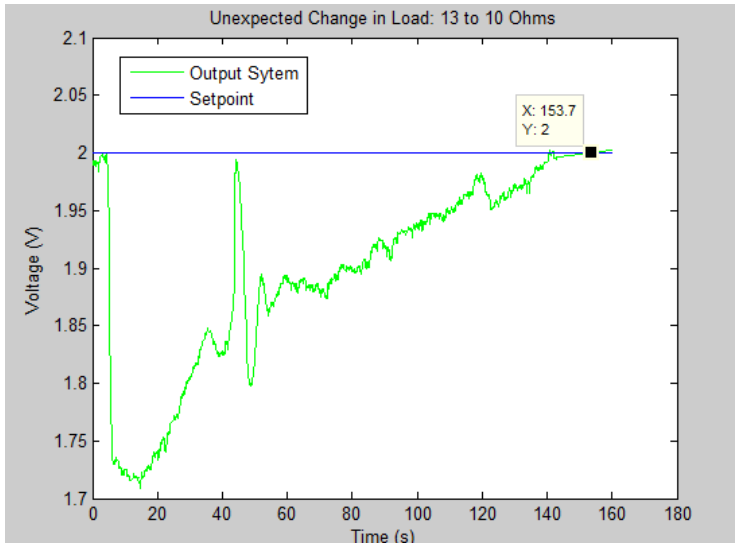
- **Set point fijo con disturbios en la carga:**

Se definió un set point fijo de 2 V, para garantizar que, sin importar la demanda de energía, el sistema fuera capaz de llegar a este punto de voltaje. Se realizaron cambios de carga para verificar que el controlador actuara y llevara al sistema a la referencia requerida. Los resultados se presentan a continuación:



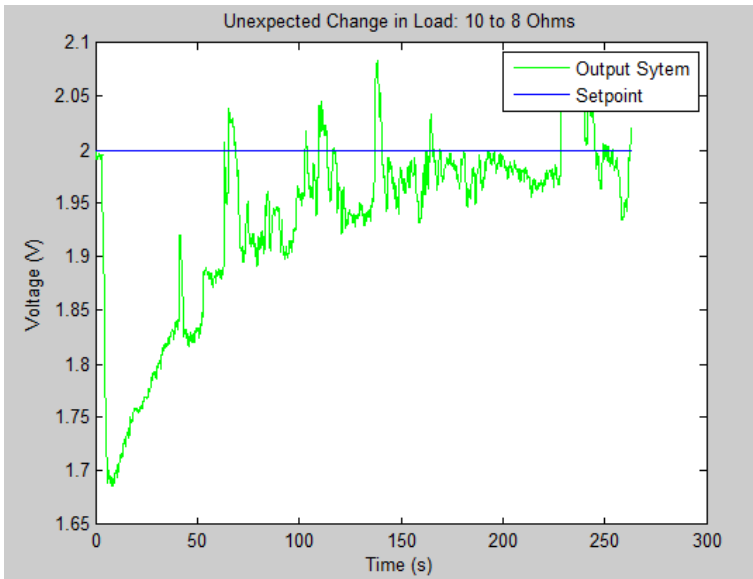
**Fig. 48.** Respuesta paso a disturbio en la carga 15 a 13  $\Omega$ .

Este disturbio se dio entre los valores de carga más estables del rango de operación, los cuales van desde los 15 a los 13 ohms. Se observa que al presentarse el disturbio, hay una caída en el potencial de la carga de aproximadamente 0,16 V para luego, por medio del controlador, llegar al punto de referencia estipulado en 147 s. Nótese que, desde el momento en que el voltaje de salida comienza el proceso para llegar a 2 V, la respuesta sigue siendo de primer orden, con algunos pequeños disturbios propios de la dinámica química de la celda.



**Fig. 49.** Respuesta paso a disturbio en la carga 13 a 10  $\Omega$ .

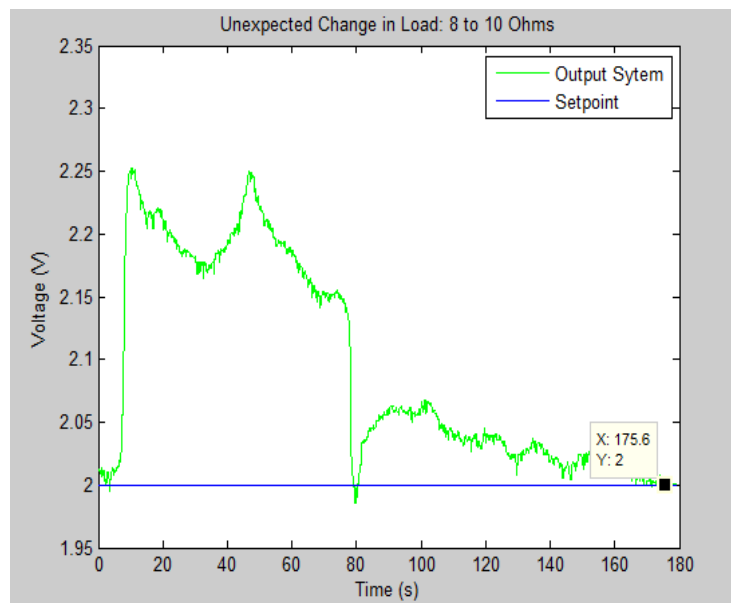
En la figura anterior, se observa la respuesta cuando el disturbio se presenta entre los 13 y los 10 ohms de carga. Bajo esta condición, las perturbaciones son más pronunciadas, ya que, al estar tan cerca del límite de operación estipulado, es más difícil para el sistema establecerse sin presentar cambios bruscos. Aun así, se sigue la tendencia de ser una respuesta sobre amortiguada.



**Fig. 50** Respuesta paso a disturbio en la carga 10 a 8  $\Omega$

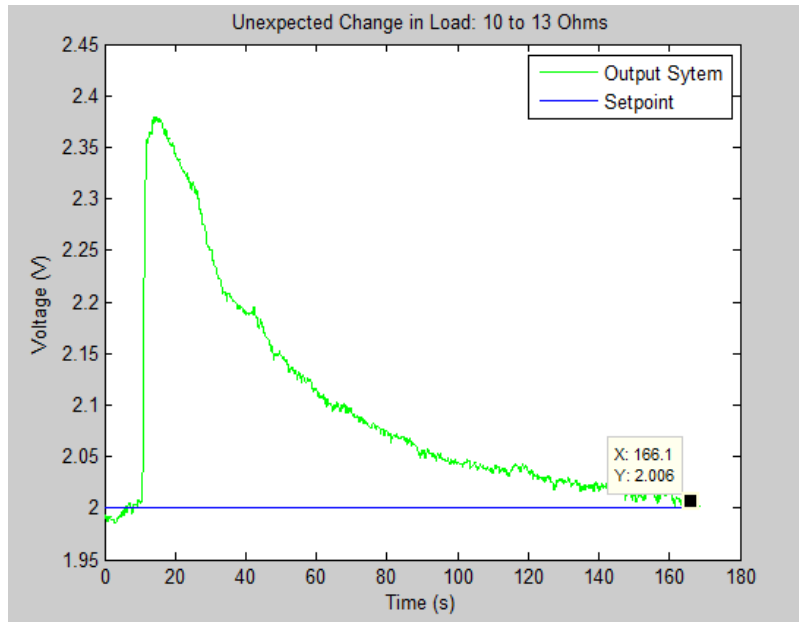
La figura corresponde a la respuesta del sistema cuando el disturbio se da entre los 10 y los 8 ohms. Como es de esperarse, al sistema le cuesta establecerse en la referencia, debido a que el valor de carga está en el límite del rango de operación. Esa dificultad para estabilizarse, se evidencia en las perturbaciones presentadas a lo largo del proceso, siendo cada vez más pronunciadas y más recurrentes. Finalmente se logra establecer en aproximadamente 270 s siendo nuevamente, el mayor tiempo de establecimiento entre todas las condiciones.

A pesar de lo anteriormente dicho, se sigue presentando la tendencia de respuesta de primer orden desde el momento del disturbio.



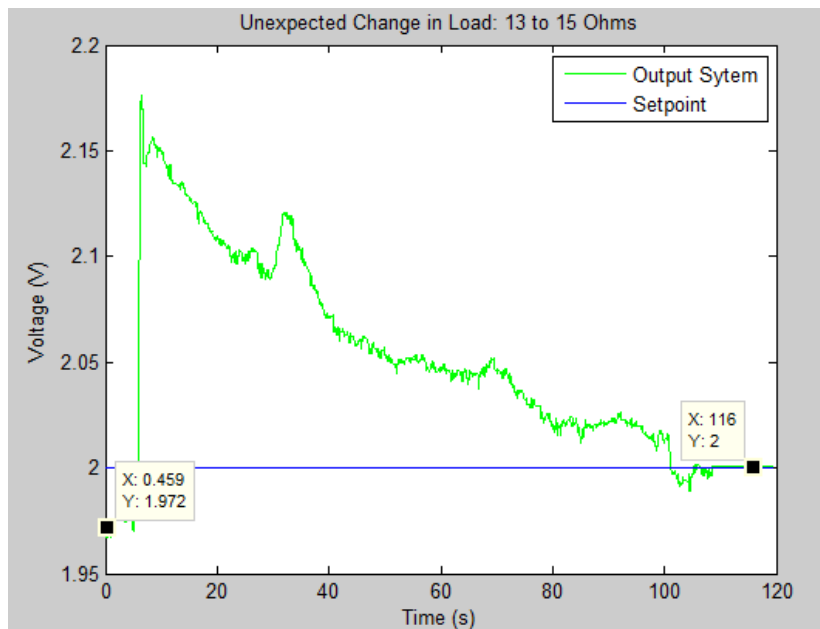
**Fig. 51** Respuesta paso a disturbio en la carga 8 a 10  $\Omega$ .

La figura muestra un cambio en la carga de 8 a 10 ohms. Este disturbio presenta un aumento de potencial de aproximadamente 0,25 V, punto desde el cual debe ser llevado hasta los 2 V de referencia, por medio de la acción del controlador. Se presentan perturbaciones que no permiten evidenciar una forma de respuesta definida, responsabilizando a la dinámica química del dispositivo por este comportamiento. Este cambio se da entre las cargas menos estables del rango de operación estipulado, por lo cual le cuesta al sistema estabilizarse sin que se presenten perturbaciones serias. Pese a esto, el sistema logra alcanzar la referencia en aproximadamente 180 s.



**Fig. 52** Respuesta paso a disturbio en la carga 10 a 13  $\Omega$ .

La figura muestra el disturbio producido cuando se presenta un cambio de carga de 10 a 13 ohms. Este cambio es mucho menos perturbador para el sistema, ya que en este punto prácticamente no hay oscilaciones ni cambios bruscos. También se puede notar la tendencia de una respuesta del sistema a una entrada paso con flanco de bajada, estabilizándose en 166,1 s.

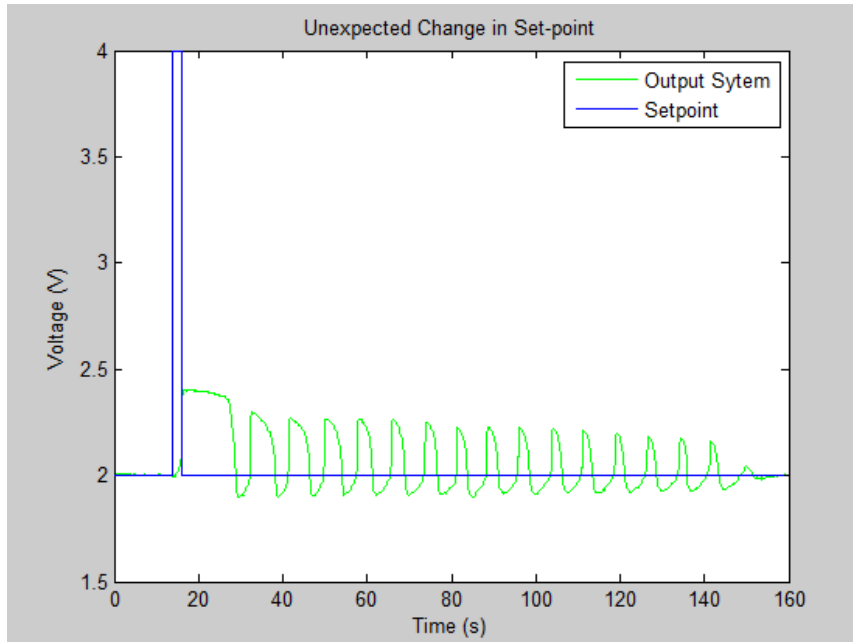


**Fig. 53.** Respuesta paso a disturbio en la carga 13 a 15  $\Omega$ .

La figura anterior describe la respuesta del sistema cuando hay un disturbio en la carga desde los 13 hasta los 15 ohms. En este punto, las perturbaciones son pronunciados y se presentan seguido a lo largo del proceso. A pesar de esto, se puede mostrar cierta tendencia a la respuesta ante una entrada paso con flanco de bajada, cuyo tiempo de establecimiento es de 116 s.

- **Cambios bruscos del sistema:**

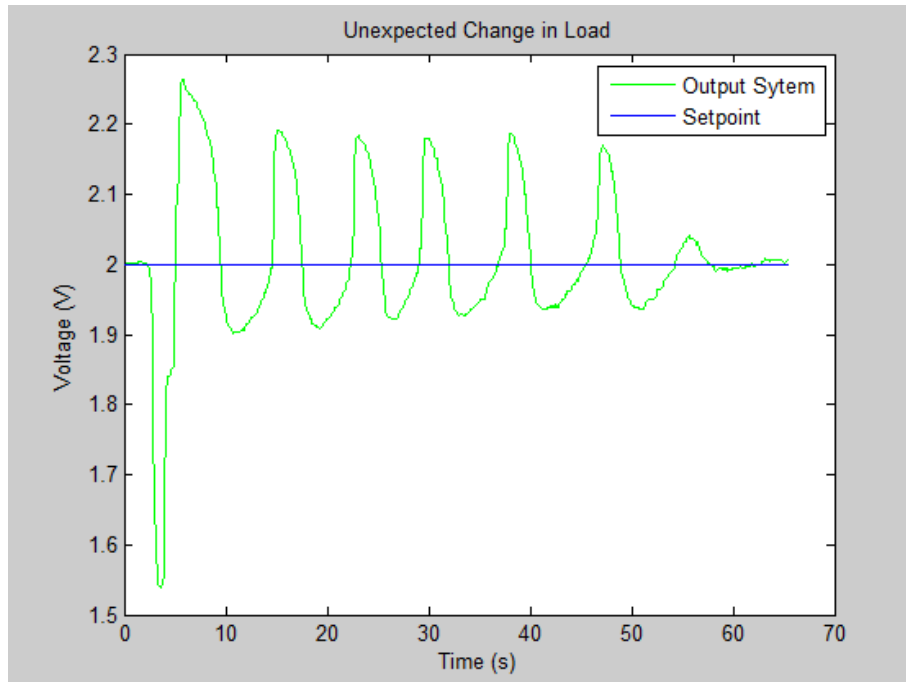
Se realizaron pruebas de robustez del controlador variando bruscamente, tanto el set point del sistema, como el valor de la carga sobre la salida de la celda. Los resultados se muestran a continuación:



**Fig. 54.** Respuesta del sistema a cambios bruscos en set point.

La figura permite observar la repuesta de un cambio brusco en la referencia del sistema. El cambio se da desde los 2 V iniciales hasta un valor de 4 V, simulando una respuesta impulso. El sistema oscila antes de establecerse definitivamente, presentando atenuaciones en la amplitud de la oscilación antes de llegar al punto de establecimiento, en aproximadamente 160 s. Es un cambio que altera la dinámica del sistema de forma drástica, pero gracias a la acción de control, se puede estabilizar rápidamente.





**Fig. 55.** Respuesta del sistema a cambios bruscos en la carga.

La figura anterior muestra el comportamiento del sistema cuando se presenta un cambio brusco en la carga, pasando de los 15 a los 7 ohms en poco tiempo. Se presentan oscilaciones con amplitudes de 0,2 V, atenuándose a lo largo del tiempo antes de llegar al punto de establecimiento. El sistema se establece relativamente rápido, llegando a esta condición en aproximadamente 65 s. Se puede evidenciar que el cambio brusco de set point es mucho más crítico que el de carga, ya que le toma más tiempo al sistema establecerse nuevamente cuando ha sido la referencia la que ha cambiado.

- **Consideraciones Generales:**

Las diferencias existentes en los resultados obtenidos en el desarrollo teórico y la posterior implementación se deben a los siguientes aspectos.

1. Al asumir que el sistema se comporta como un modelo en Laplace de primer orden más tiempo muerto, se plantea un modelo linealizado del sistema; lo anterior quiere decir, que en el modelo planteado se asume que la reacción química de la planta será lo suficientemente estable como para arrojar un voltaje único el cual no presentara ningún cambio de tipo oscilatorio en el transcurso del tiempo. Al analizar la respuesta del sistema con lazo de control en la planta real, se pudo observar que siempre se presentó una oscilación en la variable medida. Este “Rizado” se debe a que la reacción química presente en el proceso, es variante, oscilando entre un máximo de 50 mV.
2. Al realizar el modelo del sistema en lazo abierto, se puede obtener una expresión de sexto orden. No obstante al obtener la respuesta paso, se puede observar que su comportamiento es el de un sistema de primer orden más tiempo muerto.

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que el sistema de celdas de combustible, acoplado con el convertidor DC/DC y con el electrolizador, se comporta como un sistema de primer orden ante entradas tipo paso como se planteó inicialmente, teniendo en cuenta que su desempeño depende de cómo el sistema sea forzado, de acuerdo a una demanda de energía preestablecida, ya que el sistema puede operar en diferentes regiones dependiendo de la carga resistiva. (Figura 5).

Fue posible controlar el suministro de hidrógeno entrante a la celda de combustible por medio de variables eléctricas utilizando un controlador PI, el cual no solo regulaba el flujo de hidrógeno dependiendo de la demanda energética requerida; también permitía que las celdas de combustible funcionaran de manera adecuada, ya que el control impidió que estas últimas se saturaran por exceso de hidrógeno.

El controlador PI logró que la respuesta del sistema realimentado fuera sobre amortiguada, garantizando así un suministro de hidrógeno sin cambios bruscos que pudieran comprometer el desempeño del sistema.

Variando la producción de hidrógeno del electrolizador, fue posible desarrollar una estrategia de control de suministro cuya implementación no presentara un costo elevado, ya que la modificación del flujo de hidrógeno por medio de actuadores y sensores hacía que el proyecto fuera inviable económicamente hablando.

Se pudo comprobar que la dinámica del sistema responde a cambios bruscos de carga, lo cual permite pensar en implementar celdas de combustible en aplicaciones estacionarias, aun cuando el tiempo de respuesta puede llegar a ser lento. A pesar de la dinámica enunciada, los beneficios para el medio ambiente y el desarrollo de la generación de energía distribuida utilizando celdas de combustible compensan de alguna forma esta desventaja.

De acuerdo a las gráficas a) y b) de la figura 37, fue posible encontrar un modelo estático de la celda de combustible que se ajustara a la caracterización experimental del sistema, mostrando correspondencia en los valores obtenidos y en la tendencia de la respuesta, garantizando así la validez del modelo. Así mismo fue posible implementar un modelo del electrolizador que correspondiera plenamente con las caracterizaciones hechas sobre el dispositivo, ya que los valores de flujo, voltaje y corriente obtenidos en el modelo presentan cercanía con los valores obtenidos en la caracterización (figuras 41-44).

## BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Estela, W. (2001). Hydrogen Fuel Cell Technology and its Environmental Benefits. *Environmental Science for Lawyers*, 5.
- [2] M, Petrinić and Ž, Jakopović. (2007). Modeling and simulation of PEM fuel cell– power converter system Department of electric machines, drives and automation. *Faculty of Electrical Engineering and Computing Unska 3, Zagreb, Croatia*, 2-3.
- [3] N. Benchouia, A.E. Hadjadj, A. Derghal, L. Khochemane and B. Mahmah. (2013). Deling and validation of fuel cell PEMFC. *Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°2 (2013) 365 – 377*, 3-4.
- [4] S. Chowdhury, S. C. (2009). *Microgrids and active distribution Networks*. Londres: IET.
- [5] Erikson, R. W. (s.f.). *Fundamental of power electronics*. Recuperado el 2014, de <http://ecee.colorado.edu/copec/book/slides/Ch9slide.pdf>
- [6] *Convertidor Buck*. (s.f.). Recuperado el 2014, de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor\\_Buck](http://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor_Buck)
- [7] Feryster. (s.f.). *Núcleos de ferrita FERROXCUBE*. Recuperado el 2014, de <http://www.feryster.pl/polski/e4220rdz.php?lang=en>
- [8] M. A. Mauricio, *Apuntes de Control PID*, La Paz, 2001.
- [9] M. Rodrigo, «Universidad de Castilla-La Mancha,» [En línea]. Available: <https://www.uclm.es/profesorado/marodrigo/pdf/cap/cap4.pdf>. [Último acceso: 8 Mayo 2014].
- [10] Mazone, Virginia.(2002). Controladores PID. *Control Automático 1. Automatización y Control Industrial, Universidad de Quilmes*, 17.
- [11] López Ramírez, Juan Rafael. Modelo Dinámico de un Electrolizador Alcalino. *Universidad de Sevilla*, 18-20.
- [12] Quirós, P. J. (2007). *Laboratorio Convertidor Buck DC-DC 5V*. San José de Costa Rica: Universidad de Costa Rica-Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- [13] Perilla Gabriel; Apuntes Clase Diseño no Lineal (2013).

## **ANEXOS**