

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño conceptual y simulación de un banco experimental para la caracterización de una celda de combustible requerida para la alimentación de una residencia cuyo consumo considerado es de hasta 3kW”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad especialización Electrónica y
Automatización Industrial

Presentado por:

Gustavo Adolfo Ponce Martínez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios y a toda mi familia, en especial a mis padres y hermanos por todo su apoyo y confianza que me brindaron durante este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento primeramente a Dios por permitirme tener vida y salud, a mis padres por brindarme su apoyo incondicional en todo momento y a mis hermanos por su apoyo en mi crecimiento como estudiante.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; yo Gustavo Adolfo Ponce Martínez doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gustavo Adolfo Ponce Martínez', with a stylized flourish at the end.

Gustavo Adolfo Ponce Martínez

EVALUADORES



MSc. Dennys Cortez Alvarez

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Wilton Agila Gálvez

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el presente proyecto integrador se abordará el diseño conceptual y la simulación por medio del software Matlab-Simulink, para obtener la caracterización de un banco de celdas de combustible del tipo de membrana de intercambio protónico PEMFC, para el estudio y obtención de parámetros idóneos como la temperatura, presión y caudal requeridos para generar la mayor eficiencia en operación, para la aplicación estacionaria de alimentación de una residencia de 3kW.

Para cumplir con el objetivo principal de este proyecto, inicialmente se eligió el tipo de celdas de combustible, el cual opere al menor rango de temperatura debido a la aplicación deseada, luego por medio de la curva de polarización de las celdas de combustible, se aproximó valores de voltaje y corriente de operación para obtener un diseño conceptual del banco de celdas de combustible. A partir de esto y considerando la potencia de 3kW que demanda la residencia, se utilizó el modelo matemático del banco de celdas de combustible en Simulink, el cual nos permite simular un banco de 6kW de potencia; luego se realiza el diseño del sistema de inversores con lazo cerrado para así obtener los niveles de tensión alterna de 120Vac y 240Vac, a partir de la salida de voltaje y corriente directa del banco de celdas de combustible.

Una vez obtenido el sistema simulado de generación de energía eléctrica a partir de un banco de celdas de combustible, se realiza la caracterización del mismo, a partir de la variación de los niveles de caudal con respecto al caudal máximo tanto de hidrógeno como de aire; luego se caracteriza al banco con respecto a la variación de temperatura dentro del rango de operación del tipo de celdas de combustible de membrana de intercambio protónico y posteriormente se caracteriza con respecto a la variación de presión de hidrógeno y de aire, todo esto con la finalidad de obtener un punto específico o un rango alrededor de este punto resultante de temperatura, caudal y presión, para generar la mayor eficiencia del banco de celdas de combustible.

ABSTRACT

In the present integrative project, the conceptual design and simulation will be addressed through the Matlab-Simulink software, to obtain the characterization of a PEMFC proton exchange membrane type fuel cell bank, for the study and obtaining of effective parameters such as the temperature, pressure and flow required to generate the highest efficiency in operation, for the stationary application of feeding a residence of 3kW.

To meet the main objective of this project, initially the type of fuel cells was replaced, which operates at the lowest temperature range due to the desired application, then through the polarization curve of the fuel cells, it was approximated operating voltage and current values to obtain a conceptual design of the fuel cell bank. From this and considering the 3kW power demanded by the residence, the mathematical model of the fuel cell bank was produced in Simulink, which allows us to simulate a 6kW power bank; Then, the design of the closed-loop inverter system is carried out to obtain the alternating voltage levels of 120Vac and 240Vac, from the direct voltage and current output of the fuel cell bank.

Once the simulated electric power generation system has been obtained from a bank of fuel cells, its characterization is carried out, based on the variation of the flow levels with respect to the maximum flow of both hydrogen and air; then the bank is characterized with respect to the temperature variation within the operating range of the type of proton exchange membrane fuel cells and later it is characterized with respect to the variation of hydrogen and air pressure, all this with the purpose to obtain a specific point or a range around this resulting point of temperature, flow and pressure, to generate the highest efficiency of the bank of fuel cells.

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE PLANOS	XIII
CAPÍTULO 1	14
1. Introducción	14
1.1 Descripción del problema	15
1.2 Justificación del problema.....	15
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo General	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Marco teórico	16
1.4.1 Generalidades de una celda de combustible	16
1.4.2 Celda de combustible tipo PEM	16
1.4.3 Elementos que conforman las celdas de combustible.....	17
1.4.4 Funcionamiento de la celda de combustible	18
1.4.5 Tipos de celdas de combustible	20
1.4.6 Ventajas de las celdas de combustible	26

1.4.7	Desventajas de las celdas de combustible.....	26
CAPÍTULO 2.....		27
2.	Metodología	27
2.1	Elección del tipo de celdas de combustible	27
2.2	Estructura física de las celdas de combustible	28
2.3	Diseño conceptual del Banco de celdas de combustible	32
2.4	Sistema experimental de Banco de celdas de combustible tipo PEM	39
2.5	Modelo de la celda de combustible en Matlab - Simulink	42
2.6	Circuito en Simulink para la caracterización del banco de celdas de combustible.....	49
2.7	Equipos utilizados en una posible implementación.....	68
2.7.1	Banco de celdas de combustible.....	68
2.7.2	Inversor cargador (todo en uno).....	69
2.7.3	Bombonas industriales de Hidrógeno.....	70
2.7.4	Banco de Baterías.....	71
2.7.5	Esquema eléctrico con protecciones del sistema autónomo.....	72
CAPÍTULO 3.....		79
3.	Resultados Y ANÁLISIS	79
3.1	Respuesta de la pila de combustible ante la variación de la carga.....	79
3.1.1	Respuesta del sistema en el escenario de circuito abierto.....	79
3.2	Respuesta del sistema al 25, 50, 75 y 100% del caudal máximo para todo el sistema de carga.	82
3.2.1	Caudal al 25% del máximo de H2 y de aire (65°C)	82
3.2.2	Caudal al 50% del máximo de H2 y de aire (65°C)	88
3.2.3	Caudal al 75% del maximo de H2 y de aire (65°C)	90
3.2.4	Caudal al 100% del máximo de H2 y aire (65°C).....	91

3.2.5	Gráficos en Matlab de la caracterización del banco de celdas de combustible	92
3.3	Efectos de la temperatura en el Banco de celdas de combustible (caudal 50% del Máximo)	95
3.4	Efectos de la Presión en el Banco de celdas de combustible (caudal 50% del Máximo y temperatura de 60°C)	99
3.5	Gráficos del voltaje, corriente, potencia y eficiencia con respecto al tiempo	103
CAPÍTULO 4		108
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	108
4.1	CONCLUSIONES	108
4.2	RECOMENDACIONES.....	110
BIBLIOGRAFÍA		111
ANEXOS.....		113

ABREVIATURAS

PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
AFC	Alkaline Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
FC	Fuel Cell
DC	Corriente Directa
AC	Corriente Alterna
V	Voltaje
En	Voltaje de Nerst
Eo	Voltaje de circuito abierto
Vfc	Voltaje del banco de celdas de combustible
Ifc	Corriente del banco de celdas de combustible
Pfc	Potencia del banco de celdas de combustible
Vdc	Voltaje de corriente directa
Vac	Voltaje de corriente alterna

SIMBOLOGÍA

H_2	Elemento químico Hidrógeno
O_2	Elemento químico Oxígeno
H^+	Protón de Hidrógeno
KOH	Hidróxido de Potasio
OH^-	Anión Hidróxido
SiC	Carburo de Silicio
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Al	Aluminio
Y_2O_3	Óxido de Itrio
CO_3^{-2}	Óxido de Itrio
lpm	Litros por Minuto
O_2^-	Anión Oxígeno
H_2O	Agua
Cu	Cobre
m	metros

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquemático de la celda de combustible.....	18
Figura 1.2 Esquema de una pila de combustible PEM con los reactantes y productos formados.....	21
Figura 1.3 Esquema de una pila de combustible AFC con los reactantes y productos formados.....	22
Figura 1.4 Esquema de una pila de combustible PAFC con los reactantes y productos formados.....	23
Figura 1.5 Esquema de una pila de combustible MCFC con los reactantes y productos formados	24
Figura 1.6 Esquema de una pila de combustible SOFC con los reactantes y productos formados	25
Figura 2.7 Plato bipolar típico en un Stack de Celdas	29
Figura 2.8 Diseños típicos de platos bipolares	30
Figura 2.9 Esquema de un banco de celdas de combustible con canales internos...	31
Figura 2.10 Curva de Polarización de una celda de combustible PEMFC.....	34
Figura 2.11 Configuración típica de una pila de combustible.....	38
Figura 2.12 Sistema de circulación de los gases para una pila de combustible	39
Figura 2.13 Control de alimentación del combustible y del aire a la PEMFC.....	40
Figura 2.14 Bloque de un Stack de celdas de combustible en Simulink.....	42
Figura 2.15 Bloque de Parámetros del banco de celdas de Simulink.....	42
Figura 2.16 Circuito equivalente del banco de celdas del modelo detallado de Simulink	45
Figura 2.17 Circuito para la caracterización del banco de celdas en Simulink	50
Figura 2.18 Subsistema Control PI para la alimentación de PH ₂ y PO ₂	51
Figura 2.19 Respuesta del Banco de celdas de combustible	53

Figura 2.20 Electrónica de potencia para la alimentación residencial.....	54
Figura 2.21 Subsistema Boost Converter 250 VDC.....	55
Figura 2.22 Subsistema Inverter DC-AC 120/240 VAC	58
Figura 2.24 Respuesta del banco de celdas de combustible.....	64
Figura 2.25 Parámetros del Banco de celdas de combustible	65
Figura 2.26 Panel de control de los interruptores	65
Figura 2.27 Sistema de carga variable	66
Figura 2.28 Subsistema de Interruptores para la variación de carga.....	67
Figura 2.29 Obtención de la potencia de cada sistema de carga	67
Figura 2.30 Fuel Cell Stack 6kW.....	68
Figura 2.31 Algunos de los equipos incluidos (Controlador y válvulas)	69
Figura 2.32 Inversor Cargador todo en uno SPF 6000T DVM “Growatt” 6kW [15]	70
Figura 2.33 Bombonas industriales de Hidrógeno	70
Figura 2.34 Banco de Baterías de 48V / 150Ah (7 en paralelo).....	72
Figura 2.35 Diagrama de Bloques del sistema utilizando un inversor controlador.....	73
Figura 2.36 Diagrama de Bloques utilizando un regulador de carga e inversores de 120 y 240 VAC.....	73
Figura 3.37 Parámetros del banco de celdas de combustible para su caracterización	79
Figura 3.38 Voltajes y corrientes en la carga para 120 y 240 Vac (sin carga)	80
Figura 3.39 Voltaje y Corriente en el sistema de carga 120 Vac (sin carga)	80
Figura 3.40 Voltaje y Corriente en el sistema de carga 240 Vac (sin carga)	81
Figura 3.41 Respuesta del Banco de Celdas (sin carga).....	81
Figura 3.42 Parámetros iniciales del Banco de celdas de combustible	83
Figura 3.43 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar una carga RL de 50 ohm 10 mH	84

Figura 3.44 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para una carga RL de 50 ohm 10 mH.....	84
Figura 3.45 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar dos cargas (RL de 50 ohm 10 mH y R de 50 ohm).....	85
Figura 3.46 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para dos cargas (RL de 50 ohm 10 mH y R de 50 ohm).....	86
Figura 3.47 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar tres cargas (RL de 50 ohm 10 mH, R de 50 ohm y R de 50 ohm)	86
Figura 3.48 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para tres cargas (RL de 50 ohm 10 mH, R de 50 ohm y R de 50 ohm)	87
Figura 3.49 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar cuatro cargas (RL de 50 ohm 10 mH, y 3 cargas R de 50 ohm)	88
Figura 3.50 Parámetros iniciales del banco de celdas de combustible.....	88
Figura 3.51 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para 4 cargas (RL de 50 ohm 10 mH, 3 cargas R de 50 ohm)	89
Figura 3.52 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar cuatro cargas (RL de 50 ohm 10 mH, y 3 cargas R de 50 ohm)	90
Figura 3.53 Curvas del Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire	92
Figura 3.54 Curvas de la Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire	93
Figura 3.55 Curvas de la Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire	94
Figura 3.56 Curvas de la Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire	95
Figura 3.57 Curvas de Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura	96

Figura 3.58 Curvas de Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura	97
Figura 3.59 Curvas de Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura	98
Figura 3.60 Curvas de Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura	99
Figura 3.61 Curvas de Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible para distintos niveles de presión.....	100
Figura 3.62 Curvas de Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión.....	101
Figura 3.63 Curvas de Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión.....	102
Figura 3.64 Curvas de Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión.....	103
Figura 3.65 Voltaje vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia	104
Figura 3.66 Corriente vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia	105
Figura 3.67 Potencia vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia	106
Figura 3.68 Potencia vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de celdas de combustible con sus electrólitos y rangos de operación de temperatura respectivos	25
Tabla 2.2 Rangos aceptables de las variables del sistema de control de la PEMFC.	41
Tabla 2.3 Lista de materiales utilizados en una posible implementación física del sistema autónomo.....	78
Tabla 3.4 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 25% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas	87
Tabla 3.5 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 50% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas	89
Tabla 3.6 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 75% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas	90
Tabla 3.7 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 100% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas	91

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Esquema eléctrico con Protecciones del sistema autónomo	74
---	----

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad por disminuir la gran cantidad de contaminación ambiental que por lo general es debido a la utilización de los combustibles fósiles, ha generado la preocupación y el incentivo a contrarrestar este alto nivel de contaminación por medio de la búsqueda de fuentes alternas de generación de energía más limpia.

Los avances de ciencia y tecnología están trabajando en este preocupante tema y existen varias formas de la generación de energía más limpia y rentable por métodos alternos a los comúnmente conocidos que utilizan combustibles fósiles.

Hoy en día, de acuerdo con los avances de ciencia y tecnología se ha presentado como una de las tantas opciones de generación de energía, las llamadas “celdas de combustible”, que como mayor atributo y atracción tiene una contaminación generada cercana a cero emisiones cuando su combustible que generalmente es el hidrógeno se presenta en estado gaseoso; pero como mayor desventaja tiene su alto costo en el mercado por lo cual se está realizando investigaciones para reducir este costo y poder mejorar su eficiencia como producto final.

El objetivo principal de este proyecto es realizar un sistema de generación de energía eléctrica basado en un banco de celdas de combustible para alimentar una residencia de hasta 3 kW y visualizar la respuesta de parámetros como voltaje, corriente y potencia al tener distintos tipos de carga en la residencia.

1.1 Descripción del problema

El creciente volumen de la sociedad actualmente está contribuyendo directamente a una presión sobre el cambio climático y pérdida de biodiversidad debido a la utilización de energía a partir de combustibles fósiles, que como resultado de este tipo de combustibles genera emisiones de gases como monóxido de carbono y dióxido de carbono, que aumentan de manera exponencial el efecto invernadero, la lluvia ácida, la contaminación del aire, suelo y agua [16]. En la actualidad se procura el uso de las energías renovables como un camino distinto para la generación de energía más limpia y eficiente a partir de los recursos naturales como la luz solar, el viento, los recursos hídricos, el calor de la superficie terrestre o la biomasa [17]. En el caso particular de la contaminación ambiental por parte de las edificaciones y residencias, según el estudio y análisis de la Unión Europea con respecto a la eficiencia energética, los edificios y residencias son responsables del 36% de las emisiones de dióxido de carbono en la Unión Europea, lo que los convierte en el mayor consumidor de energía de Europa [18]. Bajo este contexto, se propone en este proyecto como una alternativa a la generación de energía eléctrica convencional, la utilización de un banco de celdas de combustible de membrana de intercambio protónico para alimentar las distintas cargas eléctricas que se presentan en una residencia, considerando como limitante una residencia de 3kW.

1.2 Justificación del problema

Las celdas de combustible se presentan como una gran alternativa para la generación de energía eléctrica a partir de dos elementos presentes con gran abundancia en el planeta, como los son el hidrógeno y el oxígeno, y si estos se presentan en su estado gaseoso, el resultado de contaminación total resultante de su reacción electroquímica es considerado como cero emisiones, esto se presenta como un gran aporte para el medio ambiente. A pesar de que el coste de la tecnología de las celdas de combustible tipo poliméricas es alto, existe gran número de aplicaciones que ya se las están implementando, dichas aplicaciones van desde el sector móvil como los vehículos eléctricos, hasta el sector estacionario como edificios, hospitales y residencias.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- I. Diseñar por medio del concepto y simulación un banco de celdas de combustible para la alimentación de una residencia de hasta 3 kW.

1.3.2 Objetivos Específicos

- I. Analizar el comportamiento de una celda de combustible del tipo polimérica a partir de la curva de polarización para generar un diseño conceptual de un banco de celdas de combustible.
- II. Caracterizar un banco de celdas de combustible para encontrar parámetros deseados como la temperatura, presión y caudal, por medio de simulación en el software Matlab-Simulink, para generar la mayor eficiencia del banco en el sistema de alimentación de una residencia de 3kW.
- III. Simular un sistema autónomo de generación de energía eléctrica a partir de un banco de celdas de combustible tipo PEMFC por medio del software Matlab-Simulink, para analizar la respuesta del banco y el sistema de carga residencial.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Generalidades de una celda de combustible

Las celdas de combustible hoy en día tienen su espacio importante en el área de la investigación, ganando terreno como una de las alternativas reales y en proceso de mejora para la generación de energía eléctrica, gracias a su mayor ventaja que es la emisión de contaminantes ambientales considerada nula y a su gran porcentaje de eficiencia (entre el 50% - 90%) en sus aplicaciones correspondientes [1].

1.4.2 Celda de combustible tipo PEM

Una celda de combustible tipo PEM en principio opera como una batería, donde su principal objetivo es la generación de electricidad a partir de la combinación electroquímica del hidrógeno y del oxígeno, que son dos de los elementos químicos más abundantes en el planeta.

La principal diferencia que presenta frente a una batería es que no necesita recarga para su posterior funcionamiento y generará energía en forma de electricidad y calor mientras se le proporcione estos dos combustibles [2].

1.4.3 Elementos que conforman las celdas de combustible

Ya que se presenta este dispositivo como una alternativa de generación de energía, se debe mencionar cuales son los elementos que conforman una celda de combustible.

1.4.3.1 Electrodo

El combustible de la celda que por lo general es el hidrógeno, alimenta continuamente los electrodos, donde tienen lugar las reacciones químicas para producir como producto final la electricidad. Este producto (la electricidad) se deriva a partir de la presencia de dos electrodos en la celda de combustible, los cuales son el ánodo y el cátodo.

1.4.3.2 Ánodo

El ánodo es el polo negativo de la celda de combustible, el cual produce la circulación de los electrones de hidrógeno por un circuito externo hasta el cátodo produciendo así electricidad. En él, se presentan una serie de surcos que permiten la distribución del combustible por toda la superficie del catalizador, el cual separa las moléculas de hidrógeno en iones cargados positivamente, dando un electrón cada una.

1.4.3.3 Cátodo

El cátodo es el polo positivo de la celda de combustible. Similar al ánodo, también posee una serie de surcos para la distribución del oxidante (oxígeno presente en el aire) por toda el área del catalizador, donde se recombinan con los iones de hidrógeno y oxígeno para formar agua.

1.4.3.4 Electrólito

Es el encargado de permitir la libre circulación de los protones de hidrógeno cargados positivamente, completando así el circuito de la celda. También por su propiedad física,

impide el paso de los electrones que inicialmente se presentaban en la molécula de hidrógeno obligándolos a circular por un circuito externo a la membrana electrolítica.

1.4.3.5 Oxidante

El oxidante que más empleos tiene en las celdas de combustible es el oxígeno gaseoso, el cual está presente en el aire y es ingresado a través de entradas de la celda de combustible llegando así hasta el cátodo [7].

La reacción electroquímica que se presenta en la celda de combustible es debido al flujo continuo de combustible (hidrógeno) y el oxidante (presente en el aire) lo cual se obtiene como resultado electricidad, calor y dependiendo del estado gaseoso del hidrógeno se obtiene agua como subproducto.

1.4.4 Funcionamiento de la celda de combustible

Toda celda de combustible está conformada por un ánodo, un cátodo y un electrolito, como se muestra en la Figura 1.1, donde los reactivos se suministran desde el exterior de forma continua; donde el hidrógeno es un fluido suministrado al ánodo y el oxígeno es un fluido suministrado al cátodo de forma continua ininterrumpida [4].

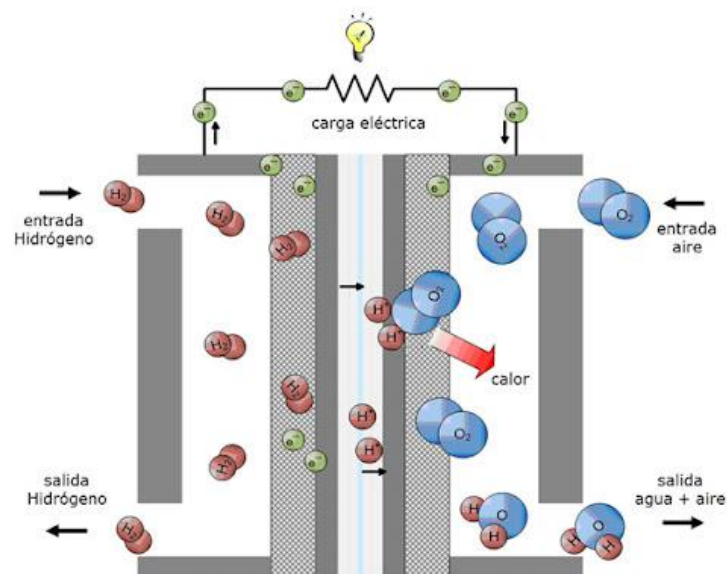
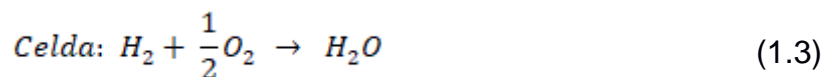
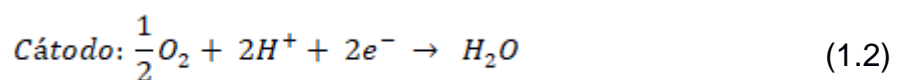


Figura 1.1 Esquemático de la celda de combustible

Cuando reaccionan electroquímicamente el combustible y el oxidante se genera una fuerza electromotriz entre el ánodo y el cátodo de la celda de combustible, con una diferencia de potencial alrededor de 1.2 V en circuito abierto. En el ánodo, es donde se presenta la oxidación del combustible y en el cátodo, es donde se da la reducción del oxidante. El electrólito situado entre el ánodo y el cátodo actúa como aislante eléctrico, como conductor protónico y como separador de las reacciones químicas presentes en el ánodo y el cátodo [3].

Reacciones electroquímicas que se producen en este tipo de celdas de combustible:



Al ingresar el combustible (hidrógeno) por uno de los canales de entrada a la celda de combustible como se muestra en la Figura 1.1, llega hasta el ánodo de la celda, donde una cubierta generalmente de platino ayuda a quitar los electrones de los átomos de hidrógeno (H₂) dejándolo ionizado, ósea en forma de protones (H⁺); además la membrana electrolítica solo permite la circulación de protones desde el ánodo hacia el cátodo y como resultado de esto, los electrones solo tiene un camino externo (conexión de una carga entre ánodo y cátodo) por el cual son forzados a circular, formando así la corriente eléctrica.

Luego, por el otro conducto de entrada ingresa el oxígeno (O₂) presente en el aire y llega hasta el cátodo como se muestra en la Figura 1.1, este se combina con los protones de hidrógeno que circularon por la membrana electrolítica desde el ánodo y los electrones que atravesaron el circuito externo para producir agua, por lo tanto,

como es una reacción química que naturalmente esta desplazada hacia la formación de agua entonces es conocida como una reacción positiva exotérmica [5].

1.4.5 Tipos de celdas de combustible

En la actualidad existen varios tipos de celdas de combustible que por lo general se clasifican por el electrólito que poseen, entre ella están las celdas de combustible alcalinas (AFC), de ácido fosfórico (PAFC), de metanol directo (MCFC), de óxido de sólido (SOFC) y las de membrana de intercambio protónico (PEMFC), donde este último tipo de celdas es el más utilizado en el mercado, debido a su bajo rango de operación de temperatura.

1.4.5.1 Celdas de combustible con membrana de intercambio protónico (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

Las celdas de combustible tipo PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane o Proton Exchange Membrane Fuel Cell) es el tipo de celdas más utilizado en el mercado donde su electrólito es una membrana polimérica conductora de protones. El fabricante más reconocido de este tipo de celdas es Nafión de la casa de Dupont [6].

La carga en movimiento es el protón de hidrógeno como se muestra en la Figura 1.2, los catalizadores típicos que corresponden al ánodo y cátodo son de platino (Pt) depositado sobre una sustancia carbonosa y su temperatura de funcionamiento está en un rango alrededor de 60°C a 90°C.

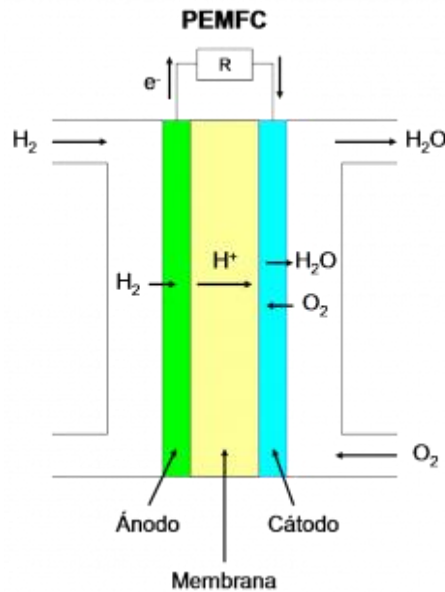


Figura 1.2 Esquema de una pila de combustible PEM con los reactantes y productos formados

1.4.5.2 Celdas de combustible alcalinas (AFC, Alkaline Fuel Cell)

Las celdas de combustible alcalinas presentan características con respecto al electrólito, que es una base fuerte habitualmente de hidróxido de potasio, que es retenida en una matriz que normalmente es de asbesto. Las cargas que atraviesan al electrólito corresponden al anión hidróxido como se muestra en la Figura 1.3, y los catalizadores pueden ser de distintos materiales como por ejemplo níquel, plata, platino, oro, óxidos metálicos etc.

Con respecto a la temperatura de funcionamiento este tipo de celdas trabajan en un rango menor a 120°C, donde para este caso se suele emplear una baja concentración de la base fuerte (30% - 50% en peso); cuando trabaja a altas temperaturas alrededor de 250°C en este caso se carga bien la matriz con base fuerte (85% en peso).

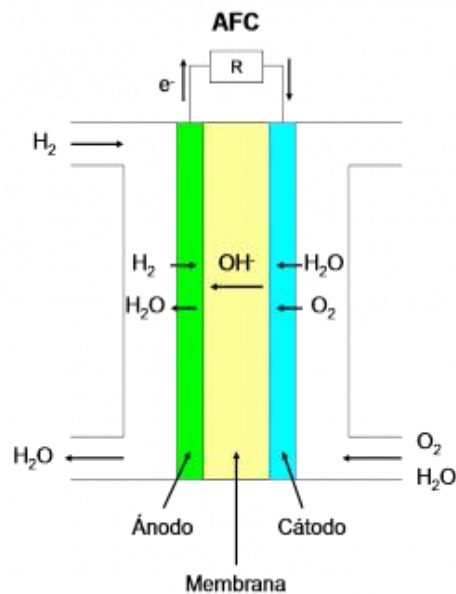


Figura 1.3 Esquema de una pila de combustible AFC con los reactantes y productos formados

1.4.5.3 Celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)

Para las celdas de combustible de ácido fosfórico, como su nombre lo indica, se tiene su principal característica que corresponde al material de la membrana electrolítica, el cual es ácido fosfórico y se lo utiliza bien concentrado en un 100%, de manera similar a las celdas AFC se emplea una matriz para retener el electrolito que en este caso suele ser de SiC.

Las cargas que atraviesan la membrana electrolítica corresponden al protón de hidrógeno y de similar característica a las celdas tipo PEM sus catalizadores son de platino, su temperatura de operación oscila los 220°C.

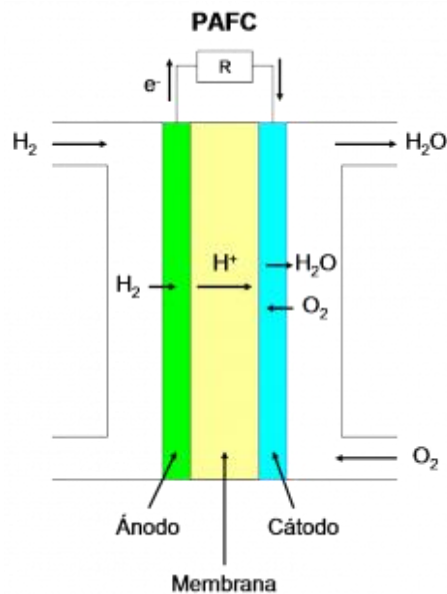


Figura 1.4 Esquema de una pila de combustible PAFC con los reactantes y productos formados

1.4.5.4 Celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)

Para este tipo de celdas de combustible se tiene un alto rango de operación de temperatura correspondiente a 600°C – 700°C donde los catalizadores implementados son metales no nobles (Ni con Cr, Al u óxidos metálicos) ya que a este rango de temperatura la cinética de las reacciones mejora notablemente.

El electrólito corresponde a carbonatos alcalinos embebidos en una matriz cerámica y aprovechando este rango de temperatura los carbonatos forman una sal fundida con una gran conductividad iónica.

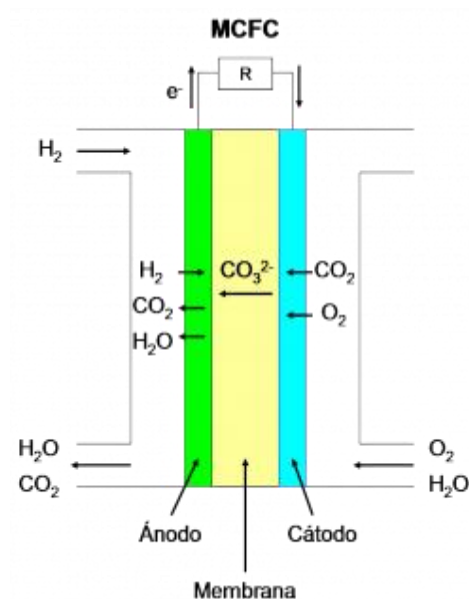


Figura 1.5 Esquema de una pila de combustible MCFC con los reactantes y productos formados

1.4.5.5 Celdas de combustible de óxido de sólido (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)

Este tipo de celdas de combustible utilizan un electrolito de óxido metálico típicamente óxido de itrio estabilizado como óxido de circonio, sus catalizadores típicos están compuestos típicamente de níquel y compuestos cerámicos en el ánodo y lantano estroncio manganita en el cátodo.

Igual que en las celdas de combustible MCFC debido a la alta temperatura de operación no es necesario emplear metales nobles para acelerar las reacciones electroquímicas, donde su temperatura de operación está dada por un rango de 600°C a 1000°C, a estas temperaturas se produce una gran conductividad iónica del electrolito debido a la movilidad de los aniones de oxígeno.

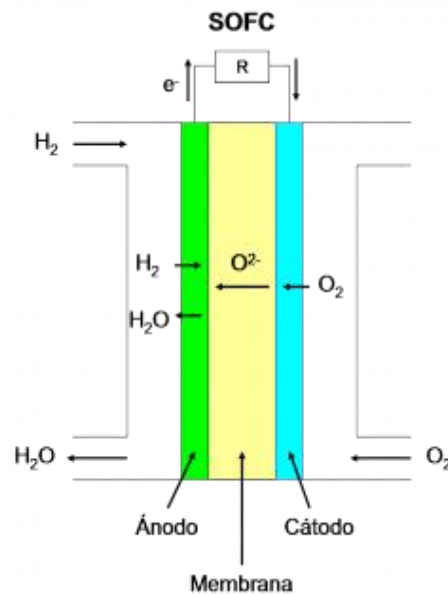


Figura 1.6 Esquema de una pila de combustible SOFC con los reactantes y productos formados

La tabla mostrada a continuación ilustra en forma de resumen los tipos de celdas de combustible según el electrólito que se emplea, con esto se presenta a demás las cargas en movimiento que circulan por la membrana electrolítica y el rango de temperatura que operan todas y cada una de las celdas de combustible.

Tipo de pilas de Combustible	Cargas en Movimiento a través del Electrólito	Rango de Temperatura de Operación
PEMFC	H^+	40 - 90 °C
AFC	OH^-	50 - 250°C
PAFC	H^+	150 – 220°C
MCFC	CO_3^{2-}	600 – 700°C
SOFC	O^{2-}	600 – 1000°C

Tabla 1.1 Tipos de celdas de combustible con sus electrólitos y rangos de operación de temperatura respectivos

1.4.6 Ventajas de las celdas de combustible

- Cuando se les suministra hidrógeno, no producen gases de efecto invernadero ni emisiones tóxicas.
- El hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en el planeta.
- El hidrógeno no es un combustible tóxico.
- Pueden estar presentes en aplicaciones móviles, de transporte y estacionarias.
- Pueden ser apiladas en forma de banco o Stack para generar la potencia deseada.

1.4.7 Desventajas de las celdas de combustible

- Al tratarse de una tecnología en desarrollo y contar todavía con una baja demanda de unidades, su precio no puede, hoy en día, competir con el de las tecnologías convencionales.
- La producción del hidrógeno resulta muy costosa, ya que no existe como fuente primaria de energía, sino que hay que procesarlo y separarlo para tenerlo en estado puro.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el capítulo anterior, se trató sobre las generalidades, funcionamiento y los distintos tipos de celdas de combustible que se encuentran en el mercado y que se han desarrollado como resultado de las investigaciones de los expertos para las distintas aplicaciones.

En este capítulo correspondiente a la metodología, se tratará acerca de los conceptos de dimensionamiento y la alternativa mejor hallada para suplir uno de los objetos principales que se tiene en este documento, el cual trata acerca del poder alimentar las distintas cargas eléctricas que se encuentran en una residencia de hasta los 3 kW.

2.1 Elección del tipo de celdas de combustible

Como se expuso en el capítulo 1, el rango de temperatura de operación de los distintos tipos de celdas de combustible, juega un papel determinante a la hora de la elección del tipo de celdas de combustible, que se necesita emplear en la aplicación tipo residencia propuesta en este proyecto, el rango de temperatura debería ser el menor posible ya que, se desea tener todo tipo de seguridad para con las personas residentes y sus alrededores y además de esto, se tiene un combustible (hidrógeno) que es altamente peligroso y de acuerdo a las exposiciones puede causar explosiones y daños irreversibles.

Es por esto último que se ha elegido las celdas de combustible de tipo de membrana de intercambio protónico (PEM) ya que, en comparación con los otros tipos de celdas de combustible, el rango de temperatura de operación es relativamente bajo, poseen una alta densidad de potencia y tienen la capacidad de respuesta rápida (de 1 a 2 segundos) cuando se realizan cambios de alimentación y de cargas eléctricas. Estas características antes mencionadas, resaltan a las celdas de combustible tipo PEM como la mejor alternativa para dicha aplicación y se perfiló como el tipo más adecuado debido a su arranque rápido, y como resultado de esto se necesita menor tiempo de

calentamiento que los demás tipos de celdas de combustible [8]. Además, la utilización de una membrana de intercambio protónico que utiliza un polímero sólido evita los problemas asociados a los electrolitos líquidos y reduce la corrosión, lo que significa que existirá menor desgaste de los elementos que conforman las celdas de combustible generando así una mayor durabilidad.

2.2 Estructura física de las celdas de combustible

Como se mencionó en el capítulo anterior, el voltaje generado por una celda de combustible es de apenas de 0.7 V para una corriente útil, lo cual esta magnitud de voltaje de una celda en particular sería insuficiente para alimentar cargas eléctricas, más aún cuando se trata de alimentar cargas en una residencia de 3 kW que es la finalidad de este proyecto. Por tal motivo es necesario la agrupación de estas celdas de combustible en forma de pila, también llamados bancos o Stack de celdas de combustible donde su conexión sería del tipo serie ya que, al realizar la conexión serie se tiene la suma de los voltajes de cada una de las celdas en particular (Mono-celda).

Para el conexionado en serie que es requerido para esta aplicación y de echo la conexión más común de una pila de celdas, es normal la idea de la conexión del cátodo de una celda con el ánodo de la siguiente celda en serie y así sucesivamente hasta completar la potencia requerida sin embargo, los electrones deben circular a través de la cara del electrodo hasta la conexión externa para la recolección de la corriente, por tal motivo la conexión anterior generaría pérdidas y de gran cantidad ya que, una celda solo genera alrededor de 0.7 V, sin mencionar la cantidad de tuberías que se debería implementar a todas y cada una de las celdas para alimentarlas con el combustible (hidrógeno) y el oxígeno presente en el aire.

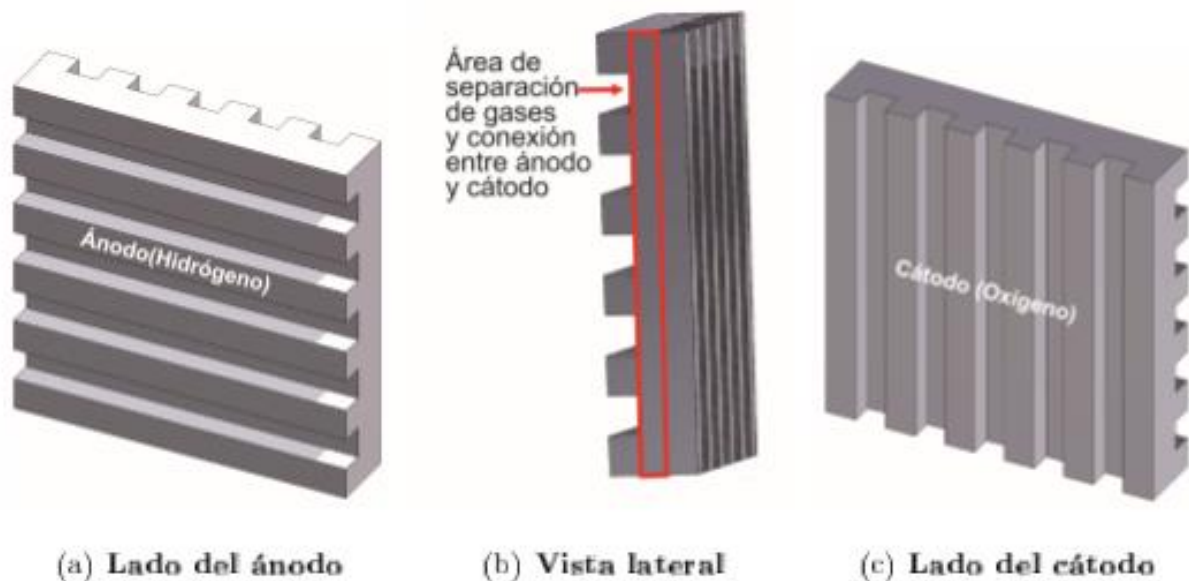


Figura 2.7 Plato bipolar típico en un Stack de Celdas

La Figura 2.7 muestra un diseño típico de un plato bipolar de un Stack de celdas de combustible donde, este plato tiene tres funcionalidades esenciales que trata de explicar la imagen, donde la Figura 2.7 (a) muestra el lado del ánodo por donde circula el hidrógeno, de la misma manera en la Figura 2.7 (c) se muestra al cátodo por donde circula el oxígeno presente en el aire y se puede visualizar que los canales de circulación son en dirección transversal a las direcciones de los canales de flujo del hidrógeno, por otra parte la Figura 2.7 (b) muestra la separación de los canales de conducción del hidrógeno (ánodo) y del oxígeno (cátodo) en una vista lateral; es así como se puede lograr la conexión en serie de las mono-celdas y así poder lograr un voltaje de salida deseado con la contribución de cada celda de manera individual conectadas en serie. Por lo tanto, la mejor opción es la utilización de platos bipolares para la conexión en serie de un Stack, ya que toda la superficie del ánodo está conectada con toda la superficie del cátodo de la celda siguiente [9].

Existen distintos tipos de platos bipolares donde, su principal diferencia radica en la forma de los canales de conducción de los flujos de suministros de gases; por otro lado, este tipo de alimentación a cada una de las celdas con respecto al diseño de los canales internos no es simple y requiere un equilibrio entre la alimentación de los gases

y la superficie de contacto entre otros fonómetros con respecto a la dinámica de fluidos que se deben considerar.

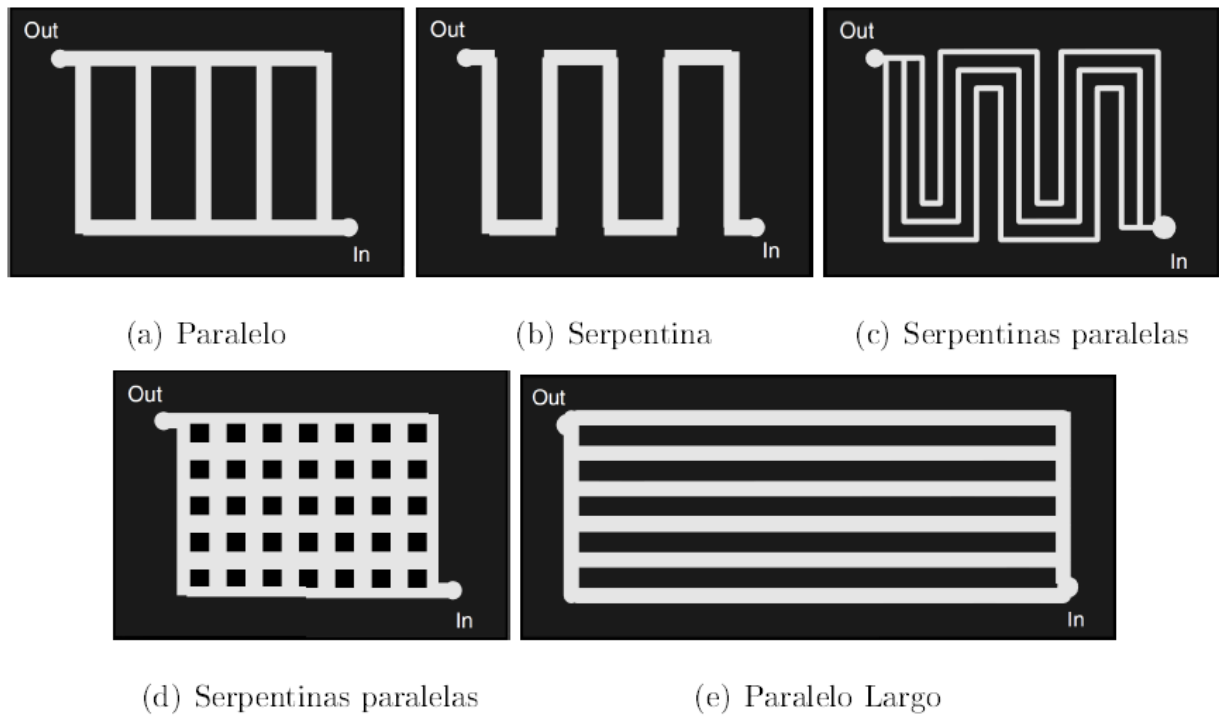


Figura 2.8 Diseños típicos de platos bipolares

Con respecto al diseño de los distintos tipos de platos bipolares como se muestra en la Figura 2.8, se debe considerar principalmente la alimentación de los gases ya que, es por estos canales por donde circularán los fluidos y estos podrían complicar el diseño final del Stack de celdas de combustible, dependiendo del diseño de los platos bipolares al necesitar o no un equipamiento más complejo de alimentación de los gases empleados.

Otro tipo de diseño y el que se ha optado como la mejor opción para la alimentación de cada una de las mono-celdas, es el Stack con tuberías internas, los cuales tienen mayor variedad con respecto a la forma de los canales, pero la forma de alimentación de los gases no difiere; el diseño de estos platos bipolares es más complejo ya que internamente deben estar presentes canales que son orificios entre celda y celda para alimentar a todas las mono-celdas con el combustible y el oxígeno.

De esta manera, el banco de celdas queda como un sólido bloque al que no se tiene acceso y solo los gases de suministro pueden ingresar y realizar la operación electroquímica para el cual es destinado el banco de celdas de combustible.

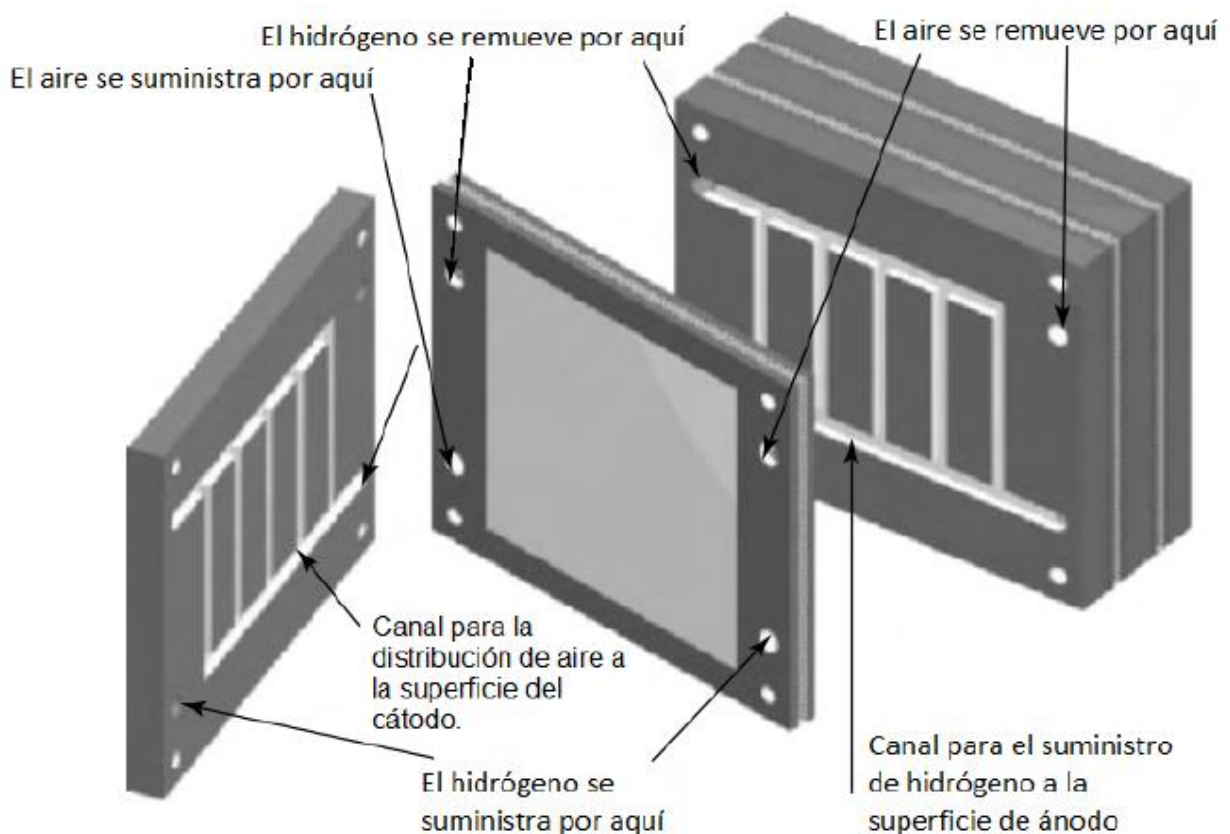


Figura 2.9 Esquema de un banco de celdas de combustible con canales internos

La figura 2.9 ilustra esta última opción para los platos bipolares, donde en el diseño se debe incluir los orificios de conducción de flujo del hidrogeno y del aire con respecto al suministro; una vez el hidrógeno y el aire ingresan, circulan por los canales de distribución en la superficie del ánodo y del cátodo respectivamente y por último el diseño muestra los orifios correspondiente a los canales por donde se extrae o remueve cada uno de los gases una vez culminada su circulación (esto se da para cada celda del banco).

2.3 Diseño conceptual del Banco de celdas de combustible

El primer paso para el modelo final del banco de celdas de combustible es conocer la aplicación y la potencia deseada que se desea alimentar a partir del banco de celdas, es por esto que como parte de los datos iniciales de este proyecto se obtiene el requisito de alimentar una residencia de 3kW; por otra parte como el banco de celdas de combustible genera un voltaje y corriente continua al colocarle una carga eléctrica, podemos decir que la potencia del banco de celdas, es igual al producto del voltaje y la corriente generada de la misma como se muestra en la ecuación (2.4).

$$W_{fc} = (V_{fc}) * (I_{fc}) \quad (2.4)$$

Donde:

W_{fc}: es la potencia del banco de celdas.

V_{fc}: es el voltaje del banco de celdas.

I_{fc}: Es la corriente de salida del banco de celdas.

Como se desea alimentar una residencia de 3kW, la potencia del banco de celdas de combustible debe ser mayor a esta potencia requerida y por efectos de diseño se puede considerar un factor de 1.5 a 2 veces la potencia deseada ya que normalmente en una residencia existen modificaciones y aumentos de cargas eléctricas y para alimentar estas cargas se necesita que el banco de celdas genere una alta cantidad de corriente.

Por lo tanto de la ecuación (2.4):

considerando un voltaje de 45 V por ejemplo:

$$I_{fc} = \frac{W_{fc}}{V_{fc}}$$

$$I_{fc} = \frac{6k W}{45 V}$$

$$I_{fc} = 133.33 A$$

De la misma manera, es importante conocer la densidad de corriente para una celda de combustible lo cual inicialmente no se conoce para un diseño de un banco de celdas, pero es posible su cálculo a partir de la potencia de salida deseada, la eficiencia, el voltaje y las limitaciones de volumen y peso. La corriente es el resultado del producto entre la densidad de corriente y el área transversal por el cual circula la misma, como se muestra en la ecuación (2.5).

$$I_{cell} = (\rho) * (A) \quad (2.5)$$

Donde:

I_{cell} : Es la corriente de una mono – celda.

ρ : Es la desidad de corriente de una mono – celda.

A : Es el área activa de una mono – celda.

El voltaje de una mono-celda y la densidad de corriente de la misma, están relacionados mediante la curva característica de polarización como se muestra en la ecuación (2.6).

$$V_{cell} = f(\rho) \quad (2.6)$$

Donde:

V_{cell} : Es el voltaje de la mono – celda.

ρ : Es la desidad de corriente de una mono – celda.

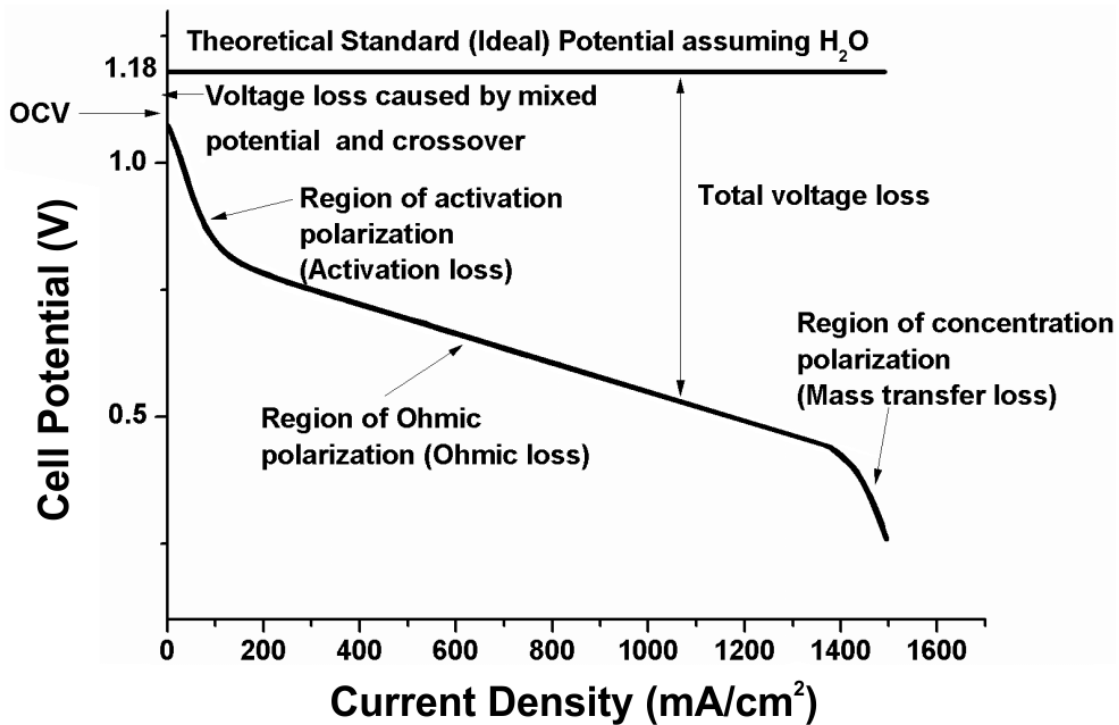


Figura 2.10 Curva de Polarización de una celda de combustible PEMFC

A partir de la curva de polarización se puede diseñar el banco de celdas de combustible, eligiendo como parte del diseño un voltaje alrededor de los 0.7 V para una sola celda y se tendría así la densidad de corriente que generaría la misma. El efecto de la selección del voltaje de la mono-celda depende de la precisión que se desea obtener en el diseño y de esta manera los expertos lo utilizan para afinar cálculos y estudios correspondientes.

Como se ha mencionado, se ha considerando un voltaje de 0.7V (voltaje promedio entre los valores de 0.6-0.8V que normalmente se utilizan para el diseño) para una mono-celda y se puede visualizar que para este valor de voltaje en la Figura 2.10, corresponde a un valor aproximado de 500 mA/cm² correspondiente a la densidad de corriente, de este modo se puede calcular el área efectiva de cada una de las celdas del banco deseado.

Por lo tanto, a partir de la corriente de 133.33 A hallada anteriormente

y la densidad de corriente de $500 \frac{mA}{cm^2}$ se tiene:

De la ecuacion (2.5):

$$A = \frac{I_{cell}}{\rho}$$

$$A = \frac{133.33 A}{500 mA/cm^2}$$

$$A = 266 cm^2$$

Donde este valor de área corresponde al área activa de las celdas de combustible; en otras palabras correspondería al área de los electrodos y con respecto al dimensionamiento se debe buscar dos valores para que el multiplo de los mismo sea igual o aproximado al valor de área activa previamente calculado; por lo tanto se podría definir las dimensiones de alto y de ancho de las celdas de combustible.

A partir del área activa

$$A = h * w \tag{2.7}$$

$$266 cm^2 = h * w$$

$$h * w = 18 * 15 = 270 cm^2$$

Por lo tanto:

$$h = 18cm$$

$$w = 15 cm$$

Donde:

h: Es la altura de las mono – celdas.

w = Es el ancho de las mono – celdas.

A : Es el área activa de una mono – celda.

De la misma manera se puede calcular uno de los parámetros más importantes a la hora del diseño de un banco de celdas de combustible, lo cual es el número de celdas que conformarán el Stack de hecho, como la conexión es en serie para este proyecto, cada voltaje individual realiza su contribución para el voltaje final del banco de celdas de combustible como lo muestra la ecuación (2.8).

$$V_{fc} = (N_{cell}) * (V_{cell}) \quad (2.8)$$

Donde:

V_{cell} : Es el voltaje de la mono – celda.

N_{cell} : Es el número de celdas del Stack.

V_{fc} : es el voltaje del banco de celdas.

Como previamente se conoce el voltaje de 0.7 V de cada celda de combustible a partir de la curva de polarización de la Figura 2.10 y además, se definió un voltaje de salida de la celda de 45V se puede calcular el número de celdas necesario para el requerimiento de banco de celdas según la ecuación (2.8).

A partir de la ecuación (2.8)

$$N_{cell} = \frac{V_{fc}}{V_{cell}}$$

$$N_{cell} = \frac{45V}{0.7V}$$

$$N_{cell} = 64.28 \text{ cells}$$

Este resultado obviamente no puede quedar con un valor decimal al tratarse de la cantidad de celdas de combustible que conforman el banco, por lo tanto, se redondea al inmediato superior, lo cual resultaría ser necesario 65 celdas en total para el Stack de celdas de combustible [10].

Adicional a esto, se puede aproximar la eficiencia del banco de celdas de combustible con la division entre el voltaje de cada una de las celdas (voltaje de la mono-celda) sobre un valor constante de 1.482 el cual resulta de las leyes químicas que gobiernan el comportamineto de las reacciones que se presentan dentro de cada una de las celdas del banco como se muestra en la ecuacion (2.9).

$$\eta_{st} = \frac{V_{cell}}{1.482} * 100\% \quad (2.9)$$

Donde:

η_{st} : *Es la eficiencia del Stack de celdas.*

V_{cell} : *Es el voltaje de la mono – celda.*

De la ecuación (2.9) podemos obtener la eficiencia:

$$\eta_{st} = \frac{0.7}{1.482} * 100\%$$

$$\eta_{st} = 47.23\%$$

En el diseño tradicional de los bancos de celdas de combustible se tiene la parte más importante a la hora de su funcionamiento que corresponde a los conjuntos de electrodos de membrana (MEA), juntas, placas bipolares y placas terminales, donde todos estos elementos que conforman el banco de celdas, estan sujetado mediante pernos o varillas para lograr una firmeza y no permitir que las partes se desalinien.

Para el correcto diseño y de una pila de combustible se debe conciderar los siguientes puntos mas relevantes:

- Las pérdidas resistivas deben mantenerse al minimo.
- El hidrógeo y el aire deben distribuirse uniformemente en el área activa de cada una de las celdas del banco.
- La pila debe ser un conjunto robusto y soportar las temperaturas del entorno.
- La temperatura debe ser uniforme en toda la pila de celdas.

- El electrólito no debe secarse ni tampoco inundarse de agua ya que se perdería eficiencia de la pila.
- El Stack de celdas debe estar sellado adecuadamente para garantizar que no hayan fugas de gases.

Como se ha mencionado, una de las formas más comunes a la hora del diseño de los conductos de circulación tanto para el combustible como para el oxidante, correspondientes a los platos bipolares es el que se muestra en la Figura (2.11), donde se muestra que los platos bipolares se encuentran en la sección central del apilamiento de celdas teniendo en sus dos caras conductos por el cual circulan el hidrógeno y el oxígeno respectivamente y en las placas unipolares solo se encuentra en una cara los conductos para la circulación del hidrógeno o del oxígeno según se trate del ánodo o del cátodo de la primera y última celda.

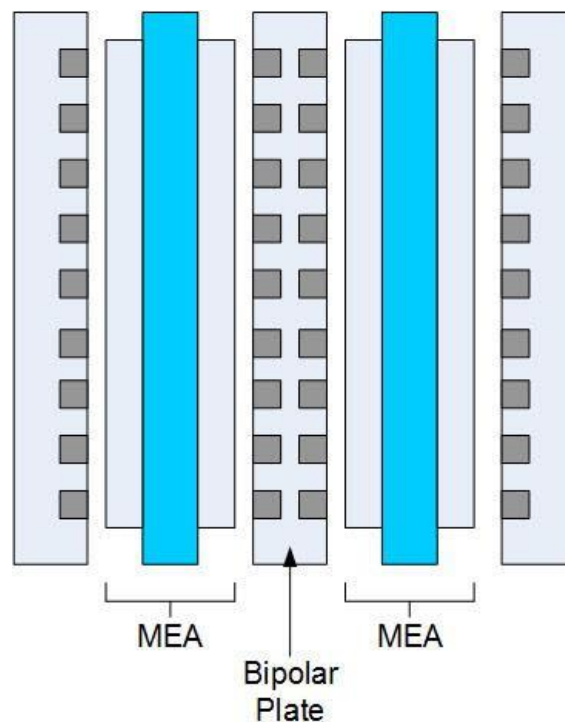


Figura 2.11 Configuración típica de una pila de combustible

2.4 Sistema experimental de Banco de celdas de combustible tipo PEM

Para que la pila de combustible trabaje de la mejor manera posible, se necesita de un sistema de control externo a la misma para poder generar la alimentación tanto del combustible como del aire, de esta manera en la literatura existen varios modelos de sistemas externos al banco que tratan de controlar las variables como presión, caudal, temperatura y humedad del Stack de celdas de combustible, todo esto con el fin de mejorar el rendimiento, elevar la eficiencia y producir una mejor vida útil del banco de celdas [8].

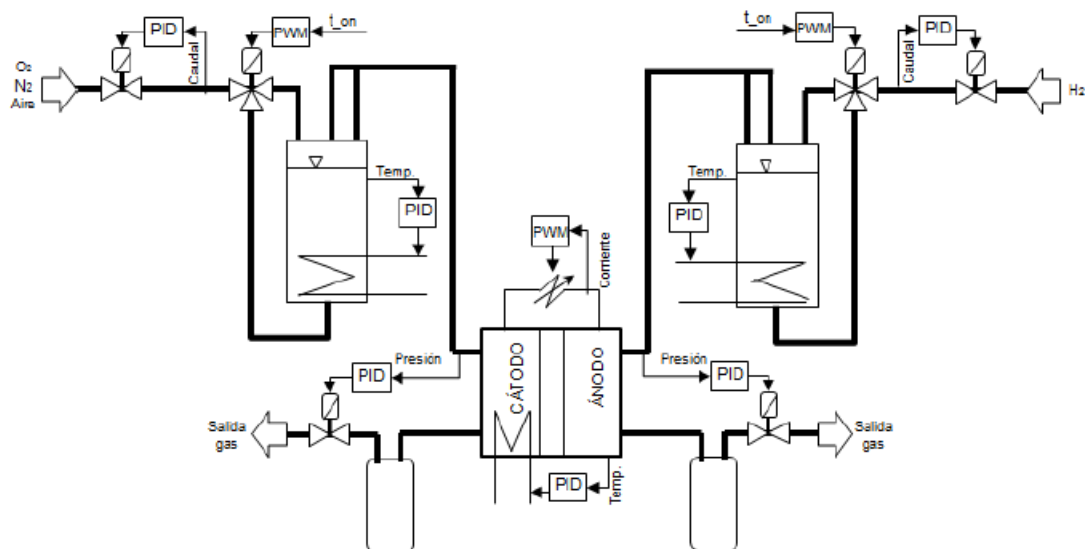


Figura 2.12 Sistema de circulación de los gases para una pila de combustible

Como se puede visualizar en la Figura 2.12 [10] y como se ha mencionado en el capítulo 1 de este documento, se tiene la alimentación del combustible (hidrógeno) por el ánodo de la pila a partir de un tanque que contiene al hidrógeno y por medio de una electroválvula se regula el ingreso hacia la pila de combustible, de forma similar ingresa el aire a partir de un compresor, el cual es el elemento electromecánico responsable de alimentar a la pila con aire a través del cátodo; de esta forma se garantiza la alimentación rápida de los reactivos necesarios para la pila de combustible, asegurando la rápida respuesta transitoria de la misma.

El sistema de control trata acerca de las variables a controlar, las cuales corresponden a las variables de temperatura, presión e hidratación de la membrana de la pila de combustible, para esto, este sistema cuenta con elementos de refrigeración, hidratación (humidificación) a través de una bomba para controlar la temperatura del banco de celdas, garantizando así que estas variables se encuentren dentro de los rangos válidos de actuación correspondientes.

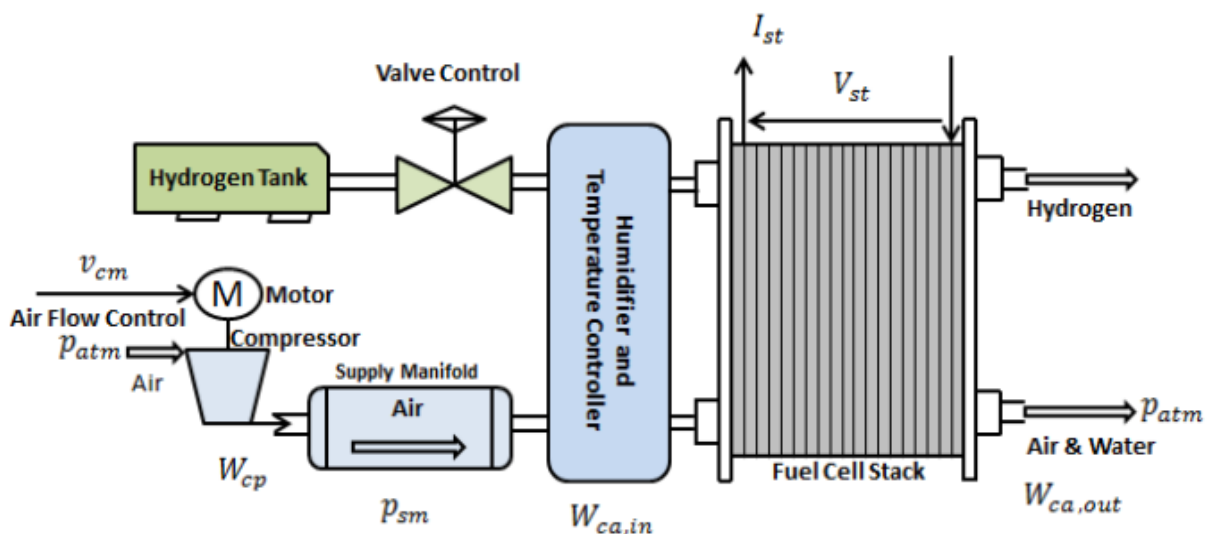


Figura 2.13 Control de alimentación del combustible y del aire a la PEMFC

El objetivo principal de un sistema de control para una pila de combustible PEMFC como lo muestra la Figura 2.13 [11], es proveer una respuesta transitoria rápida y proporcionar al equipo en general robustez y adaptación a la potencia requerida.

Lo que corresponde al suministro del combustible y del oxidante es parte del subsistema de variables de fluidos dinámicos, por otra parte, existe un segundo subsistema llamado variables eléctricas que corresponden al control de la temperatura de la pila de combustible y a las cargas eléctricas que se conecten en los terminales de salida de la misma, lo cual estas distintas cargas producirán un consumo de potencia y dependiendo de la característica (resistiva – resistiva inductiva) podremos visualizar la respuesta del banco de celdas que es el objetivo principal de este proyecto, lo cual significa obtener la caracterización del banco de celdas; cabe destacar que, como se trata de una simulación en general del proyecto, se recurre a distintos tipos de carga de

forma simulada haciendo referencia a los distintos tipos de cargas eléctricas que se encuentran dentro de una residencia.

Para lograr una correcta caracterización del Stack de celdas de combustible previamente calculado, se necesita definir ciertos rangos y parámetros de las variables a controlar correspondientes al suministro de los gases (temperatura, presión, humedad y caudal), como de la temperatura de la pila de combustible como se muestra en la tabla 2.2.

Variables por Controlar	Valor Mínimo	Valor Máximo
Caudal de Hidrógeno	0.05 [L/min]	84 [L/min]
Caudal de Oxígeno	0.05 [L/min]	500 [L/min]
Temperatura de H2 y O2	25 °C	120 °C
Presión de H2 y O2	0 [Bar]	5 [Bar]
Humedad de H2 y O2	0 [% HR]	100 [% HR]
Temperatura del Stack	20 [°C]	90 [°C]

Tabla 2.2 Rangos aceptables de las variables del sistema de control de la PEMFC

2.5 Modelo de la celda de combustible en Matlab - Simulink

De acuerdo con lo que se propone como objetivo de este proyecto que consta de un diseño conceptual y simulación de un banco de celdas de combustible, como metodología para lograr esto, se ha utilizado el software Matlab-Simulink para lograr la caracterización de un banco de celdas de combustible tipo PEMFC, gracias a un modelo en Simulink que se encuentra en la librería de este software, el cual nos ayudó a la simulación y posteriormente a obtener la respuesta de este banco de celdas.

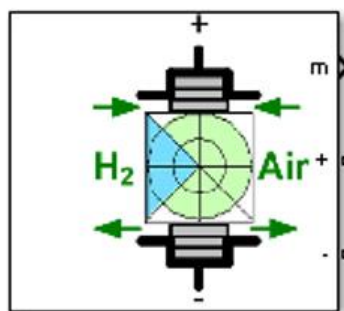


Figura 2.14 Bloque de un Stack de celdas de combustible en Simulink

A partir del modelo genérico de un banco de celdas de combustible que nos brinda Simulink, se realizó la configuración para que este bloque de simulación nos pueda ayudar a caracterizar el Stack de celdas.

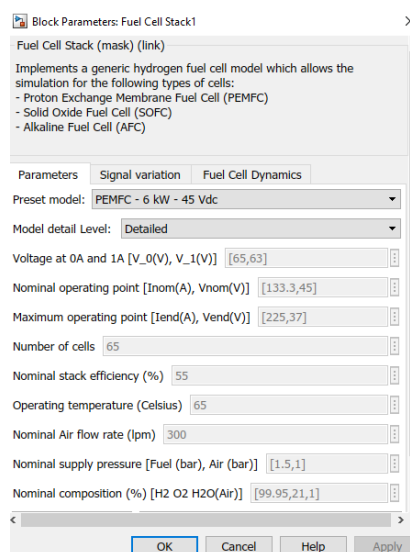


Figura 2.15 Bloque de Parámetros del banco de celdas de Simulink

El modelo de Simulink predefinido como el tipo de celdas PEMFC de 6 kilowatts, viene definido con un voltaje y corriente nominal de 133.3 amperios y 45 voltios DC, como se muestra en la Figura 2.15; el número de celdas es de 65 y la eficiencia nominal de todo el Banco es de El 55% además, la temperatura de operación es de 65°C y la tasa de flujo nominal de aire es de 300 litros por minuto como también se puede apreciar la presión nominal tanto del hidrógeno como del aire y son respectivamente de 1.5 Bar y de 1 Bar; adicional a esto como tenemos alimentación o el también llamado combustible que es el hidrógeno, en este caso este tiene una composición nominal del 99.95%, el otro componente que se tiene es el oxígeno el cual tiene un porcentaje del 21% en el aire y el agua en el aire se considera del 1%; estos son los parámetros considerados en el modelo predefinido de un Banco de celdas del tipo de membrana de intercambio protónico por sus siglas en inglés PEMFC [13], los cuales pueden ser modificados fácilmente.

El modelo de Simulink nos permite la elección de un modelo simplificado y un modelo detallado, en este caso se ha realizado la simulación para este proyecto con el modelo detallado donde este último representa un Banco de celdas de combustible que al variar los parámetros tales como la presión, la temperatura, las composiciones y los caudales, tanto del combustible como del aire van a generar una variación en la respuesta del banco de celdas que especialmente afectan al voltaje del circuito abierto, a la corriente de intercambio y a la pendiente de Tafel.

Las siguientes ecuaciones muestran de forma directa como influyen los parámetros antes mencionados en los cálculos internos que tiene este bloque de Simulink:

$$E_{OC} = K_c E_n \quad (2.10)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})\Delta v}{Rh} e^{\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right)} \quad (2.11)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F} \quad (2.12)$$

Donde:

$R: 8.3145 \text{ J}/(\text{molK})$

$F: 96485 \text{ A s/mol}$

z : número de electrones en movimiento

E_n : voltaje de Nerst, que es el voltaje termodinámico de las celdas.

α : Coeficiente de transferencia de carga.

P_{H_2} : Presión parcial del hidrógeno dentro de la pila [Pa].

P_{O_2} : Presión parcial del oxígeno dentro del banco [Pa].

k : Constante de Boltzmann $\left(1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}\right)$.

h : Constante de Planck $(6.626 \times 10^{-34} \text{ Js})$.

Δv : Factor de volumen de la barrera de activación (m^3).

ΔG : Tamaño de la barrera de activación que depende del tipo de electrodo $\left(\frac{\text{J}}{\text{mol}}\right)$.

T : Temperatura de operación (K).

K_C : Constante de tensión en condiciones nominales de funcionamiento.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del circuito equivalente del Banco de celdas del modelo detallado que nos proporciona Simulink, donde en el bloque a ingresan los parámetros tales como la presión tanto del hidrógeno como del oxígeno, la temperatura de operación del Banco, la tasa de cambio o también llamado caudal del hidrógeno y del oxígeno medidos en litros por minuto y también podemos agregar el porcentaje de composición del hidrógeno y del oxígeno con los valores de porcentaje antes mencionados.

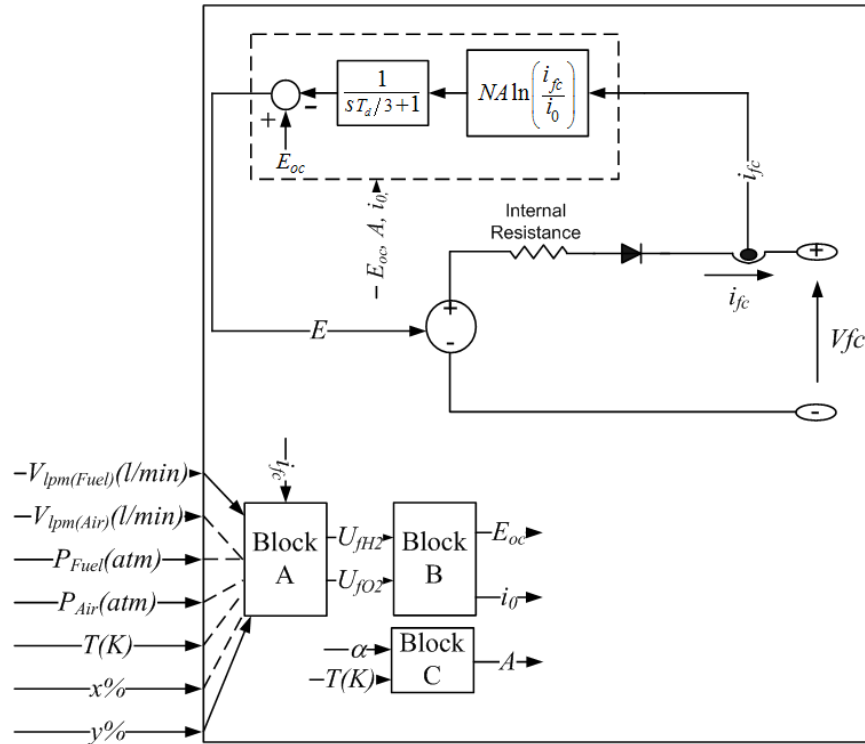


Figura 2.16 Circuito equivalente del banco de celdas del modelo detallado de Simulink

Como se puede apreciar en la Figura 2.16, en el bloque internamente se determina la razón de la conversión de hidrógeno y del oxígeno como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$U_{fH2} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{lpm}(fuel)x\%} \quad (2.13)$$

$$U_{fO2} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}V_{lpm}(air)y\%} \quad (2.14)$$

P_{fuel} : Presión absoluta a la que se suministra el combustible [atm].

P_{air} : Presión absoluta a la que se suministra el aire [atm].

$V_{lpm}(fuel)$: Caudal de combustible [l/min].

$V_{lpm}(air)$: Caudal de aire [l/min].

x : Porcentaje de hidrógeno en el combustible[%].

y : Porcentaje de oxígeno en el aire[%].

N : Número de celdas en el banco.

Y la constante 60000 viene dada de la conversión de la razón de flujo en (L/min) usado por el modelo a (m³/s), en cuyo caso 1 L/min = 1/60000 m³/s.

El bloque B determina el voltaje de Nernst y la presión parcial del hidrógeno, oxígeno y agua como se muestra en las ecuaciones a continuación:

$$P_{H_2} = (1 - U_{fH_2})x\%P_{fuel} \quad (2.15)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{fO_2})y\%P_{air} \quad (2.16)$$

$$P_{H_2O} = (w + 2y\%U_{fO_2})P_{air} \quad (2.17)$$

$$E_N \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}) \text{ cuando } T \leq 100^\circ \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) \text{ cuando } T > 100^\circ \end{cases} \quad (2.18)$$

Donde:

P_{H_2O} : Presión de vapor de agua en el interior del banco [atm].

w : Porcentaje de vapor de agua en el oxidante [%].

Los nuevos valores para el voltaje de circuito abierto (E_{oc}) y la corriente de intercambio (i_o) pueden ser calculados a partir de la presión parcial de los gases y del voltaje de Nernst [9].

El bloque "C" calcula el nuevo valor de la pendiente de Tafel (A). Los parámetros α , ΔG y K_c se calculan con base en la curva de polarización en condiciones nominales de operación junto con algunos parámetros adicionales, como la eficiencia de bajo poder calorífico de la chimenea, la composición del combustible y el aire, las presiones de suministro y temperaturas se pueden obtener fácilmente de la hoja de datos del fabricante. Las tasas nominales de conversión de gases se calculan de acuerdo con las ecuaciones 2.19 y 2.20:

$$U_{fH_2} = \frac{\mu_{nom} \Delta h^\circ (H_2O(gas))N}{zFV_{nom}} \quad (2.19)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{2zFP_{air_{nom}}V_{lpm(air)_{nom}}0.21} \quad (2.20)$$

Donde:

μ_{nom} : Eficiencia LHV nominal del banco (%).

$\Delta h^\circ (H_2O(gas))$: $241.83 \times 10^3 \frac{J}{mol}$

V_{nom} : Voltaje nominal [V].

I_{nom} : Corriente nominal [A].

$V_{lpm(air)_{nom}}$: Caudal de aire nominal [l/min].

$P_{air_{nom}}$: Presión de suministro de aire nominal [Pa].

T_{nom} : Temperatura nominal de operación [K].

Si no hay combustible ni aire en la entrada de la chimenea, se supone que la chimenea está operando a una tasa fija de conversión de gases (tasa de conversión nominal), es decir, el suministro de gases se ajusta de acuerdo con la corriente para que siempre reciben un poco más de lo que necesita la pila con cualquier carga.

La corriente máxima que puede entregar la pila está limitada por las tasas máximas de flujo de combustible y aire que se pueden alcanzar. Más allá de esa corriente máxima, la salida de voltaje de la pila disminuye abruptamente a medida que se extrae más corriente [15].

De la misma manera, se detallan las ecuaciones de los caudales tanto del hidrógeno como del aire en unidades de litros por minuto (l/min), lo cual se puede evidenciar que estos caudales dependen de algunos parámetros del banco de celdas de combustible.

$$V_{ipm(air)_{nom}} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{2zFP_{air_{nom}}(0.5)(0.21)} \quad (2.21)$$

$$V_{ipm(fuel)_{nom}} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{zFP_{fuel_{nom}}(0.9965)(0.9995)} \quad (2.22)$$

Donde las variables presentes en las ecuaciones 2.21 y 2.22 han sido descritas en las ecuaciones anteriores, pero se debe destacar los valores constantes de 0.5 y de 0.21 de la ecuación de caudal del aire ya que estos valores representan al 50% de utilización del aire por parte del banco de celdas y del 21% de presencia del oxígeno en el aire; de la misma manera los valores de 0.9965 y 0.9995 representan el porcentaje de utilización del hidrógeno y la presencia porcentual del hidrógeno considerado puro respectivamente.

2.6 Circuito en Simulink para la caracterización del banco de celdas de combustible

A continuación se muestra en la Figura 2.17 el circuito para la caracterización del Banco de celdas de combustible, cabe destacar que en el proceso de simulación evidentemente tendremos respuestas de acuerdo a lo que es una simulación y si queremos obtener resultados ya al nivel realista pues, tendríamos que realizar pruebas que se ajusten a los parámetros para obtener la caracterización o resultados de un banco de celdas de combustible físico, que se ajuste lo más cercano posible a los parámetros antes calculados, como son el área activa de la celda y los aspectos de diseño de voltaje de 0.7 voltios de cada una de las mono-celdas, además de la densidad de corriente según la curva de polarización de la Figura 2.10.

Por otro lado el modelo de Simulink nos proporciona ciertas limitaciones al momento de realizar las simulaciones ya que, como es conocido para un rendimiento y eficiencia óptima del banco de celdas se necesitaría tener el control y la optimización de los parámetros de alimentación al Banco o al Stack de celdas de combustible, los también conocidos como presión de hidrógeno, presión de oxígeno, caudales tanto de hidrógeno y de oxígeno, temperatura del Banco de celdas y el proceso de humidificación que es el que permite que cada una de las celdas en el proceso electroquímico no se vean afectados por falta de humedad ni tampoco se vean inundados por la presencia de excesiva cantidad de agua, pero como se recalca, estos resultados que se mostrarán más adelante en el capítulo 3 no salen del entorno de una simulación y de las limitaciones que tenemos alrededor de este software, pero nos puede dar una idea de cómo va a responder nuestro Banco de celdas y podemos tener una visualización general de cómo va a responder el Stack de celdas de combustible.

Dicho esto, a continuación, se muestra la Figura 2.17 donde se tiene un sistema para la alimentación de una residencia de 3kW, utilizando un banco de celdas de combustible en Matlab-Simulink y se va a detallar cada uno de los bloques que conforman este circuito, las gráficas y la respuesta del banco de celdas de combustible.

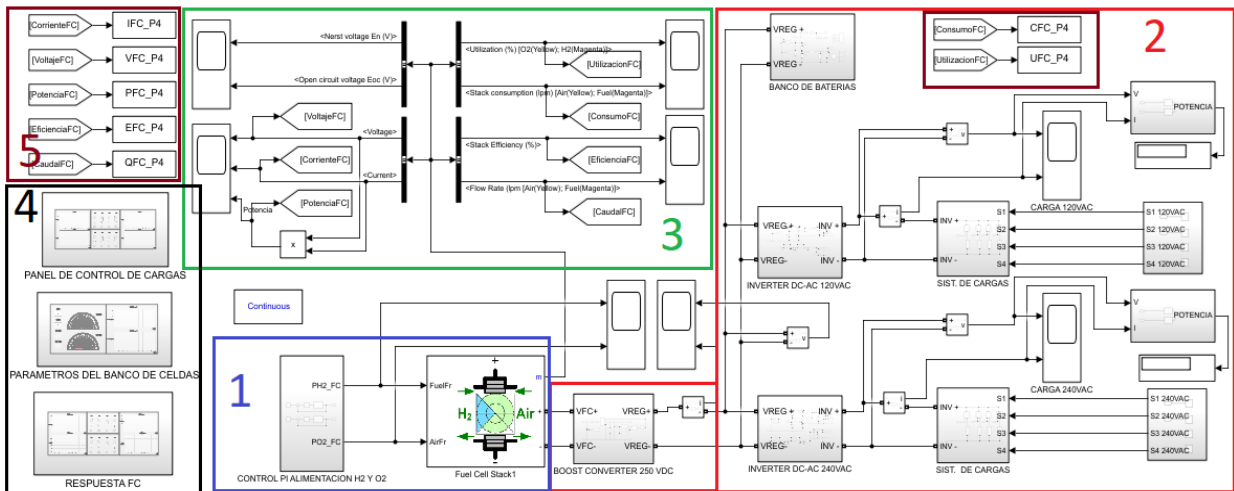


Figura 2.17 Circuito para la caracterización del banco de celdas en Simulink

La Figura 2.17 muestra el circuito o sistema completo para lograr la caracterización del banco de celdas de combustible en el software Matlab-Simulink, dicho circuito está claramente seccionado por distintos subsistemas que podríamos identificar como:

- 1) El primero subsistema (encerrado de color azul) corresponde al banco de celdas de combustible con su respectiva alimentación que consta de un control proporcional integral para la alimentación de presión, tanto para el hidrógeno como para el oxígeno.
- 2) El segundo subsistema (encerrado de color rojo) corresponde a la parte de la electrónica de potencia que nos permite obtener señales, tanto de voltaje como de corriente alterna presente en la carga a partir de la salida de nuestro banco de celdas que es un voltaje DC.
- 3) El tercer subsistema (encerrado de color verde) corresponde a la respuesta que tiene nuestro banco de celdas de combustible, en lo cual se ha identificado las respuestas más relevantes a nuestro Stack donde, las respuestas más importantes serían el voltaje, la corriente y la potencia del banco de celda en cada instante de tiempo, el voltaje de Nerst y el voltaje del circuito abierto, así como el porcentaje de utilización tanto de hidrógeno como de oxígeno y los

caudales de flujo tanto del hidrógeno como del oxígeno en unidades de litros por minuto, además de la eficiencia del Stack en cada instante de la simulación.

- 4) El cuarto subsistema (encerrado de color negro) corresponde a las interfases o pantallas de visualización y control de carga para la caracterización del banco.
- 5) El quinto subsistema (encerrado de color café) corresponde a bloques "Toworkspace" para generar gráficas desde Simulink a Matlab para mejor visualización y análisis de resultados.

Con respecto al primer seccionado de nuestro diagrama o circuito realizado en Simulink tenemos la parte del control PI para la alimentación de la presión de hidrógeno y de oxígeno, donde se ha tomado de la literatura el modelo equivalente de una electroválvula como ya es de conocimiento de la materia sistemas de control por ejemplo, donde los valores de cero 0.8 y 0.5, son valores en general promedios de los valores que se toman en la literatura, ya es de conocimiento que la función de transferencia de una electroválvula es en realidad de segundo orden, pero para facilitar el cálculo y su correspondiente diseño del controlador, en este caso un controlador proporcional integral, el modelo de la electroválvula puede ser aproximado a un modelo matemático de primer orden.

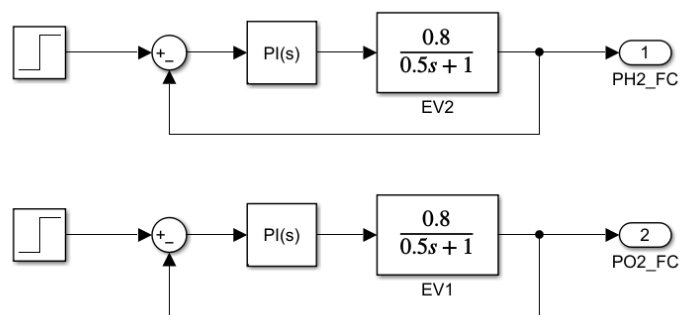


Figura 2.18 Subsistema Control PI para la alimentación de PH2 y PO2

Los cálculos que conllevan a la obtención del controlador proporcional integral se los ha realizado conforme a lo aprendido en la materia sistemas de control, donde ya teniendo

la función de transferencia o la planta entre comillas, quien para este caso serían las electroválvulas para controlar pues, el controlador sería calculado de manera sencilla; a continuación, se detallan los cálculos y la obtención de cada uno de los parámetros KP y KI de controlador PI.

Función de transferencia del controlador PI

$$G_c = \frac{(K_p)s + (K_i)}{s}$$

Función de transferencia de la electroválvula

$$G_{ev} = \frac{C_v}{\zeta s + 1}$$

Función de transferencia en lazo cerrado

$$G_T = \frac{C_v(K_p)s + (C_v)(K_i)}{\zeta s^2 + (C_v K_p + 1)s + (C_v K_i)}$$

Función de transferencia de segundo orden a comparar

$$G_T = \frac{W_n^2}{s^2 + (2\zeta W_n)s + W_n^2}$$

Con parámetros de diseño de T_s de 1 seg. y de un OS% del 1%

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{OS\%}{100\%}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{OS\%}{100\%}\right)\right)^2}}$$

$$\zeta = 0.82$$

$$T_s = 1 \text{ seg} = \frac{4}{W_n \zeta}$$

$$W_n = 4.84$$

Por lo tanto:

$$s^2 + (2\zeta W_n)s + W_n^2 = s^2 + \left(\frac{C_v K_p + 1}{\zeta}\right)s + \left(\frac{C_v K_i}{\zeta}\right)$$

$$Kp = \frac{8\zeta - 1}{Cv}$$

$$Ki = \frac{23.42\zeta}{Cv}$$

Con ζ igual a 0.5 y Cv de 0.8 tenemos:

$$Kp = 3.75$$

$$Ki = 14.64$$

De esta manera se obtiene el controlador PI que nos permite controlar la presión de hidrógeno y de oxígeno como alimentación al banco de celdas; es así como podemos obtener de manera fija la alimentación y a partir de aquí realizar la caracterización del Stack a distintos niveles de presión de hidrógeno y de oxígeno.

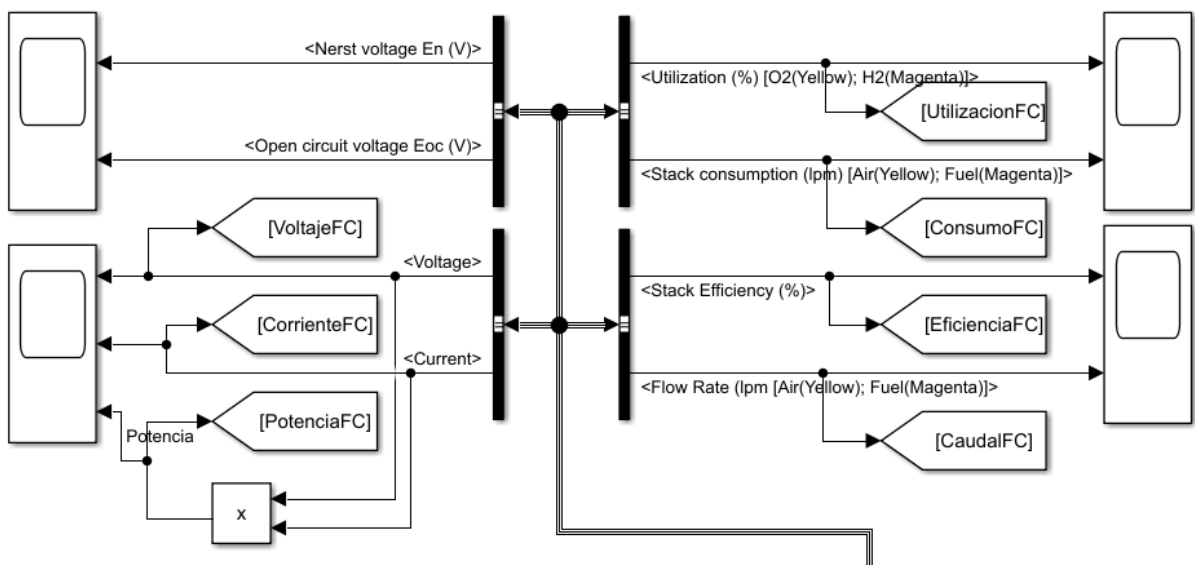


Figura 2.19 Respuesta del Banco de celdas de combustible

Como se puede apreciar en la Figura 2.19, Simulink nos brinda la respuesta del banco de celdas de combustible a partir de los parámetros de entrada o previamente configurados dentro del mismo bloque, por lo cual por medio del conocido “Bus Selector”, podemos graficar cada una de las señales en los “Scope” que provienen del banco de celdas.

Adicional a lo anterior se ha generado la multiplicación de las variables de voltaje y corriente del banco para visualizar de igual forma la potencia del Stack de celdas. Podemos ver en la Figura 2.19 el circuito para obtener la respuesta del banco con respecto a la eficiencia, el consumo, voltaje de Nerst, voltaje de circuito abierto, caudal de hidrógeno y de oxígeno, el porcentaje de utilización etc.

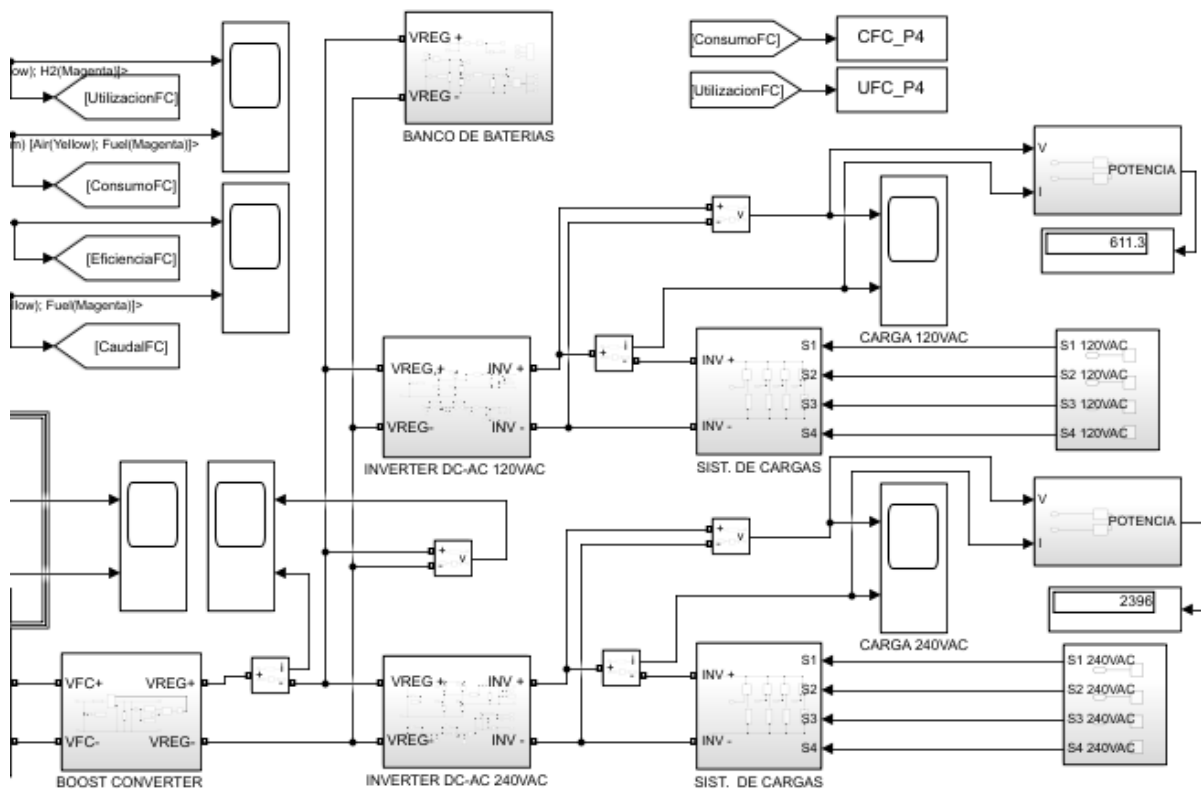


Figura 2.20 Electrónica de potencia para la alimentación residencial

Para lograr la obtención del voltaje alterno para alimentar una residencia de alrededor 3 kW a partir del voltaje DC generado por nuestro banco de celdas de combustible, se necesita un sistema controlado de electrónica de potencia, como los convertidores e inversores, para lograr elevar el voltaje generado por el banco de celdas y además realizar la inversión de esta elevación de voltaje a un voltaje alterno.

Es de preocupación por el diseñador presentar un modelo de control proporcional integral para lograr que el voltaje proporcionado por este sistema no se vea afectado al

momento de variar la carga que, en este caso, por efectos de simulación serían los electrodomésticos presentes en la residencia.

A partir del banco de celdas de combustible, se conecta un “Boost converter” de 250 Vdc, el cual nos permite elevar la tensión de salida del banco por dos motivos principales, el primero para mantener un voltaje constante a partir de la entrada variable de tensión proveniente de la pila de combustible y la segunda razón es que, para los inversores se necesita generar un voltaje pico de 120 Vac y 240 Vac, por lo cual en Simulink se diseñó un controlador para estos inversores, para lo cual, como voltaje de entrada (salida del “boost converter” de 250Vdc) se necesita un voltaje mayor al que se desea generar (120 Vac y 240 Vac), por lo tanto se ha elegido un voltaje de 250 Vdc para que ingrese al inversor.

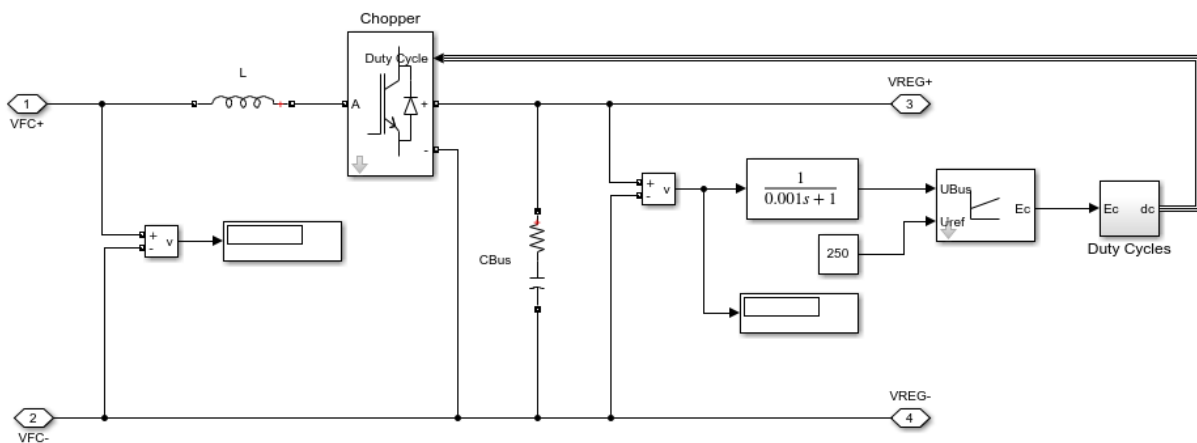


Figura 2.21 Subsistema Boost Converter 250 VDC

LA Figura 2.21 presenta al convertidor elevador (Boost converter), el cual nos permite elevar a la tensión a los 250 Vdc detallados anteriormente, este convertidor en especial es un diseño de Matlab-Simulink, el cual lo podemos encontrar en la página oficial de Matlab y sus valores en este diseño nos permiten colocar una referencia de tensión desde 100 a 250 Vdc, pero el límite superior de referencia dependerá además de el voltaje de entrada, es decir el voltaje generado por el banco de celdas. Como parte de los cálculos se detalla a continuación los valores, tanto del capacitor como del inductor.

Los datos iniciales para diseñar el convertidor elevador serían:

$$V_{in} = 45V$$

$$V_o = 250V$$

$$f_{sw} = 25K \text{ Hz}$$

$$V_{ripple} = 60mV$$

A partir de las ecuaciones para el diseño de un boost converter

tenemos:

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{45V}{250V}$$

$$\mathbf{D = 0.82}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R}$$

$$I_o = \frac{250V}{20\Omega}$$

$$\mathbf{I_o = 12.5A}$$

$$\Delta I = (0.3)(I_o)\left(\frac{V_o}{V_{in}}\right)$$

$$\Delta I = (0.3)(12.5)\left(\frac{250}{45}\right)$$

$$\Delta I = 20.83 \text{ A}$$

Por lo tanto se obtienen el inductor y el capacitor del convertidor elevador

$$L = \frac{V_{in}(V_o - V_{in})}{(\Delta I)(F_{sw})(V_o)}$$

$$L = \frac{45(250 - 45)}{(20.83)(25k \text{ Hz})(250)}$$

$$L = 70.86 \mu\text{H}$$

$$C = \frac{(I_o)(D)}{(\Delta V)(F_{sw})}$$

$$C = \frac{(12.5)(0.82)}{(60m)(25K)}$$

$$C = 6.83 \text{ mF}$$

Donde estos valores de capacitancia e inductancia son valores mínimos que se deben colocar en el diseño del convertidor elevador.

Se ha diseñado un inversor DC-AC con controlador PI, el cual nos permitirá obtener un rango determinado de valores de tensión a la salida del inversor; se lo ha realizado con un controlador PI con dos finalidades, la primera es que se desea controlar el voltaje de salida del inversor al momento de variar la carga para realizar la caracterización del banco de celdas, en otras palabras al variar la carga en una residencia, el voltaje de salida del inversor debe ser lo más constante posible con un margen de error de máximo el 5% de reducción o aumento considerando el voltaje RMS; la segunda finalidad del controlador PI es que se diseña de esta manera para utilizarlo en la inversión del voltaje para generar dos tensiones de salida AC de 120 y 240 VAC para nuestro sistema de cargas, el cual simula los electrodomésticos y cargas en general de una residencia.

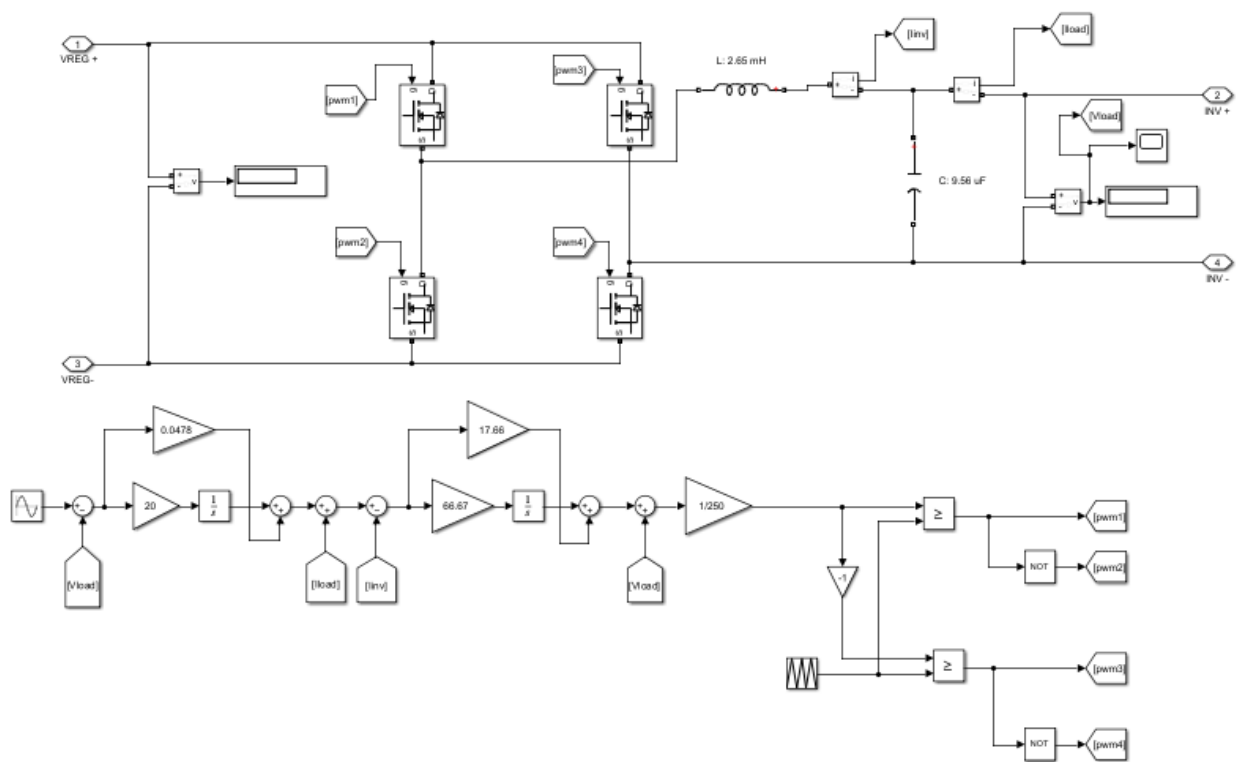


Figura 2.22 Subsistema Inverter DC-AC 120/240 VAC

De esta forma, al tener un convertidor elevador garantizamos un voltaje elevado de 250Vdc como se muestra en la Figura 2.21 para la entrada en el inversor, que a partir del controlador PI del mismo podemos variar el set point y generar así salidas de tensión de 120 y 240 Vac utilizando el mismo modelo como se muestra en la Figura 2.22; es decir el mismo modelo del inversor se ha utilizado para generar las salidas de tensión alterna de 120Vac y de 240Vac únicamente cambiando el valor de referencia de tensión RMS. A continuación, se detalla los cálculos obtenidos para el inversor.

Como es de conocimiento, el inversor generará un voltaje máximo de tensión de acuerdo con el nivel de tensión que se presenta en la entrada (250 Vdc), por lo tanto, como se trata de un inversor monofásico tipo puente se necesita controlar los Mosfet de potencia para generar la inversión, así mismo se necesita controlar la tensión de salida del mismo a partir del voltaje de salida, corriente del inductor y corriente de la carga, teniendo así dos controladores PI.

Diseño del filtro LC para el inversor

Inicialmete se tiene los parámetros de diseño:

$$V_{in} = 250 \text{ Vdc}$$

$$V_o = 240 \text{ Vdc}$$

$$P_o = 2 \text{ kW}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$f_{sw} = 10k \text{ Hz}$$

$$THD = 5 \%$$

$$\Delta I = 20 \%$$

Por lo tanto se tiene:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{2K}{240V}$$

$$I_o = \mathbf{8.33 \text{ A}}$$

$$\Delta I_{ppmax} = (0.2)(I_o)(\sqrt{2})$$

$$\Delta I_{ppmax} = \mathbf{2.36 \text{ A}}$$

Por lo tanto se tiene para el filtro LC:

$$L = \frac{V_{dc}}{(4)(f_{sw})(\Delta I_{ppmax})}$$

$$L = \frac{250V}{(4)(10K)(2.36A)}$$

$$L = \mathbf{2.65 \text{ mH}}$$

$$C = \left(\frac{1}{L}\right)\left(\frac{10}{2\pi f_{sw}}\right)^2$$

$$C = \left(\frac{1}{2.65m}\right)\left(\frac{10}{2\pi(10k)}\right)^2$$

$$C = 9.56 \mu F$$

De esta manera obtenemos el filtro LC como se muestra en la Figura 2.22 antes de la conexión a la carga, que nos permite generar una curva más suave parecida a una onda senoidal que es la que deseamos; la implementación y diseño del filtro se realiza debido a que la señal invertida es del tipo cuadrada, donde si bien es cierto es una señal AC, no se parece a una señal senoidal como la que se requiere para una residencia. El diseño del controlador PI se presenta a continuación.

Diseño del controlador PI para el inversor:

Para el controlador se implementan parámetros iniciales

como el tiempo de sensado o respuesta y

la resistencia interna del capacitor y del inductor

Por ejemplo un tiempo de sensado o respuesta de:

$T = 200 \mu \text{ seg}$ y una resistencia interna del capacitor de $R_c = 4 \text{ m } \Omega$

El primer controlador PI se calcula de manera sencilla:

$$K_p = \frac{C}{T}$$

$$K_p = \frac{9.56 \mu F}{200 \mu \text{ seg}}$$

$$K_p = 0.0478$$

$$K_i = \frac{R_c}{T}$$

$$K_i = \frac{4m\Omega}{200u\text{ seg}}$$

$$\mathbf{K_i = 20}$$

De la misma manera el segundo controlador PI

donde T = 150u seg y la resistencia interna del inductor

por ejemplo de Rl = 1mH

$$K_p = \frac{L}{T}$$

$$K_p = \frac{2.65mH}{150u\text{ seg}}$$

$$\mathbf{Kp = 17.66}$$

$$K_i = \frac{R_l}{T}$$

$$K_i = \frac{1m\Omega}{150u\text{ seg}}$$

$$\mathbf{K_i = 6.67}$$

Como resultado tenemos un modelo de inversor monofásico tipo puente que posee un control en lazo cerrado como se muestra en la Figura 2.22, donde podemos obtener distintos niveles de tensión en alterna, que como nivel máximo será el voltaje de entrada del inversor, es decir los 250 Vdc que salen de Boost converter; de esta manera se ha utilizado el mismo modelo del inversor en lazo cerrado para generar los 120Vac y los 240Vac (2 subsistemas con el mismo diseño del inversor como se muestra en la Figura 2.20) para alimentar las distintas cargas de la residencia en forma de simulación.

Al tratarse de un sistema autónomo (off Grid), nuestro Banco de celdas de combustible será capaz de generar electricidad mientras se le suministre hidrógeno y oxígeno al ánodo y al cátodo respectivamente de cada mono-celda que conforma el banco; pero como parte de añadir un sistema de respaldo al sistema de celdas de combustible, se ha calculado un respaldo de baterías (48V/150Ah cada una) para que en el caso de que se llegue tener algún inconveniente de falta de hidrógeno por ejemplo, podamos alimentar la residencia utilizando el mismo sistema pero a partir del banco de baterías; cabe destacar que este sistema queda totalmente fuera de lo que corresponde a la caracterización del banco de celdas de combustible y la respuesta del mismo.

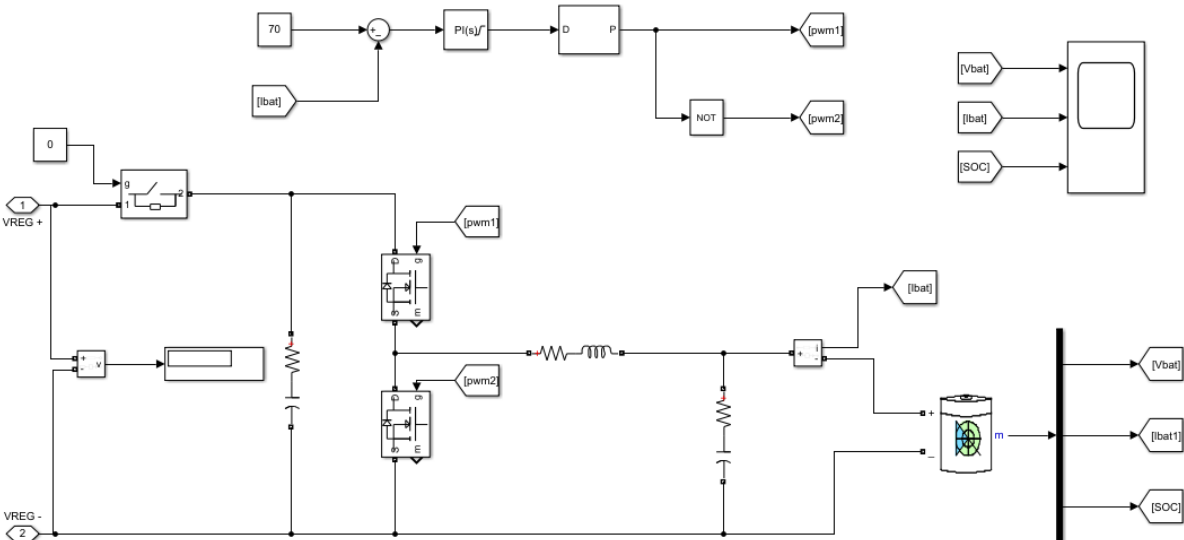


Figura 2.23 Subsistema del Banco de Baterías de 48V

De la misma manera que se realiza un sistema de respaldo de energía en los sistemas fotovoltaicos, se puede realizar un sistema de banco de baterías para alimentar momentáneamente nuestra residencia y el cálculo se lo puede visualizar en la sección 2.7.4 de este capítulo donde se detallan los equipos para una implementación física de este sistema. Pero para efectos de simulación se ha realizado el diseño de un banco de baterías en Simulink como se muestra en la Figura 2.23 y se presenta a continuación el cálculo de este subsistema.

*Inicialmente se tienen los parámetros de diseño
para el banco de baterías:*

$$V_{in} = 250 \text{ Vdc}$$

$$V_o = 48 \text{ Vdc}$$

$$f_{sw} = 5k \text{ Hz}$$

$$V_{ripple} = 0.36 \text{ V}$$

$$I_{ripple} = 3 \text{ A}$$

Por lo tanto para el Buck Converter se tiene:

$$L = \frac{V_o(V_{in} - V_o)}{(I_{ripple})(f_{sw})(V_{in})}$$

$$L = \frac{48(250 - 48)}{(3)(5k)(250)}$$

$$\mathbf{L = 2.58 \text{ mH}}$$

$$C = \frac{I_{ripple}}{(8)(f_{sw})(V_{ripple})}$$

$$C = \frac{(3)}{(8)(5k)(0.36)}$$

$$\mathbf{C = 208.3 \text{ }\mu\text{F}}$$

Los valores de inductancia y capacitancia hallados anteriormente corresponden al convertidor reductor que se muestra en la Figura 2.23, donde los valores de resistencia interna para el inductor y para el capacitor tienen un valor de 0.0001 ohmios, además el filtro capacitivo en paralelo a la entrada tiene un valor de 1000 microfaradios de capacitancia y una resistencia interna de 0.0001 ohmios; el controlador PI de este subsistema de la Figura 2.23 fue determinado por Ziegler y Nichols donde, se obtuvieron las constantes proporcional e integral de 1.5 y 25 respectivamente.

Para obtener una mejor visualización de la respuesta del banco de celdas de combustible al momento de la caracterización, se ha añadido 3 pantallas para mejor visualización y presentación del proyecto, donde en la Figura 2.24 se muestra la pantalla correspondiente a la respuesta del banco, haciendo referencia al voltaje, corriente, potencia y eficiencia con respecto al tiempo y en la parte central se tiene el control de los interruptores para activar las cargas de la residencia tanto de 120Vac como de 240Vac.

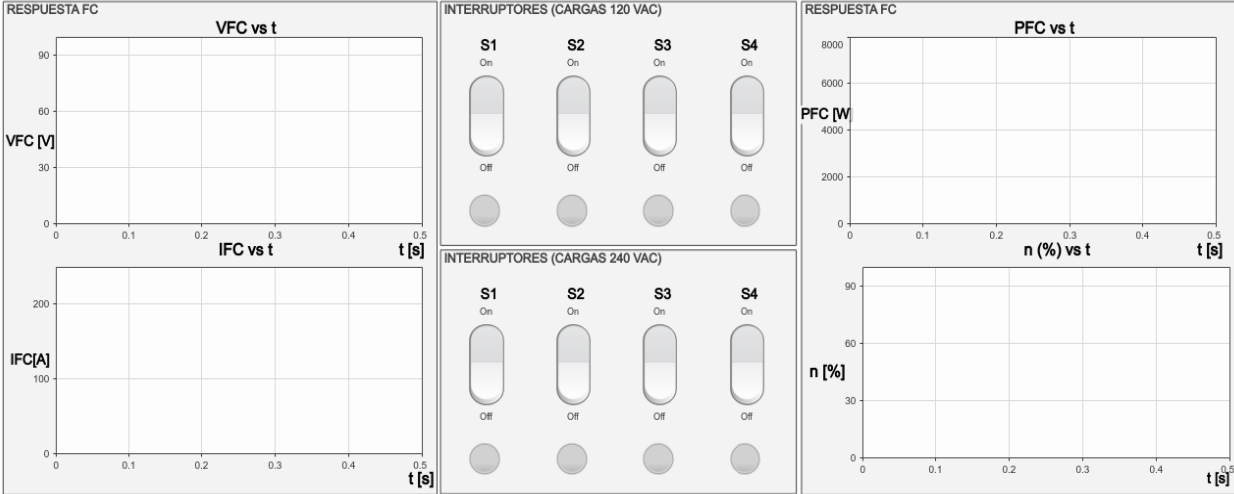


Figura 2.24 Respuesta del banco de celdas de combustible



Figura 2.25 Parámetros del Banco de celdas de combustible

De la misma manera se presenta en la Figura 2.25 los parámetros iniciales para la caracterización del banco a niveles constantes de temperatura, caudal y presión; en la Figura 2.26 se muestra las gráficas de tensión y corriente alterna con respecto al tiempo en la salida de los inversores de 120 y 240Vac, para visualizar si existe algún cambio de nivel de tensión alterna al variar el sistema de carga de la residencia.

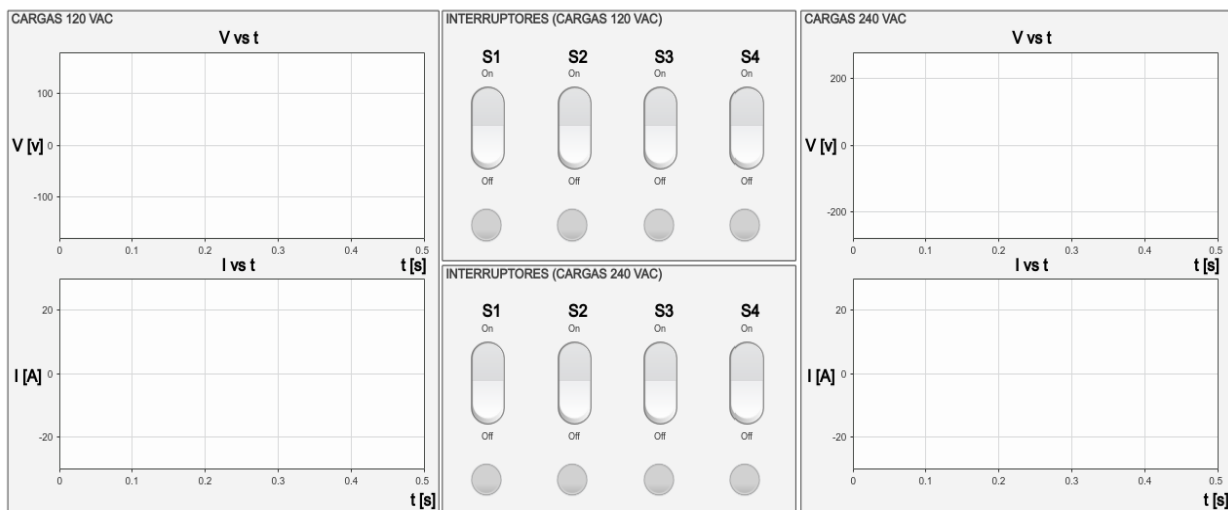


Figura 2.26 Panel de control de los interruptores

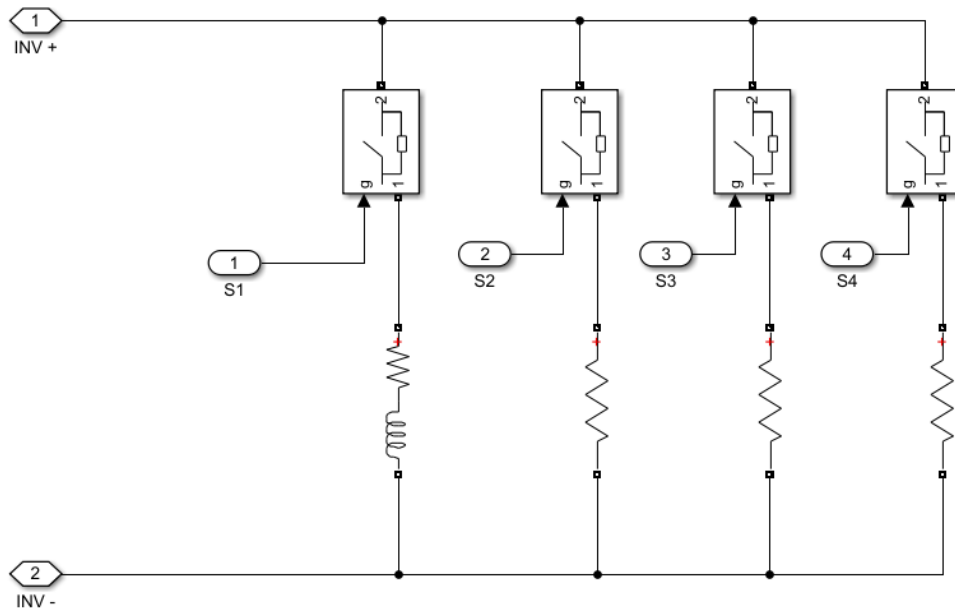


Figura 2.27 Sistema de carga variable

La Figura 2.27 muestra el subsistema de cargas tanto para los niveles de tensión alterna de 120 y de 240Vac donde, se presenta una carga del tipo RL de 50 ohm 10 mH y las demás cargas netamente resistivas de 50 ohm, simulando las cargas que existen en una residencia.

Estas cargas se activan por medio de los interruptores que se presentan en el subsistema de interruptores como se muestra en la Figura 2.28 que, a su vez, estos interruptores están conectados a cada una de las pantallas, como se muestra en la Figura 2.24 y 2.26 en la zona central de cada una.

Este subsistema presentado en la Figura 2.27 está conectado a la salida, tanto del inversor de 120Vac como a la salida del inversor de 240Vac.

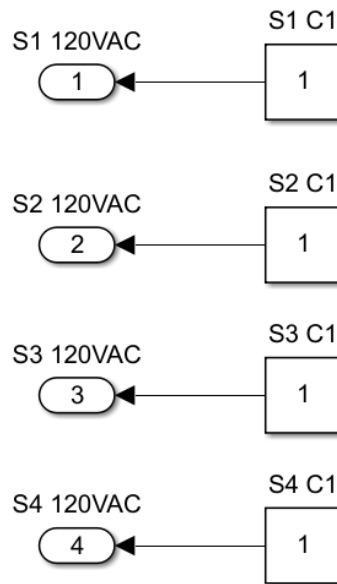


Figura 2.28 Subsistema de Interruptores para la variación de carga

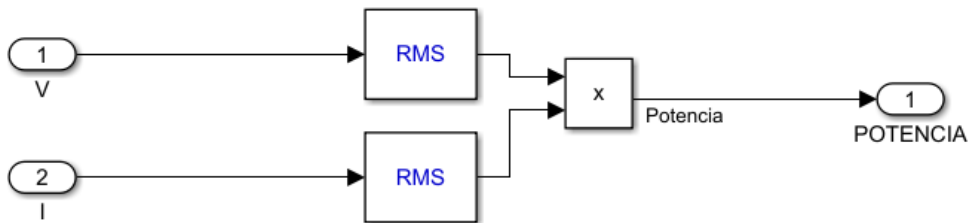


Figura 2.29 Obtención de la potencia de cada sistema de carga

Es de gran importancia conocer la potencia que se presenta en la residencia, por tal motivo se presenta el subsistema de la Figura 2.29, que corresponde a la multiplicación de los valores RMS de tensión y corriente de cada nivel de tensión en alterna (120 y 240Vac), de esta manera podemos visualizar la potencia demandada por las cargas de la residencia o en otras palabras de forma ideal la potencia generada a partir del banco de celdas de combustible.

2.7 Equipos utilizados en una posible implementación

Los siguientes equipos y materiales se deberían implementar en una instalación física si se desea realizar la alimentación de una residencia de forma permanente, recordando que este proyecto está basado en la caracterización y respuesta del banco a distintos tipos de carga que se presenta en una residencia, pero se ha añadido esta sección para conocer el tipo de equipos e instalación que se requerirían.

2.7.1 Banco de celdas de combustible

Como ya es de conocimiento, se debe utilizar un banco de celdas de combustible para alimentar la residencia de unos 3 kW, donde se asume un factor de 1.5 a 2 veces la potencia requerida para el banco de celdas de combustible por cuestiones de diseño y protección, donde se ha utilizado para la simulación el modelo del banco de celdas de Simulink de 6kW y se presenta la hoja de datos en el anexo 1; no obstante en una implementación física se podría colocar un banco de celdas de combustible con una potencia mayor a unos 4.5kW, lo cual encajaría perfecto en el sistema.



Figura 2.30 Fuel Cell Stack 6kW

Existen distintos tipos de marcas de bancos de celdas de combustible en el mercado, pero una de las marcas más reconocidas es "Horizon" y sus equipos incluyen, el banco como tal, controlador del banco, válvulas y materiales restantes para su implementación [14].

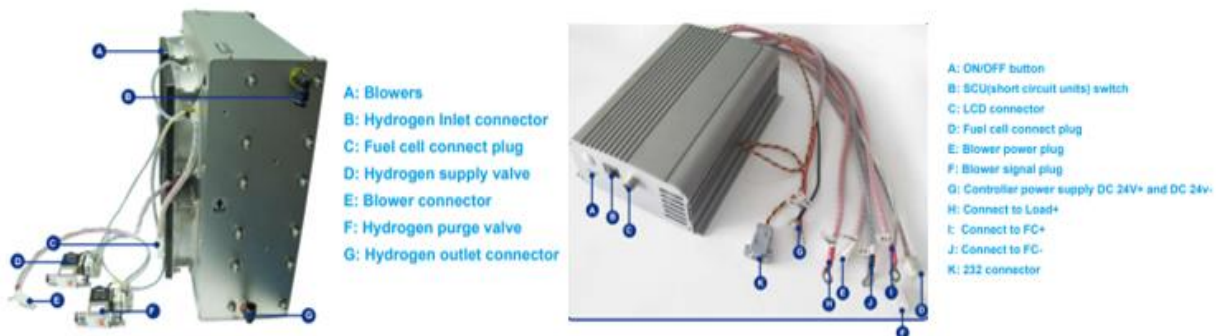


Figura 2.31 Algunos de los equipos incluidos (Controlador y válvulas)

2.7.2 Inversor cargador (todo en uno)

El inversor trifásico es el componente eléctrico/electrónico de mayor importancia en la parte de potencia, ya que cumple con tres objetivos específicos los cuales son:

- 1) Conexión directa entre el banco de celdas de combustible y el inversor para mantener un voltaje estable.
- 2) Mantener un voltaje constante de 48V para el sistema de carga del banco de baterías ya que, tiene incorporado un cargado MPPT para baterías.
- 3) Facilitar las 2 líneas y un neutro para la conexión eléctrica residencial, donde el voltaje de línea a neutro es de 120VAC y de línea a línea es de 240VAC (ver anexo 2).

El inversor seleccionado es de la marca “Growatt” modelo SPF 6000T DVM, como se muestra en la Figura 2.32; se lo denomina inversor controlador todo en uno ya que, posee el regulador MPPT para cargar baterías, la conexión directa para el banco de celdas de combustible, una conexión a la red eléctrica de hasta 240Vac (hoja de datos en el anexo 2) y las salidas de 120Vac y 240Vac de línea a neutro y de línea a línea respectivamente, pero como este proyecto está basado en un sistema autónomo (off Grid) no se realizarían conexiones a la red eléctrica como se muestra en el PLANO 1.

Cabe destacar que este inversor es implementado en sistemas fotovoltaicos, pero no existe ningún impedimento en la utilización en sistemas eólicos o para nuestro caso en sistemas de bancos de celdas de combustible.



Figura 2.32 Inversor Cargador todo en uno SPF 6000T DVM “Growatt” 6kW [15]

2.7.3 Bombonas industriales de Hidrógeno

Ya que tenemos un banco de celdas de combustible tipo PEMFC, necesitamos introducirle hidrógeno puro a partir de bombonas industriales, figura 2.33, las cuales a partir de la relación capacidad de la bombona en litro, sobre flujo de caudal hacia el banco de celdas, podemos aproximar la duración de una bombona en horas.



Figura 2.33 Bombonas industriales de Hidrógeno

Si la capacidad de una bombona de H₂ es de 8 m³

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ L}$$

$$8 \text{ m}^3 = 8000 \text{ L}$$

$$\text{Duración} = \frac{\text{Capacidad (Bombona) [L]}}{\text{Flujo de H}_2 \text{ [L/min]}}$$

$$\text{Duración} = \frac{8000 \text{ [L]}}{42 \text{ [L/min]}}$$

$$\text{Duración} = 190.48 \text{ min} = 3.17 \text{ horas}$$

Donde se ha considerado un flujo de 42 L/min de caudal de hidrógeno como se observará en los resultados en el capítulo 3 en el cual se tiene la mayor eficiencia del banco de celdas de combustible al alimentar las cargas residenciales.

2.7.4 Banco de Baterías

A pesar de que se trata de un sistema autónomo (off Grid) sin conexión a una red eléctrica y lo ideal es alimentar a la residencia exclusivamente a partir de nuestro banco de celdas de combustible, podemos realizar el cálculo de un banco de baterías para suplir la carga de la residencia en cuestión (debido a la presencia de alguna falla) donde el cálculo del banco de baterías tiene los siguientes pasos:

- 1) Voltaje de carga del banco de baterías a partir del inversor (48V).
- 2) Potencia máxima de la carga para alimentar (6kW).
- 3) Tiempo mínimo de abastecimiento de las baterías a la carga (8h).
- 4) Energía total acumulada en el banco de baterías (6kW*8H = 48 kWh).
- 5) Características de voltaje y corriente de las baterías a usar (48V/150Ah).
- 6) Calcular los amperios requeridos por el banco (48kWh/48V = 1000Ah).
- 7) Calcular la cantidad de bloques seriados en paralelo (1000Ah/150Ah =6.67=7).

Por lo tanto, para el banco de baterías se necesitan, como una de las tantas opciones 7 baterías de 48V/150Ah conectadas en paralelo que, como batería equivalente se trataría de una batería de 48V/1050Ah.



Figura 2.34 Banco de Baterías de 48V / 150Ah (7 en paralelo)

2.7.5 Esquema eléctrico con protecciones del sistema autónomo

Para una implementación física es necesario conocer tanto, los diagramas de bloques como los diagramas eléctricos con las dimensiones de cables y protecciones en el sistema, por tal motivo se ha realizado el diagrama de bloques en AutoCAD como se muestra en la Figura 2.35 y 2.36, donde se presenta en la Figura 2.35 el diagrama de bloques utilizado en este proyecto con la implementación de un solo inversor todo en uno a diferencia del diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.36, donde se utilizarían más equipos como el regulador de carga de baterías e inversores.

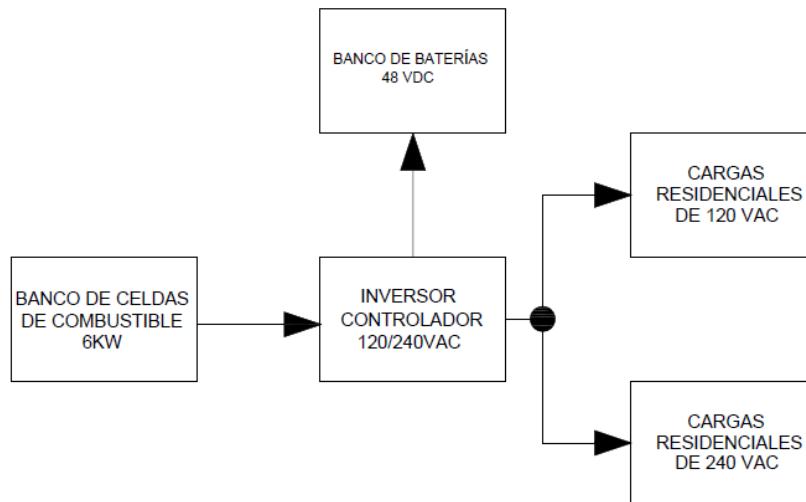


Figura 2.35 Diagrama de Bloques del sistema utilizando un inversor controlador

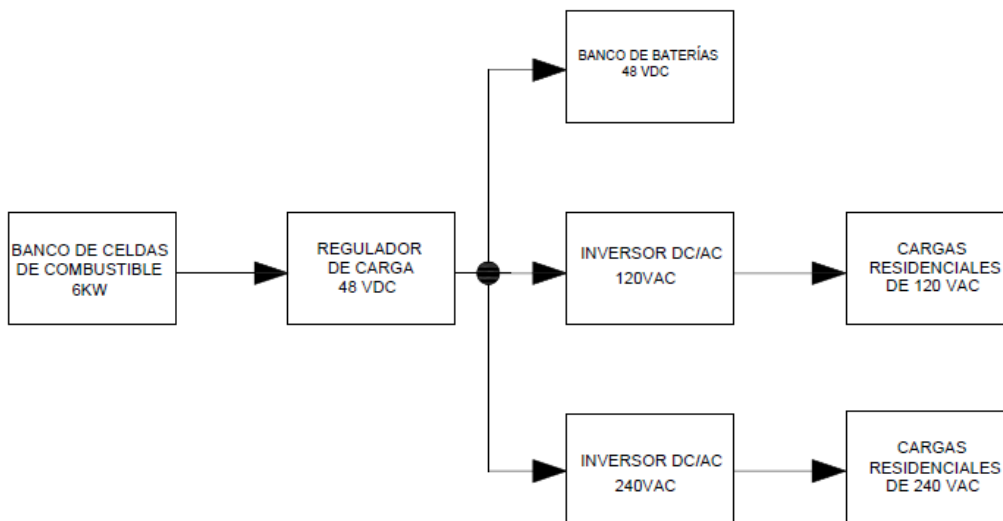
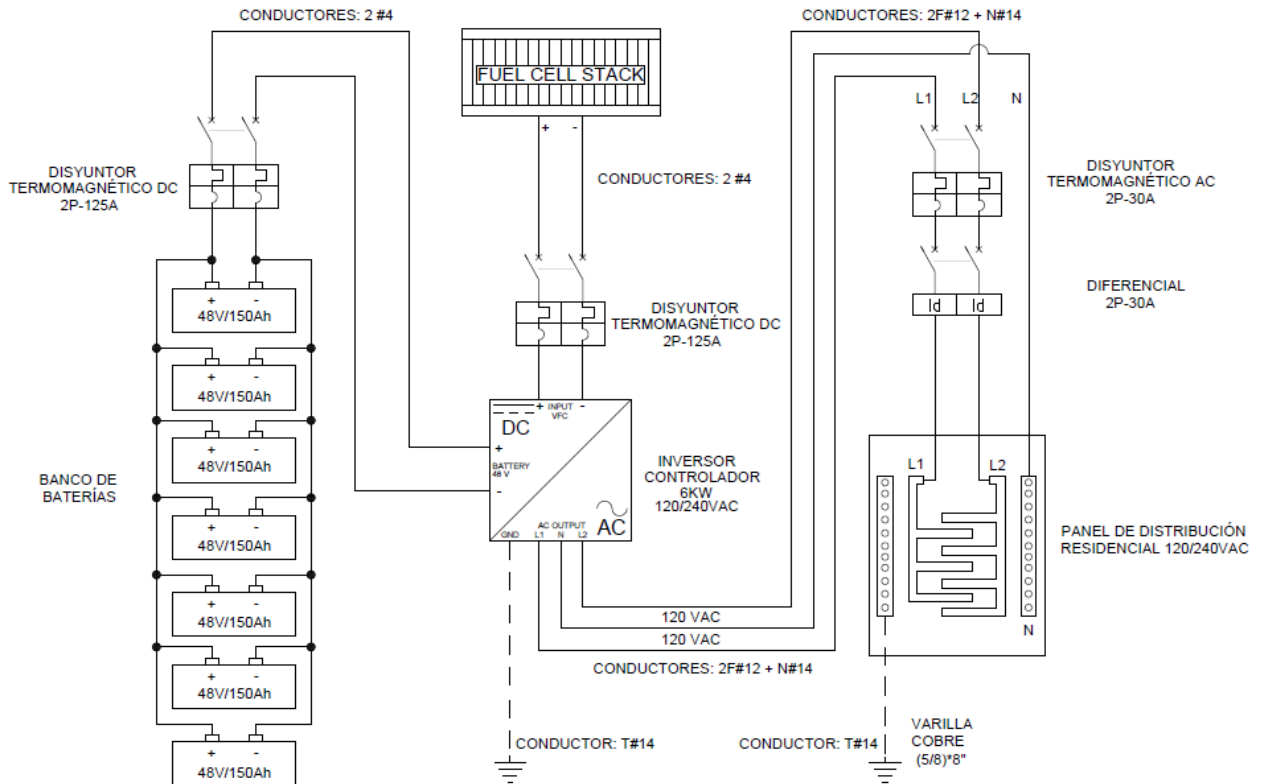


Figura 2.36 Diagrama de Bloques utilizando un regulador de carga e inversores de 120 y 240 VAC

Como podemos observar en la Figura 2.35 y 2.36, tenemos dos de las tantas opciones mas utilizadas al momento de implementar sistemas autónomos, donde en la Figura 2.35 se ha utilizado un inversor controlador todo en uno, donde lleva incluido un cargador MPPT para banco de baterias y proporciona dos lineas de 120Vac y un neutro para alimentar a nuestra residencia; a diferencia de la Figura 2.36 que también es valido pero se utiliza los equipos de forma independiente, donde el cargador de

baterias es de 48 Vdc y se necesitaria 2 inversores para lograr los voltajes de 120 y de 240 Vac. Para nuestro diseño se ha elegido el inversor controlador todo en uno, es decir el esquema de la Figura 2.35.



PLANO 1 Esquema eléctrico con Protecciones del sistema autónomo

El PLANO 1 muestra el esquema eléctrico con las protecciones y dimensionamiento de cables que se utilizarían en una implementación física para alimentar a nuestra residencia en cuestión, donde se ha calculado cada una de las protecciones de acuerdo a la potencia, tanto del banco de celdas de combustible, como de la potencia del inversor (6kW), además el cálculo de la sección del cable conductor se ha realizado de acuerdo a los sistemas fotovoltaicos, ya que es un sistema análogo correspondiente a los sistemas autónomos residenciales.

De acuerdo al PLANO 1 se muestra el banco de baterías necesario para suplir al banco de celdas de combustible durante 8 horas según el cálculo presente en la sección 2.7.4 y sus protecciones y dimensionamiento de cable se calculó como se presenta a continuación.

A partir de la potencia del inversor y del voltaje de 48Vdc para las baterías se puede calcular la corriente del banco de baterías:

$$I_{BB} = \frac{P_{inversor}}{(V_{carga})(1.15)}$$

$$I_{BB} = \frac{6kW}{(48V)(1.15)}$$

$$I_{BB} = 108.7 A$$

Por lo tanto se tiene el disyuntor:

Disyuntor Termomagnético DC 2P – 125 A

Similar al cálculo anterior, teniendo la potencia de banco de celdas y el voltaje del inversor

se puede calcular la corriente desde el banco de celdas hasta el inversor:

$$I_{BC} = \frac{P_{BC}}{V_{inv}}$$

$$I_{BB} = \frac{6kW}{48V}$$

$$I_{BB} = 125 A$$

Por lo tanto se tiene el disyuntor:

Disyuntor Termomagnético DC 2P – 125 A

Para calcular el disyuntor presente entre el inversor y el panel de distribución de la residencia se realiza a partir de la potencia del sistema 6kW

Similar a los cálculos aprendidos en la materia

Instalaciones Eléctricas Residenciales y Comerciales:

$$\frac{6kW}{4} = 1500W \text{ se toma el } 100\% = 1500W$$

y de los 4500W restantes se toma el 30% = 1350W

sumando las potencias anteriores se tiene la potencia diversificada de 2850W

y considerando un factor de potencia de 0.92 se tiene:

$$I = \frac{2850W}{(240Vac)(0.92)}$$

$$I = 12.9A$$

$$I (1.25) = 16.13A$$

Por lo tanto se tiene el disyuntor:

Disyuntor Termomagnético AC 2P – 30 A

Para calcular la sección del cable se debe conciderar aspectos de diseño tales como, la longitud que van a tener los cables desde el inversor al banco de baterías, al banco de celdas de combustible y al panel de distribuación de la residencia; así mismo utilizando un conductor de cobre se conoce que su conductividad es de 59 Ms/m y se concidera una caída de tension de 1V para el lado de DC y de 5V para el lado de AC; teniendo esto presente la seccion de los conductores se calcula acontinuación.

Cálculo de la sección del cable para DC:

$$S = \frac{(2)(I)(L)}{(\sigma)(\Delta V)}$$

$$S = \frac{(2)(125A)(4m)}{(59Ms/m)(1V)}$$

$$S = 16.95 \text{ mm}^2$$

$$S = 25 \text{ mm}^2 \text{ redondeado}$$

*resultando cable AWG #4 desde el inversor hasta el banco de baterías
y hasta el banco de celdas de combustible*

Conductores: 2#4

Cálculo de la sección del cable para AC:

$$S = \frac{(2)(I)(L)(\text{Cosa})}{(\sigma)(\Delta V)}$$

$$S = \frac{(2)(30A)(15m)(0.85)}{(59 \text{ Ms/m})(5V)}$$

$$S = 2.59 \text{ mm}^2$$

$$S = 4 \text{ mm}^2 \text{ Redondeando}$$

resultando cable AWG #12 desde el inversor hasta el panel

de distribución residencial

Conductores: 2F#12 + N#14

Para el conductor de tierra del panel de distribución residencial

se ha elegido:

Conductor: T#14

Varilla de Cobre: (5/8)8"

En la tabla 2.3 se presenta la lista de equipos y materiales necesarios para una posible implementación del sistema autónomo a base de la utilización de un banco de celdas de combustible para alimentar una residencia de 3kW.

EQUIPO	CANTIDAD	VALOR
Banco de celdas de combustible Horizon 6kW	1	\$25,000
Inversor Controlador SPF 6000T DVM "Growatt" 6kW	1	\$1,600
Disyuntores DC y AC	4	\$60
Rollos de cable	4	\$60
Tanque de Hidrógeno marca TYHJ de 8 metros cúbicos	8	\$128
Batería 48V/150Ah Yangtze 6-GFM-150	7	\$770
		Total: \$27,618

Tabla 2.3 Lista de materiales utilizados en una posible implementación física del sistema autónomo

Como se muestra en la Tabla 2.3, la implementación de este sistema tiene un alto costo en materiales, por lo cual a priori podemos concluir que este tipo de sistemas con respecto a la economía del cliente y al costo que representa el consumo residencial a partir de la red eléctrica, no sería económicamente favorable para el cliente; pero gracias a los estudio e investigaciones de los expertos, esta tecnología de celdas de combustible en un futuro no muy lejano tendrán un bajo costo y beneficiarán a las personas pero en especial al medio ambiente.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Respuesta de la pila de combustible ante la variación de la carga

A partir de la simulación de nuestro banco de celdas de combustible, se presentan las siguientes respuestas del mismo, al momento de variar la carga, a distintos valores de caudal de entrada, temperatura y presión que se le proporciona al banco; esto con la finalidad de encontrar un punto o un rango óptimo de eficiencia máxima del banco, para la aplicación de alimentar a nuestra residencia en particular de 3kW.

3.1.1 Respuesta del sistema en el escenario de circuito abierto

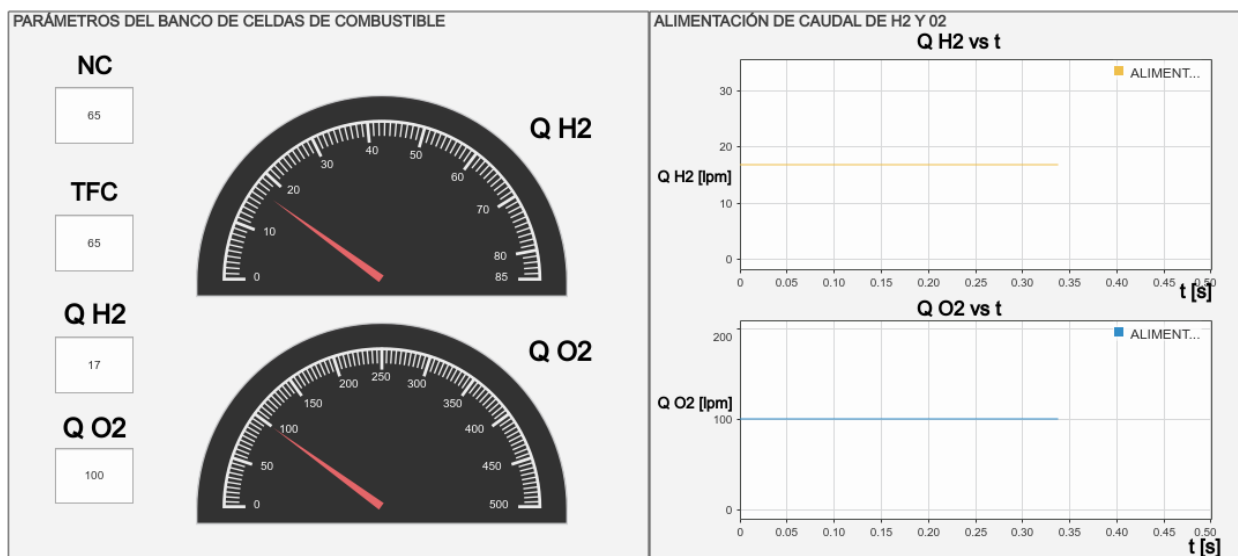


Figura 3.37 Parámetros del banco de celdas de combustible para su caracterización

En primera instancia, se realiza la prueba sin carga para el banco, donde podemos evidenciar en la Figura 3.37 que el número de celdas es de 65, la temperatura del stack es de 65°C y el caudal de hidrógeno y oxígeno son respectivamente 17 y 100 lpm, correspondientes al 20% del caudal máximo de cada combustible; se ha alimentado con estos parámetros iniciales, a fin de mostrar que en circuito abierto (sin carga), no se generará corriente eléctrica y por ende la potencia y la eficiencia equivalen a cero, a diferencia del voltaje que corresponde al voltaje de circuito abierto, el cual es el máximo (69V).

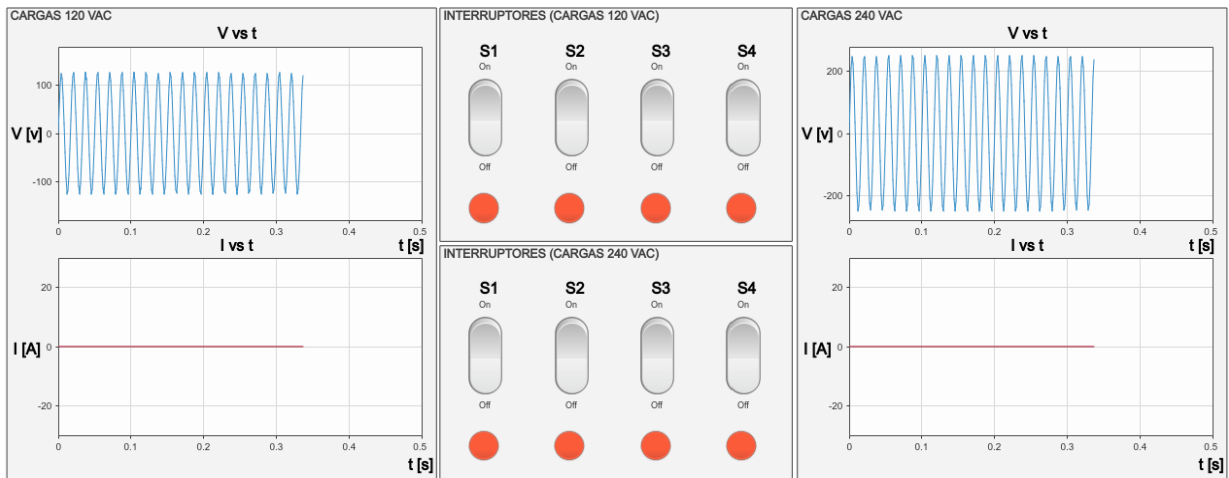


Figura 3.38 Voltajes y corrientes en la carga para 120 y 240 Vac (sin carga)

En el panel de control de cargas como lo muestra la Figura 3.38, tenemos la tensión de salida de los inversores (tensión en las cargas) tanto para 120 Vac como para 240 Vac, lo cual el sistema está dando estas tensiones en alterna a pesar de que no se disponga carga, o en otras palabras no se tenga ningún electrodoméstico conectado al sistema autónomo del banco de celdas de combustible; de la misma manera al no disponer de carga, se puede visualizar que la corriente es nula, por lo cual podemos identificar la correcta respuesta con respecto a la electrónica de potencia del proyecto.

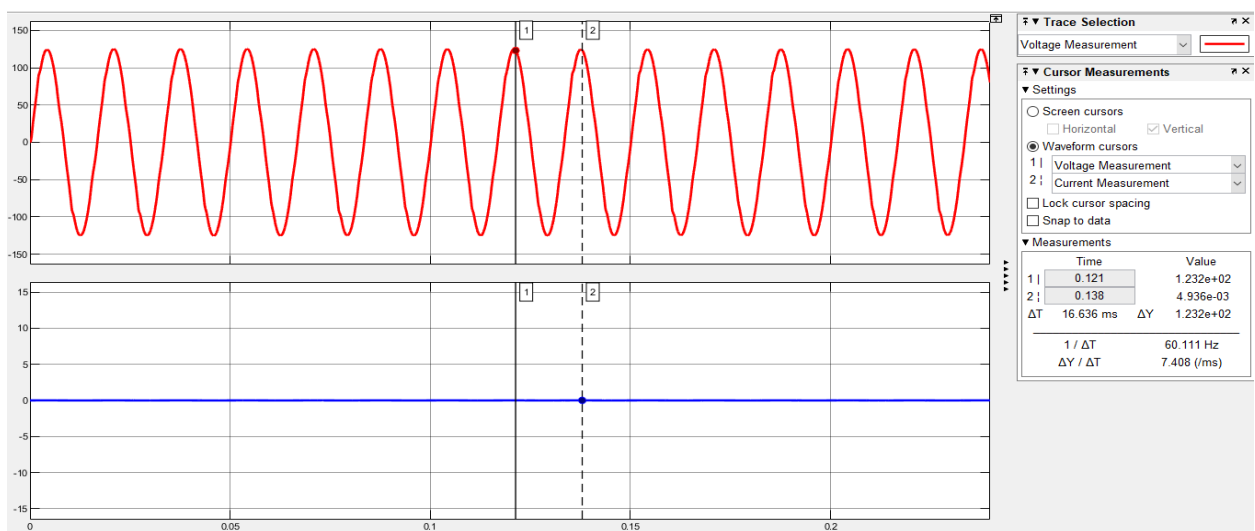


Figura 3.39 Voltaje y Corriente en el sistema de carga 120 Vac (sin carga)

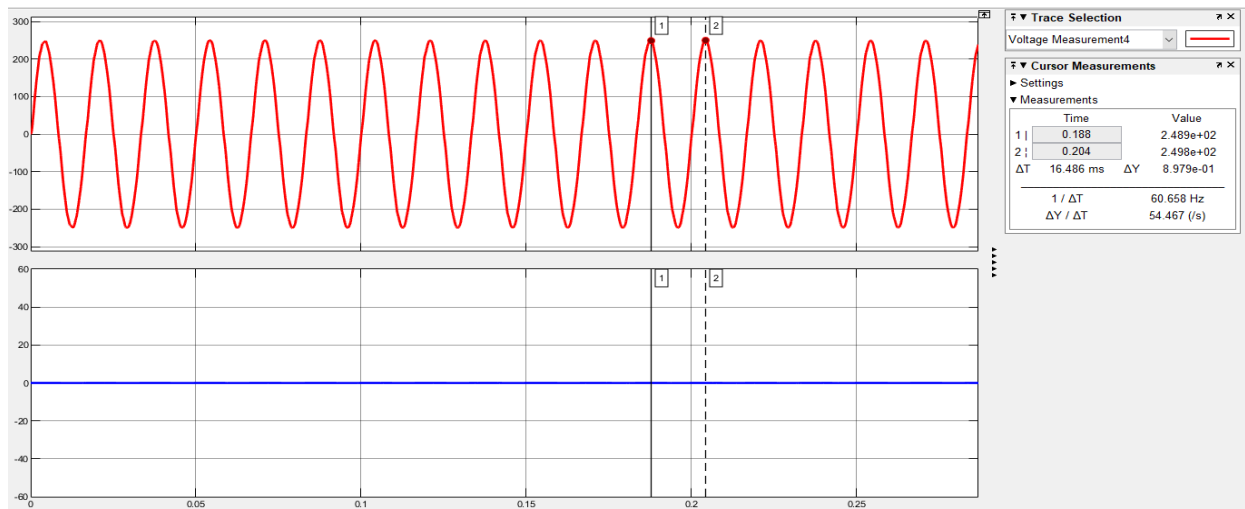


Figura 3.40 Voltaje y Corriente en el sistema de carga 240 Vac (sin carga)

Además, se han agregado las Figuras 3.39 y 3.40 para facilitar la visualización de los picos de tensión en alterna y la forma de onda senoidal de la misma (123V y 248V pico para las cargas); y como se desea alimentar a una residencia necesitamos proporcionar una tensión de 60 Hz para nuestros electrodomésticos y demás cargas de la vivienda; donde estas imágenes son proporcionadas directamente de los osciloscopios conectados a cada sistema de carga.

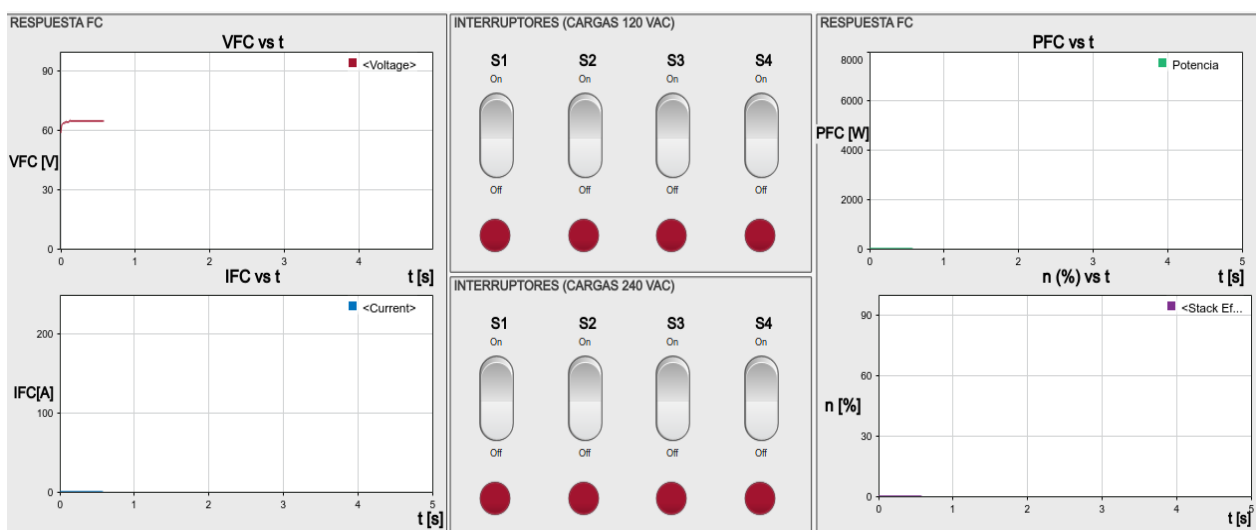


Figura 3.41 Respuesta del Banco de Celdas (sin carga)

Para la respuesta de banco de celdas de combustible, se tiene la respuesta esperada donde, el voltaje del banco será el máximo (69V), al no disponer carga en el sistema, por ende, la corriente, potencia y eficiencia del Stack son cero al tener un circuito abierto. Todo esto se evidencia en la Figura 3.41, donde también se puede evidenciar que los interruptores de cada carga están apagados.

3.2 Respuesta del sistema al 25, 50, 75 y 100% del caudal máximo para todo el sistema de carga.

En la sección 3.1 se analizó la respuesta del banco a circuito abierto, donde se visualizó que la corriente generada es nula al no presentarse ninguna carga; pero en una residencia tenemos distintos tipos de cargas que debemos alimentar, es por esto que en esta sección nos enfocaremos en obtener respuestas gráficas del Banco a distintos porcentajes de alimentación de caudal con respecto al nivel máximo de alimentación (25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de hidrógeno y de aire); cabe destacar que por efectos de simplicidad se han considerado la carga RL de 50 ohm y 10mH con 3 cargas más en paralelo de 50 ohm para este análisis, como lo muestra la Figura 2.27, es decir 4 cargas en paralelo (RL,R,R,R).

3.2.1 Caudal al 25% del máximo de H₂ y de aire (65°C)

Como primicia, se tiene una alimentación constante del 25% del caudal máximo de hidrógeno y de aire (21 lpm y 125 lpm respectivamente) por lo cual se presenta a continuación la tabla de resultados a diferentes cargas y los gráficos correspondientes a las respuestas del banco de celdas de combustible.

Donde, como parte de referencia y visualización para esta primera parte, se han añadido todos los gráficos correspondientes del sistema realizado en Simulink, con respecto al 25% del caudal máximo; para los siguientes porcentajes de alimentación de caudal solo se han añadido las figuras más relevantes, ya que la respuesta del banco es parecida en ciertos aspectos.

Donde “En” corresponde al voltaje de Nerst; “Eo” corresponde al voltaje de circuito abierto del banco; “Vfc”, “Ifc”, y “Pfc” corresponden al voltaje, corriente y potencia del banco de celdas de combustible respectivamente; “UH2” y “UO2” se refieren al porcentaje de utilización del hidrógeno y del aire; “CH2” y “Cair” corresponden al consumo de hidrógeno y de aire del banco en litros por minuto y “n” representa los valores de eficiencia que va tomando el banco a caudal constante y variación de cargas.

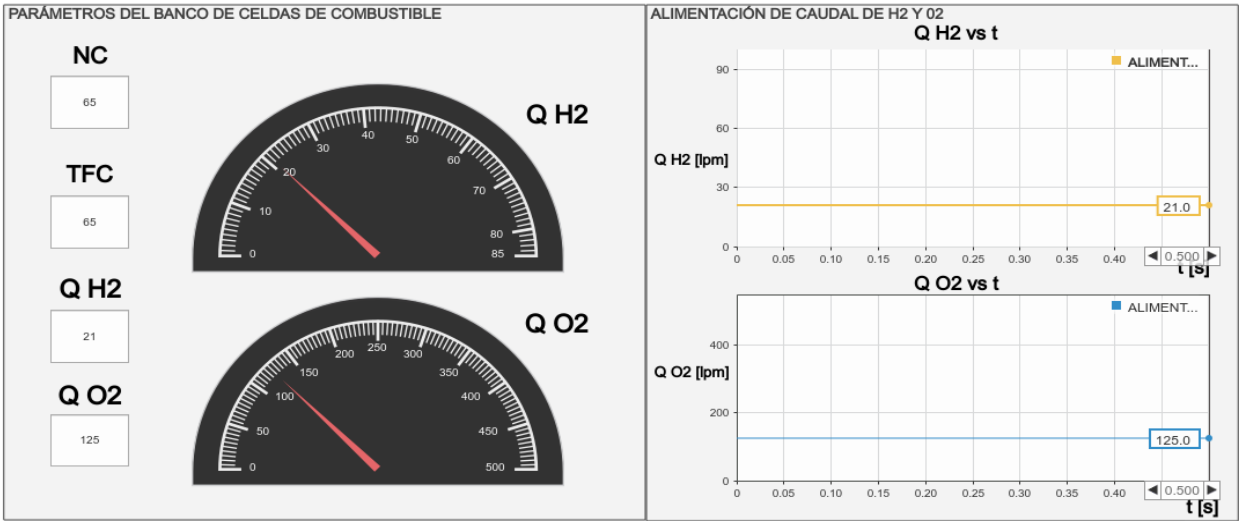


Figura 3.42 Parámetros iniciales del Banco de celdas de combustible

La Figura 3.42 muestra los parámetros iniciales para realizar esta prueba, donde se a designado un nivel de 21 lpm para el caudal de hidrógeno y 125 lpm para el caudal de aire, los cuales son mostrados en la pantalla de control de parámetros.

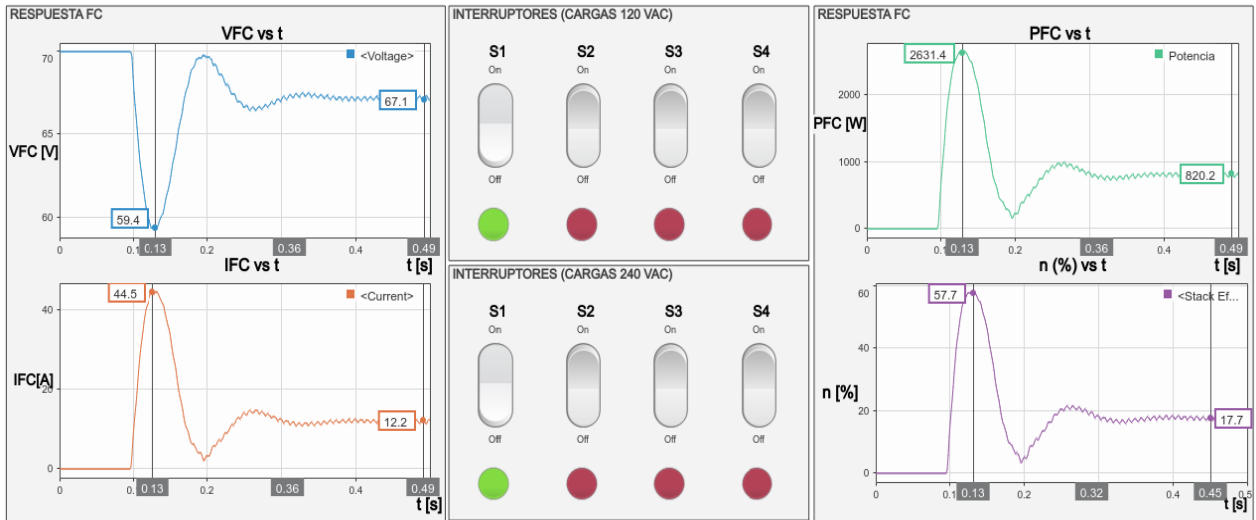


Figura 3.43 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar una carga RL de 50 ohm 10 mH

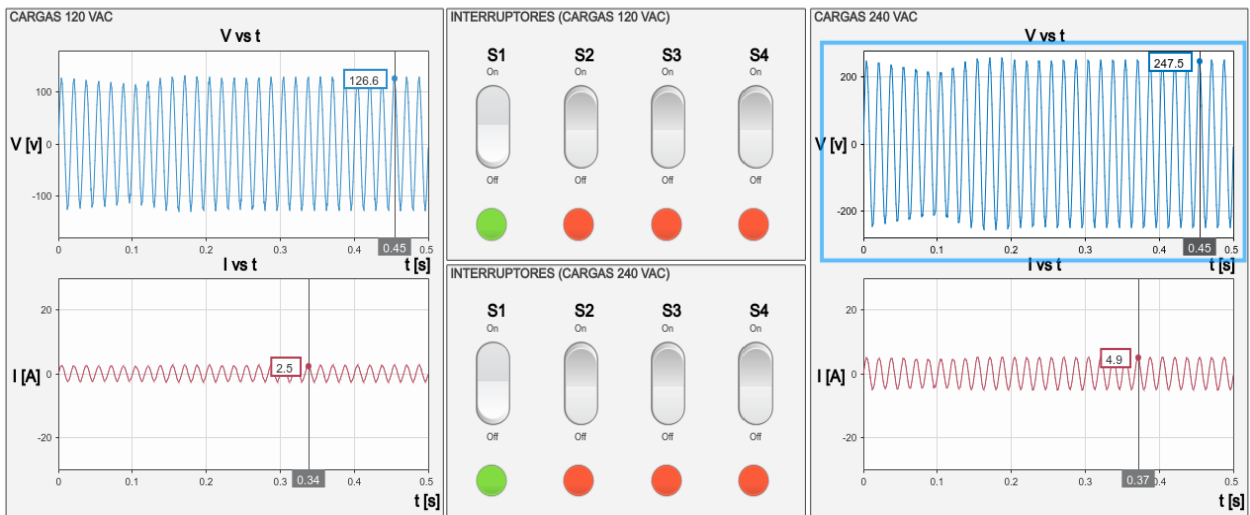


Figura 3.44 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para una carga RL de 50 ohm 10 mH

La Figura 3.43 muestra la respuesta del banco con respecto al voltaje, corriente, potencia y eficiencia, al ser alimentado por el 25% del caudal máximo de hidrógeno y aire, en el cual solo se está generando energía eléctrica para una carga RL de 50 ohm y 10 mH (interruptor S1 encendido), donde podemos visualizar un pequeño transiente antes de la estabilización de cada variable debido a la respuesta interna (diseño en Simulink) de alrededor de 0.1 segundos para el Banco, que a partir de este tiempo comienza a caer el voltaje debido a la presencia de carga y por ende la corriente

comienza a elevarse para suplir a la carga conectada (para el sistema de cargas de 120Vac y 240Vac), por tal efecto, se puede visualizar la multiplicación del voltaje y corriente denominado potencia, que se muestra su característica de comportamiento de igual forma en la Figura 3.43; adicional a esto se muestra la respuesta del banco con respecto a la eficiencia, llegando a su pico más alto del 57.7% estabilizándose así en un 17.78% para esta carga.

De la misma manera se a añadido la respuesta en la salida de los sistemas de carga, donde podemos observar que la tensión pico es de 126.6V con una corriente de 2.5A para la primera carga (120Vac) y de 247.5V con una corriente de 4.9A para la segunda carga (240Vac) como se muestra en la Figura 3.44.

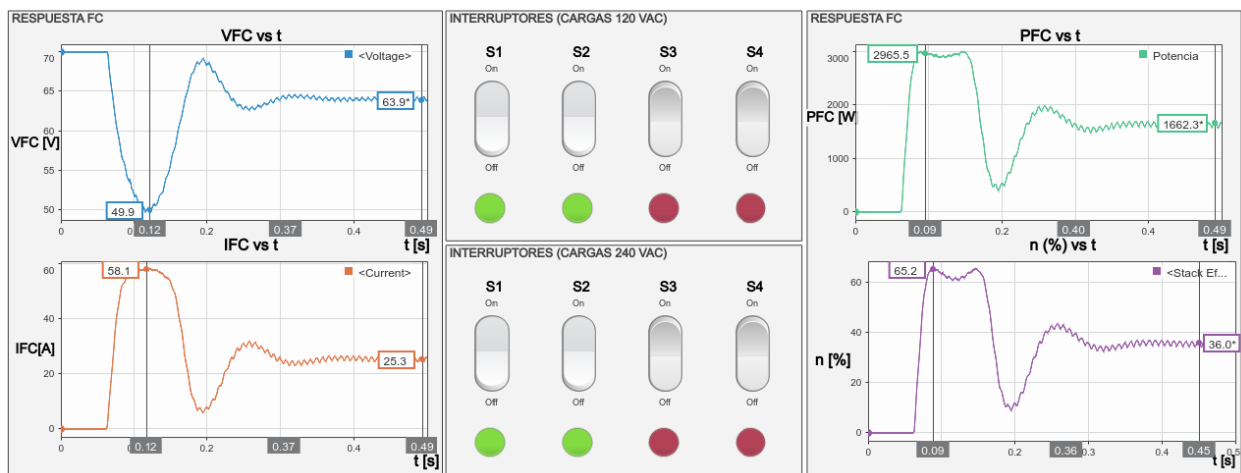


Figura 3.45 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar dos cargas (RL de 50 ohm 10 mH y R de 50 ohm)

Similar al análisis anterior se muestra en la figura 3.45 la alimentación para dos cargas (RL de 50 ohm 10 mH y R de 50 ohm, 2 interruptores encendidos) donde se muestran las gráficas de voltaje, corriente, potencia y eficiencia del banco, siendo la eficiencia la respuesta de mayor relevancia, estabilizándose así en un 36% para dos cargas.

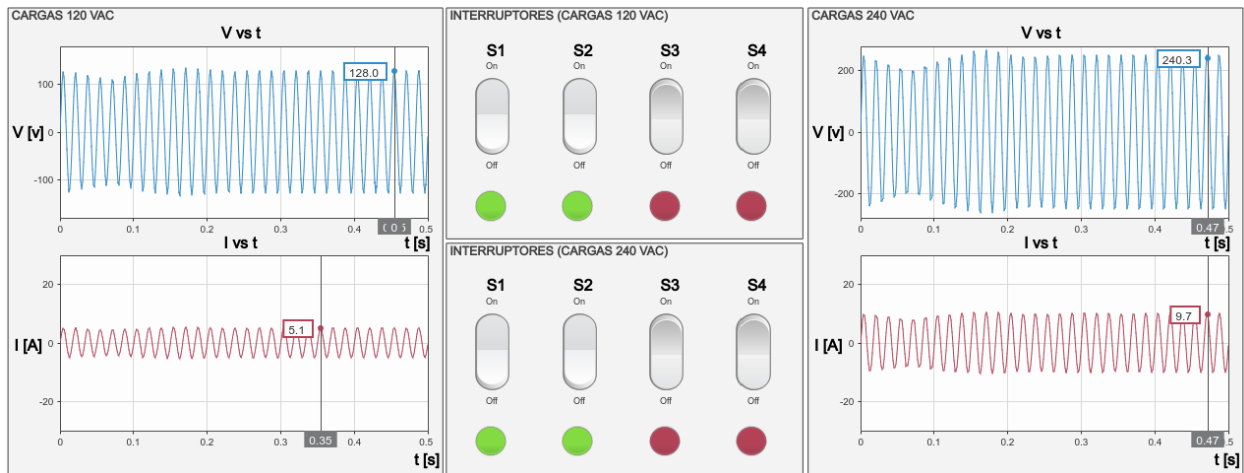


Figura 3.46 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para dos cargas (RL de 50 ohm 10 mH y R de 50 ohm)

De la misma manera se presenta en la Figura 3.46 los voltaje y corrientes alternos para la alimentación de dos cargas, donde el sistema sigue siendo capaz de alimentar y proporcionar la suficiente energía para mantener un voltaje alterno suficiente para los sistemas de carga de 120Vac como de 240Vac.

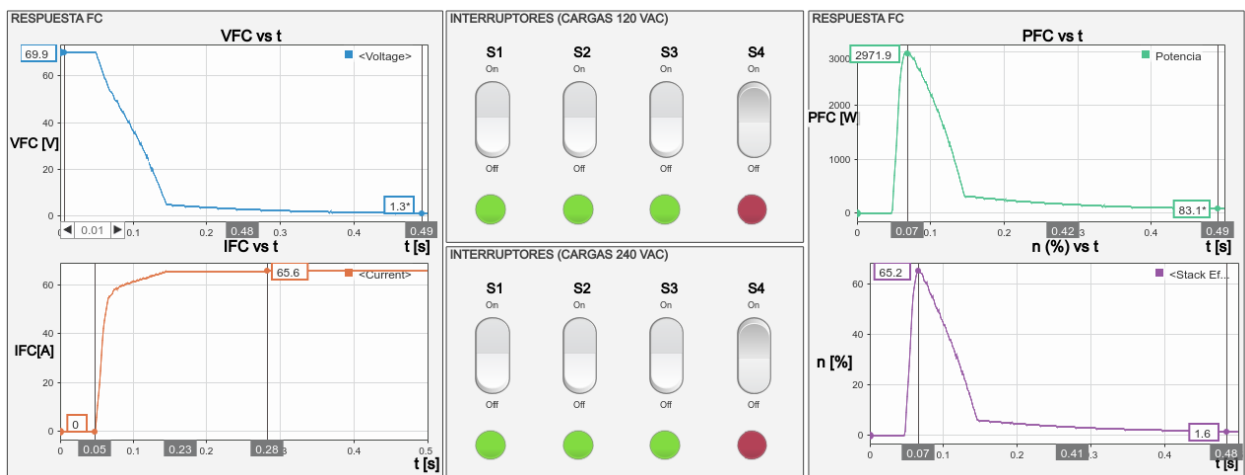


Figura 3.47 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar tres cargas (RL de 50 ohm 10 mH, R de 50 ohm y R de 50 ohm)

La Figura 3.47 muestra la respuesta del banco de celdas al querer alimentar a tres cargas a cada sistema (120Vac y 240Vac) y podemos visualizar que el caudal al 25% del máximo posible, no es suficiente para proporcionar dicho objetivo, donde a causa

del aumento de carga, vemos una caída de tensión muy pronunciada e insuficiente para generar un voltaje alterno capaz de suplir las tres cargas a cada sistema.

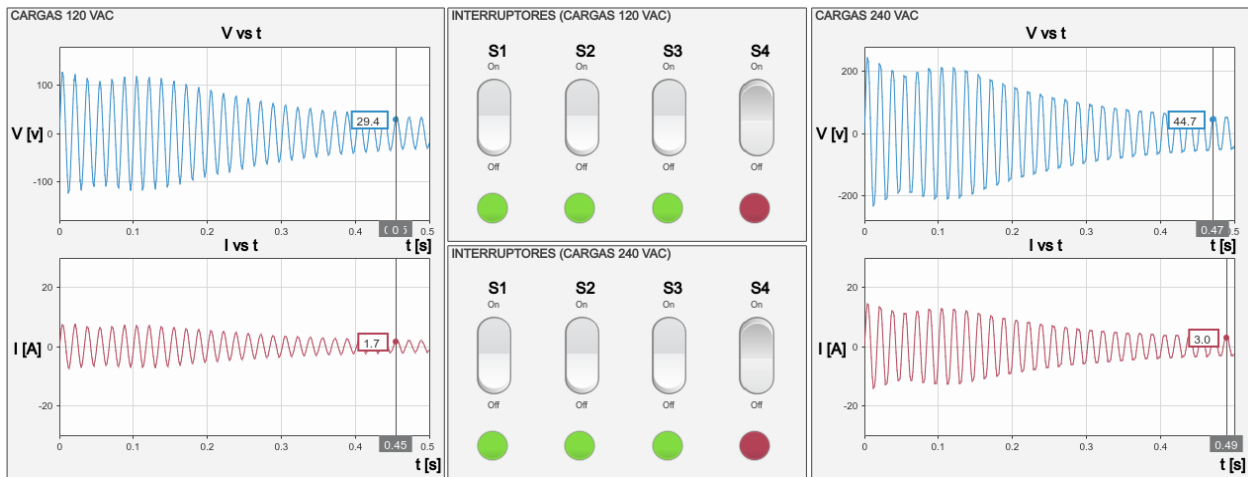


Figura 3.48 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para tres cargas (RL de 50 ohm 10 mH, R de 50 ohm y R de 50 ohm)

	En [V]	Eo [V]	Vfc [V]	Ifc [A]	Pfc [W]	U H2 [%]	U O2 [%]	C H2 [lpm]	C air [lpm]	n [%]
R1	1.21V	69.68V	67.12V	12.23A	820.2W	21.5%	12.90%	4.52lpm	166.11lpm	17.78%
R1R2	1.21V	69.68V	63.9V	25.3A	1663W	45.69%	27.59%	9.59lpm	34.49lpm	36.37%
R1R2R3	0.26V	14.87V	1.31V	65.75A	86.05W	99.99%	70.20%	21lpm	87.75lpm	1.58%
R1R2R3R4	0.25V	14.36V	0.76V	65.67A	49.95W	99.99%	70.11%	21 lpm	87.64 lpm	0.93%

Tabla 3.4 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 25% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas

La tabla 3.4 muestra en resumen los valores en estado estable de las variables correspondientes al banco de celdas, donde se evidencia que, para un caudal de 21 lpm de H2 y de 125 lpm de aire (25% del caudal máximo), solo se puede abastecer hasta una segunda carga para cada sistema; llegando así a una estabilización para dos cargas del 36.37% de eficiencia como punto mas alto; además se muestra una insuficiencia de caudal a querer suplir a partir de la tercera carga.

3.2.2 Caudal al 50% del máximo de H2 y de aire (65°C)

Como segundo paso para la caracterización del banco, se tiene la alimentación de caudal al 50% del límite superior de H2 y de aire (42 lpm y 250 lpm respectivamente) y se obtuvieron los siguientes resultados, donde se ha realizado un análisis similar para el caso del 25% de caudal máximo.

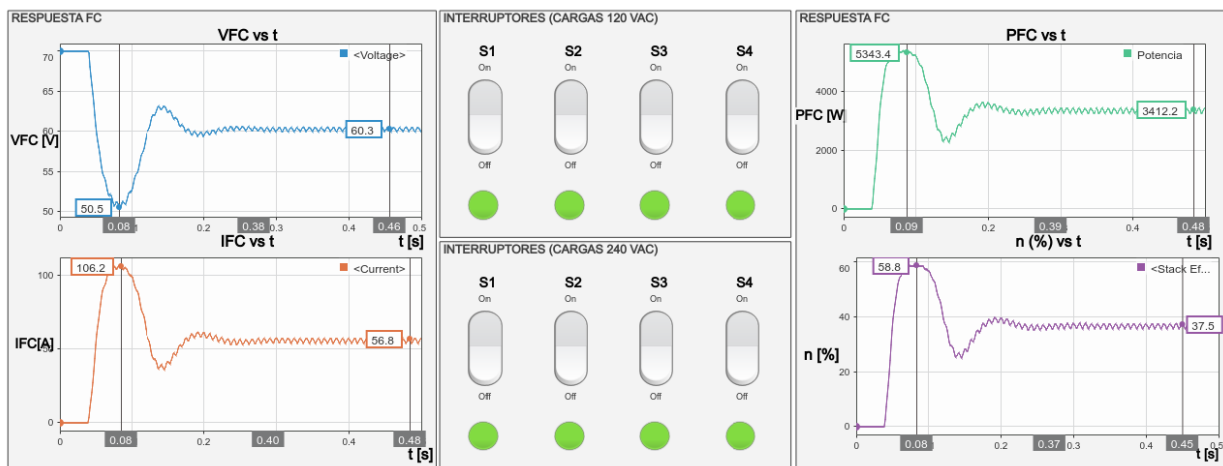


Figura 3.49 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar cuatro cargas (RL de 50 ohm 10 mH, y 3 cargas R de 50 ohm)

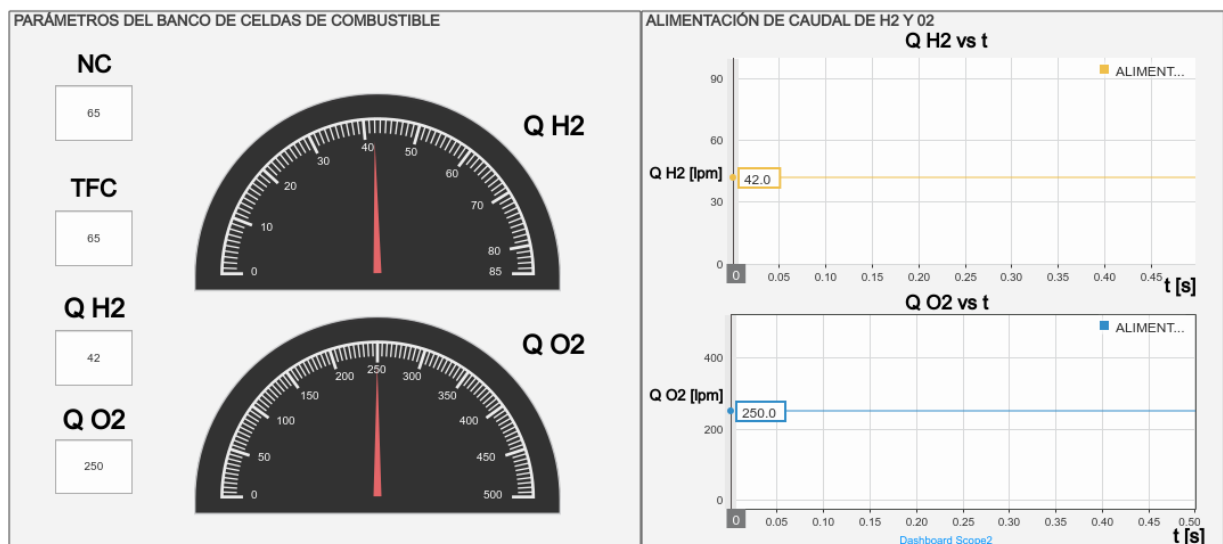


Figura 3.50 Parámetros iniciales del banco de celdas de combustible

Para este análisis, se ha configurado un caudal de alimentación de entrada del 50% (42 lpm de caudal de H₂ y 250 lpm de caudal de aire), como podemos visualizar en la Figura 3.50 y de la misma manera, se presentan las respuestas de voltaje, corriente, potencia y eficiencia para el banco en la Figura 3.49, donde se ha realizado el respectivo análisis; las Figuras 3.49, 3.50 y 3.51 muestran en comportamiento para las cuatro cargas de cada sistema (120Vac y 240Vac) que es donde se prueba que el 50% del caudal si es suficiente para abastecer a toda la carga.

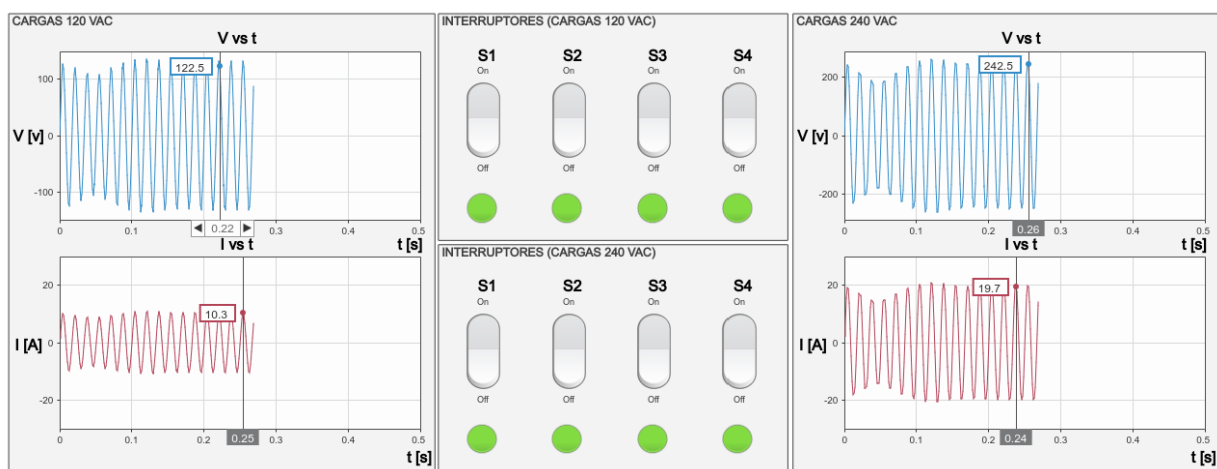


Figura 3.51 Gráficos de voltaje y corriente alterna en las cargas de 120Vac y 240Vac para 4 cargas (RL de 50 ohm 10 mH, 3 cargas R de 50 ohm)

Podemos resaltar que, para este nivel de caudal tenermos el suficiente combustible para lograr mantener alimentado los sistemas de carga (electrodomésticos) de 120Vac y 240Vac, como podemos visualizar en la Figura 3.51 correspondiente especialmente al nivel de tensión pico de cada carga (todos lo interruptores encendidos).

	En [V]	Eo [V]	Vfc [V]	Ifc [A]	Pfc [W]	U H ₂ [%]	U O ₂ [%]	C H ₂ [lpm]	C air [lpm]	n [%]
R1	1.21V	69.68V	67.40V	12.08A	824W	10.48%	6.44%	4.40lpm	16.1lpm	8.92%
R1R2	1.21V	69.68V	65.06V	25.60A	1665W	22.94%	13.76%	9.64lpm	34.39lpm	18.25%
R1R2R3	1.21V	69.68V	62.80V	40.45A	2535W	36.18%	21.70%	15.19lpm	54.26lpm	27.74%
R1R2R3R4	1.21V	69.68V	60.46V	56.87A	3413W	50.82%	30.49%	21.34lpm	76.23lpm	38.45%

Tabla 3.5 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 50% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas

Teniendo así una eficiencia del 38% al estabilizarse la respuesta del banco a la carga máxima de análisis, como lo muestra la tabla 3.5.

3.2.3 Caudal al 75% del máximo de H2 y de aire (65°C)

De la misma manera, se ha realizado el análisis para el 75% del caudal máximo (63 lpm de H2 y 375 lpm de aire) que se muestra directamente en la Figura 3.52, la respuesta del banco al nivel máximo de carga (4 interruptores encendidos) y la tabla 3.6 que resume todas las pruebas realizadas, donde los valores corresponden al estado estable de cada variable.

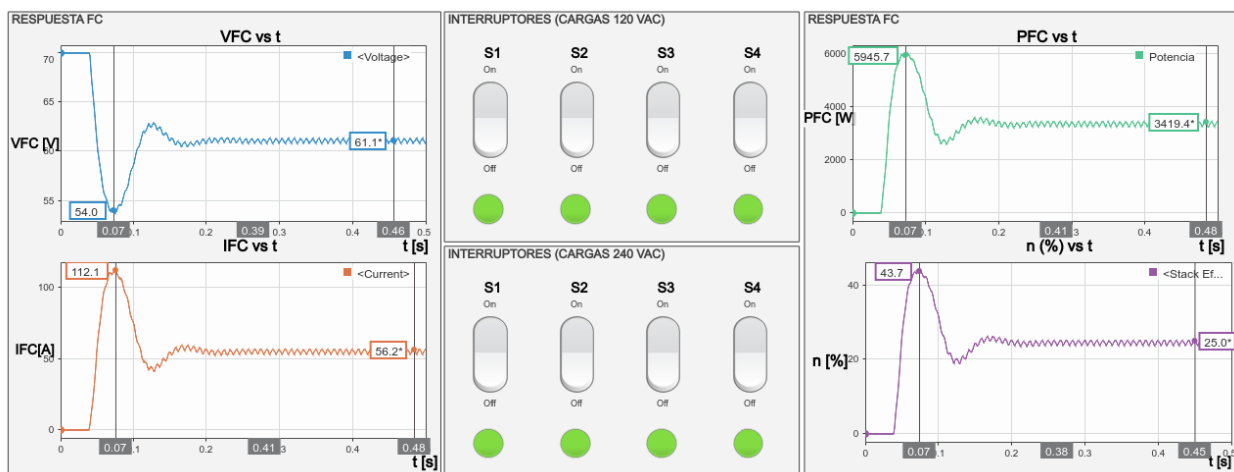


Figura 3.52 Respuesta de Banco de Celdas al alimentar cuatro cargas (RL de 50 ohm 10 mH, y 3 cargas R de 50 ohm)

	En [V]	Eo [V]	Vfc [V]	Ifc [A]	Pfc [W]	U H2 [%]	U O2 [%]	C H2 [lpm]	C air [lpm]	n [%]
R1	1.21V	69.68V	67.69V	12.07A	819.6W	7.25%	4.34%	4.56lpm	16.28lpm	5.99%
R1R2	1.21V	69.68V	65.31V	25.66A	1669W	15.25%	9.14%	9.61lpm	34.29lpm	12.17%
R1R2R3	1.21V	69.68V	63.27V	40.38A	2526W	23.96%	14.4%	15.1lpm	53.92lpm	18.52%
R1R2R3R4	1.21V	69.68V	61.23V	56.24A	3433W	33.47%	20.1%	21.5lpm	75.34lpm	25.01%

Tabla 3.6 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 75% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas

Similar a los análisis detallados anteriormente, se tiene la Tabla 3.6 donde se resume el análisis y respuesta de cada variable del banco y podemos visualizar una eficiencia en estado estable máxima del 25% cuando se tiene la máxima carga de prueba, llegando a una potencia de 3.43kW.

3.2.4 Caudal al 100% del máximo de H2 y aire (65°C)

Similar a los tres análisis anteriores, se realizó la caracterización del banco al nivel máximo del caudal permitido por el banco de celdas de combustible (según los datos del bloque en Simulink) correspondiente a 84 lpm de caudal de hidrógeno y 250 lpm de caudal de aire; de la misma manera, se realizó la simulación para cada nivel de carga según la Figura 2.27 y se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 3.7.

	En [V]	Eo [V]	Vfc [V]	Ifc [A]	Pfc [W]	U H2 [%]	U O2 [%]	C H2 [lpm]	C air [lpm]	n [%]
R1	1.21V	69.68V	67.60V	12.16A	813.2W	5.43%	3.25%	4.56lpm	16.27lpm	4.49%
R1R2	1.21V	69.68V	65.44V	25.63A	1670W	11.42%	6.85%	9.59lpm	34.24lpm	9.13%
R1R2R3	1.21V	69.68V	63.46V	40.26A	2528W	17.92%	10.7%%	15.05lpm	53.76lpm	13.90%
R1R2R3R4	1.21V	69.68V	61.52V	56.17A	3419W	24.98%	14.98%	20.98lpm	74.97lpm	18.77%

Tabla 3.7 Respuesta del Banco de celdas de combustible al 100% del caudal máximo a diferentes niveles de cargas

La Tabla 3.7 muestra en resumen los valores en estado estable de las variables del banco a distintas cargas del sistema, donde podemos observar que la eficiencia máxima en estado estable se presenta a la máxima carga dando un valor del 18.77%, que es uno de los factores más importantes en el análisis y factor al cual se identifica para las conclusiones en el capítulo 4.

3.2.5 Gráficos en Matlab de la caracterización del banco de celdas de combustible

Para la caracterización del banco de celdas de combustible de forma simulada, se presenta además las curvas del voltaje, potencia y eficiencia versus la corriente generada en Matlab para su posterior análisis y conclusiones.

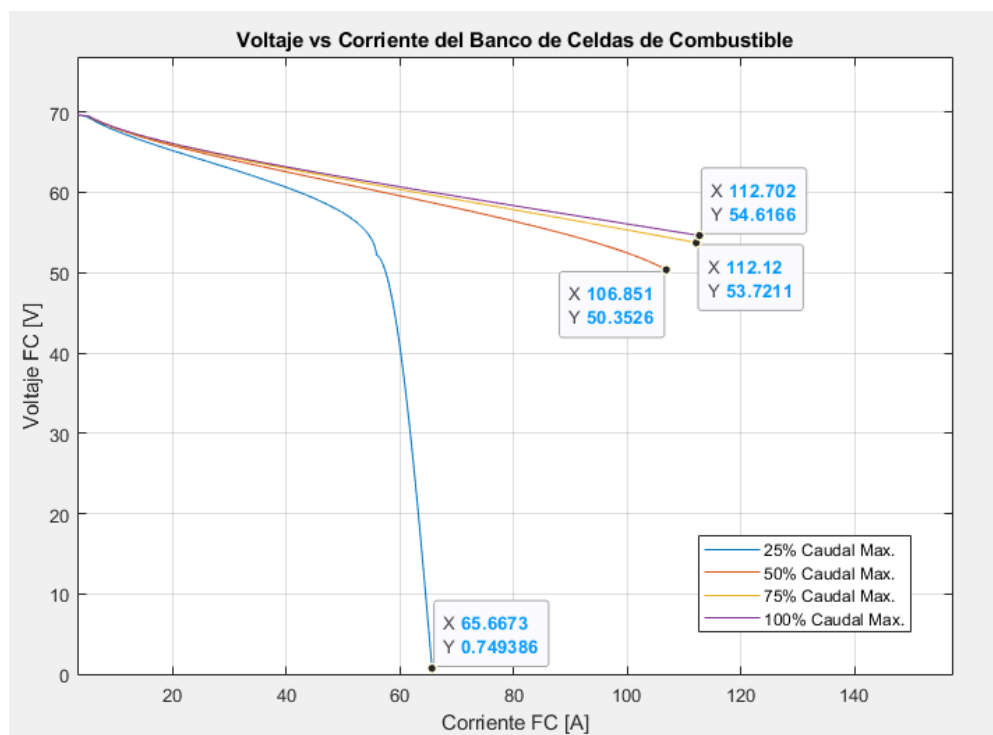


Figura 3.53 Curvas del Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire

La Figura 3.53 muestra las curvas características, también denominadas curvas de polarización del banco de celdas de combustible a distintos niveles de alimentación de caudal de hidrógeno y de aire, donde se evidencia lo antes mencionado, que para un nivel de caudal del 25% del máximo, no es suficiente para alimentar a todas las cargas presentes en el sistema (cargas de la residencia), llegando así al colapso por demasiada carga, donde el voltaje cae a niveles cercanos a cero voltios; pero a partir de los siguientes niveles de caudal (50%, 75% y 100%) podemos observar que sí se tiene una alimentación de caudal suficiente para suplir las cargas en la residencia, llegando a distintos niveles de tensión y corriente.

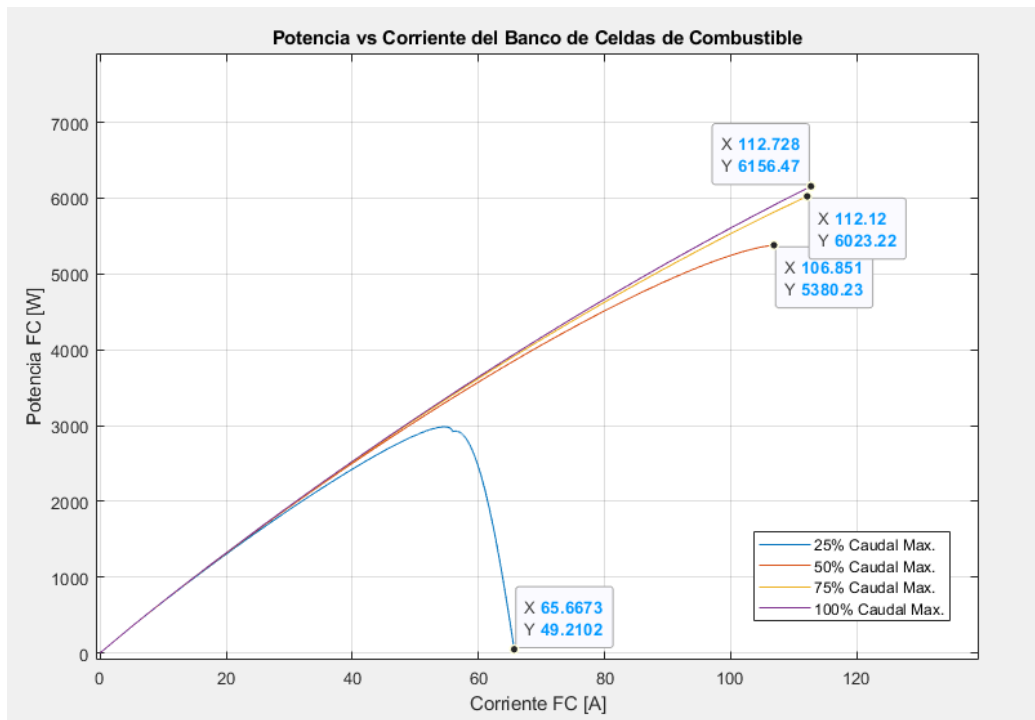


Figura 3.54 Curvas de la Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire

Similar a la curva voltaje versus corriente, también es esencial presentar la curva potencia versus corriente como lo muestra la Figura 3.54, donde efectivamente, al caer el voltaje a la tercera carga del sistema alimentado al 25% del caudal máximo (curva azul), también cae la potencia a niveles cercanos a los 49W, insuficientes para abastecer la carga cercana a los 3kW de consumo; pero a partir de los siguientes pruebas, la potencia pico puede llegar hasta los 6.15kW (recordando que el banco es de 6kW).

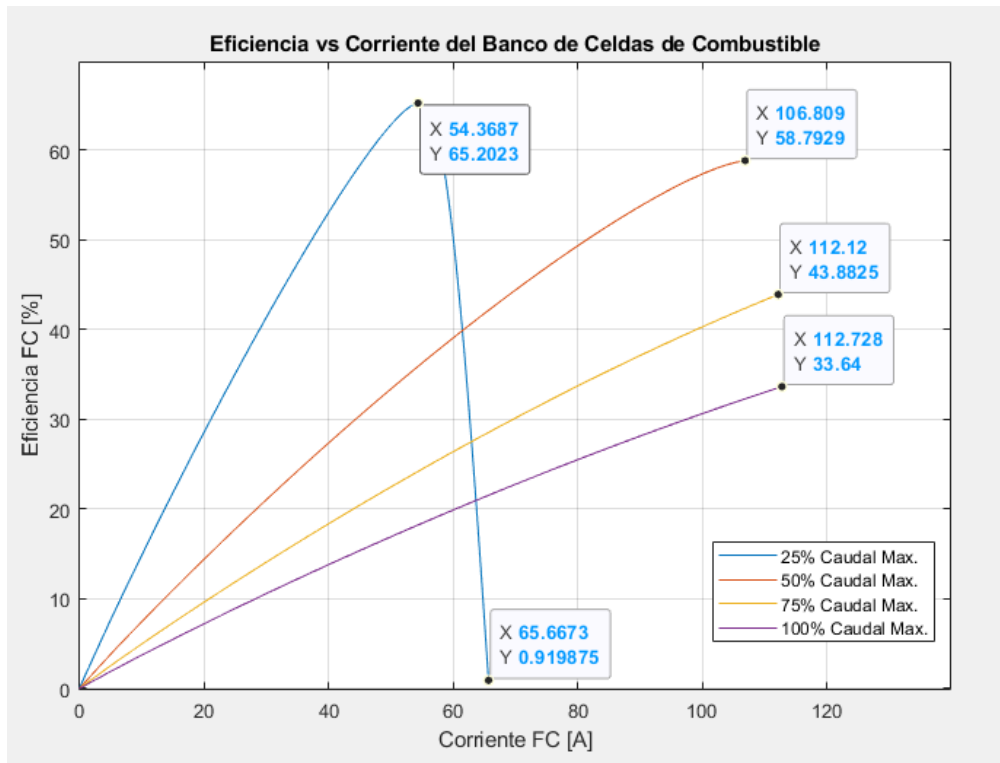


Figura 3.55 Curvas de la Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire

Podemos observar que la eficiencia máxima se da alrededor del 58% cuando el banco es alimentado con el 50% con respecto al nivel máximo de caudal, como se muestra en la Figura 3.55, donde no podemos considerar el 65% de eficiencia que se muestra a la alimentación del 25% de caudal máximo ya que, a estas pruebas el voltaje decrece al tener una elevada carga debido al nivel bajo de alimentación de caudal de H2 y de aire. Es por esto que podemos concluir a priori que para este sistema de carga se tiene una considerable eficiencia máxima alrededor del 58% al alimentar al banco de celdas de combustible alrededor del 50% del caudal máximo, esto es a 42 lpm de hidrógeno y 250 lpm de caudal de aire.

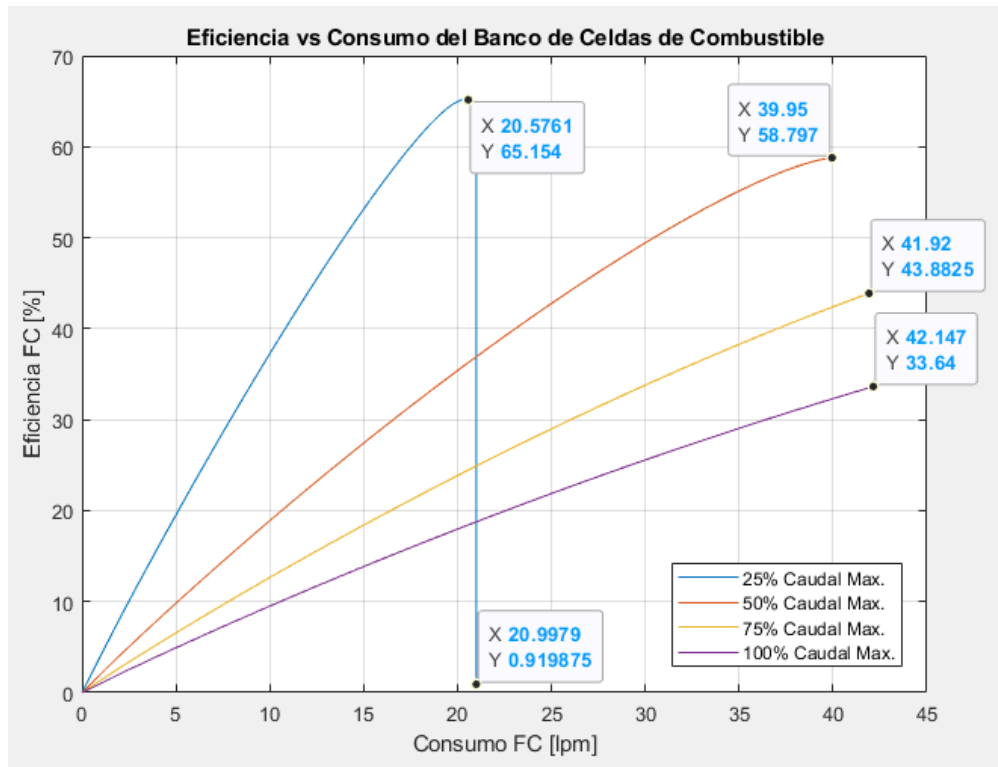


Figura 3.56 Curvas de la Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible alimentado al 25%, 50%, 75% y 100% del caudal máximo de H2 y de aire

En la Figura 3.56 se muestra las curvas eficiencia versus el consumo de hidrógeno en lpm a distintos niveles de alimentación de caudal para el banco de celdas de combustible, donde se presenta la mayor eficiencia de igual manera que en los casos anteriores, del 58% al 50% del caudal máximo resultando un consumo de hidrógeno de 39.95 lpm. La Figura 3.56 también muestra que la eficiencia decrece cuando se aumenta el nivel de consumo de hidrógeno.

3.3 Efectos de la temperatura en el Banco de celdas de combustible (caudal 50% del Máximo)

Como parte de la caracterización total del banco de celdas de combustible, se ha realizado el estudio y simulación de los efectos al variar la temperatura del banco ya que, como se mencionó en el capítulo 1, los parámetros como presión, temperatura, caudal y humedad juegan un papel importante en el funcionamiento y eficiencia de cada una de las celdas de combustible que conforman el banco en general.

Por tal motivo, en la sección 3.2 se estudió la respuesta del banco de celdas de combustible a distintos niveles de caudal; en esta sección se desea obtener resultados al variar distintos niveles de temperatura para el banco, obviamente simulando temperatura dentro del rango permitido para este tipo de las celdas de combustible (20°C – 90°C).

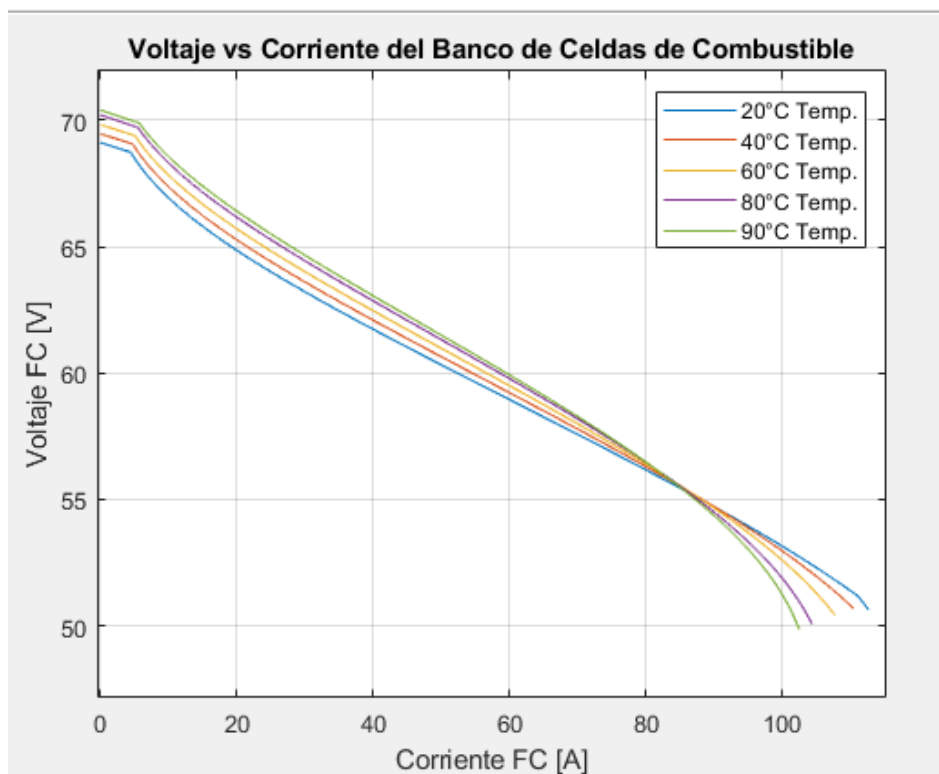


Figura 3.57 Curvas de Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura

Como se muestra en la Figura 3.57, se puede visualizar la respuesta del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura, considerando el nivel de caudal fijo del 50% con respecto al caudal máximo, ya que es a este nivel de caudal donde se presentó la mayor eficiencia (sección 3.2.2); la respuesta del banco muestra que, mientras mayor sea la temperatura, los niveles de tensión son mayores especialmente en el instante que la corriente es cero; pero para determinar cual es el nivel idóneo de temperatura debemos referirnos a la curva eficiencia versus corriente.

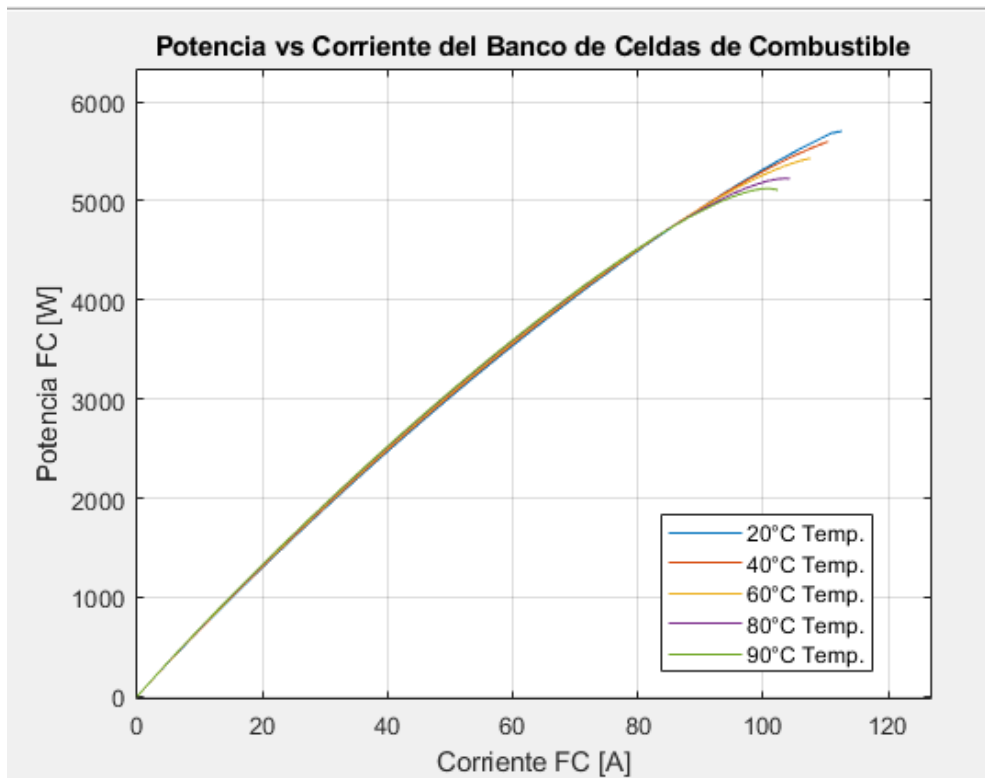


Figura 3.58 Curvas de Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura

Las curvas de potencia versus corriente a distintos niveles de temperatura, como se muestra en la Figura 3.58, tiene prácticamente el mismo comportamiento en la zona lineal, debido a que se realizó las pruebas con toda la carga del sistema tanto de 120 como 240 Vac; las curvas solo difieren en el valor máximo alcanzado de potencia, donde se tiene que, para una temperatura de 20°C (curva azul) existen mayor potencia con respecto al nivel mas alto de temperatura correspondiente a 90°C (curva verde).

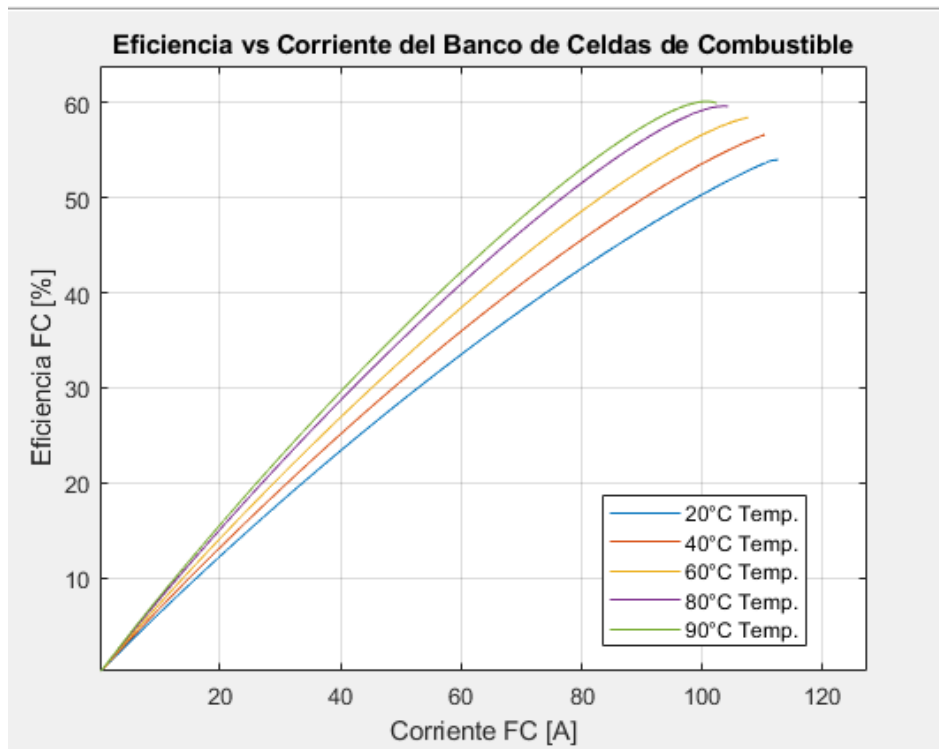


Figura 3.59 Curvas de Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura

Las curvas presentes en la Figura 3.59, nos dan detalle del comportamiento del banco a distintos niveles de temperatura de operación del mismo, donde se puede visualizar que a mayor temperatura, esto es los 90°C (curva verde), se presenta la mayor eficiencia, caso contrario se presenta a los 20°C, donde la eficiencia cae hasta 52%; por tal motivo a priori podemos concluir que a mayor temperatura se presenta la mayor eficiencia, pero para una instalación física, sería un poco arriesgado y peligroso tener un equipo que este funcionando constantemente a una elevada temperatura (90°C); cabe destacar que el cambio del porcentaje de eficiencia del banco de celdas de combustible, que se tendría al operar a una temperatura de 90°C con respecto a 20°C según los resultados gráficos presentes en la Figura 3.59, la eficiencia cae desde el 60% hasta el 52% lo cual podríamos obtener un punto medio de estas pruebas (60°C) para obtener una alta eficiencia pero que es una instalación física el equipo no trabaje a una elevada temperatura.

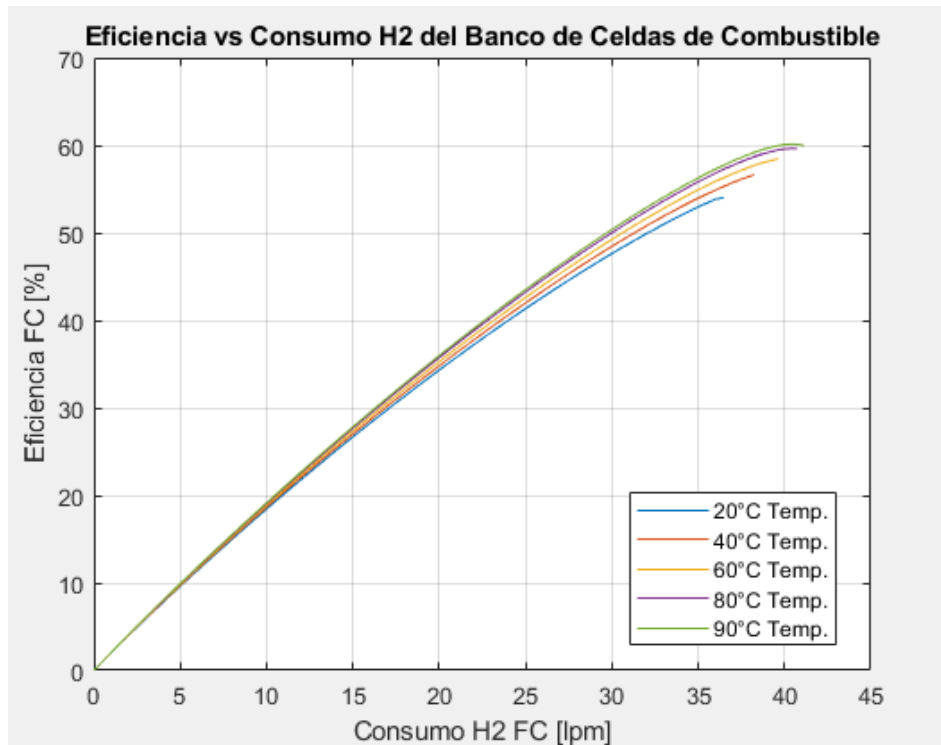


Figura 3.60 Curvas de Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible a distintos niveles de temperatura

En la Figura 3.60 se muestra la respuesta del banco de celdas de combustible de la eficiencia con respecto al consumo de hidrógeno (combustible), donde se presenta que el cambio de temperatura para este caso, incide de manera directa con respecto al consumo de hidrógeno y por ende a la eficiencia de banco, donde se presenta la mayor eficiencia y el mayor consumo cuando la temperatura es máxima de 90°C.

3.4 Efectos de la Presión en el Banco de celdas de combustible (caudal 50% del Máximo y temperatura de 60°C)

Como tercer parámetro de variación para la caracterización del banco de celdas de combustible, en esta sección se presenta la respuesta del banco, con respecto a la variación de presión de hidrógeno y de aire para obtener el punto óptimo al cual se genere la mayor eficiencia. Donde la máxima presión de hidrógeno y de aire no puede ser superior a los 5 Bar según los datos del bloque en Simulink.

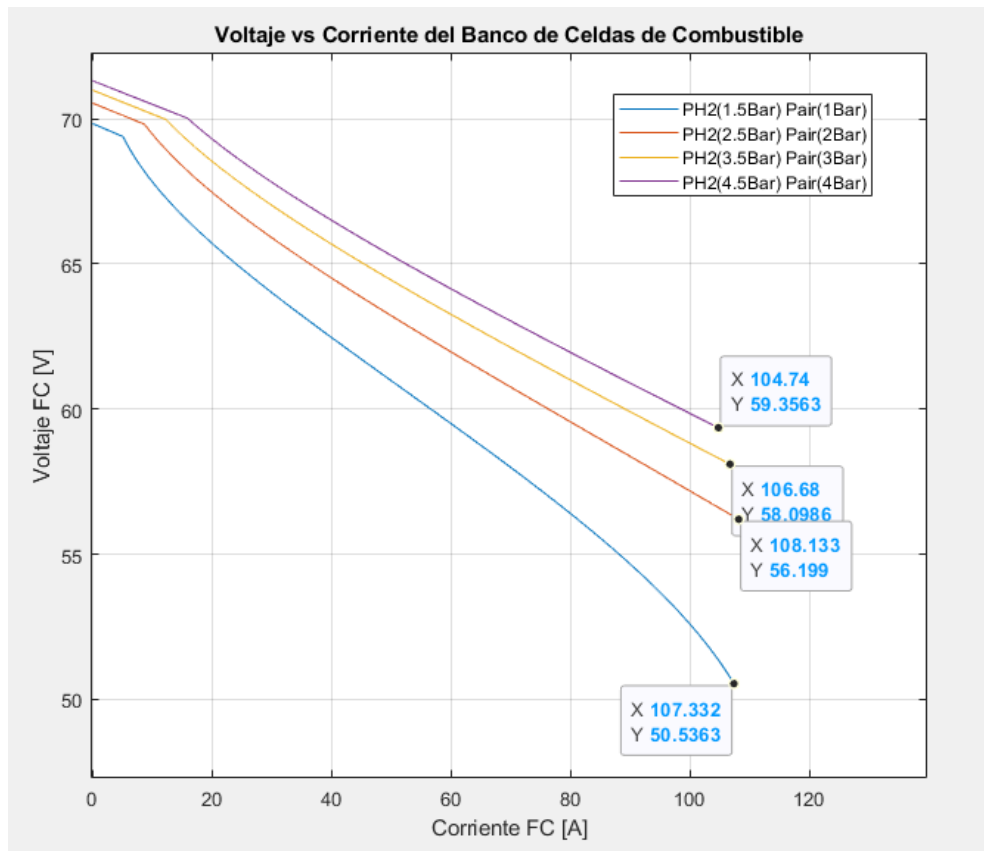


Figura 3.61 Curvas de Voltaje vs Corriente del banco de celdas de combustible para distintos niveles de presión

En primera instancia se tiene la respuesta del banco a cuatro distintos niveles de presión de hidrógeno y de aire, con el condicionante de que la presión de hidrógeno sea levemente mayor a la presión de aire (en todas las pruebas 0.5 Bar sobre la presión de aire); la Figura 3.61 muestra la curva voltaje versus corriente a distintos niveles de presión, donde se evidencia que a mayor presión se presenta un nivel superior de voltaje y la corriente generada prácticamente es la misma.

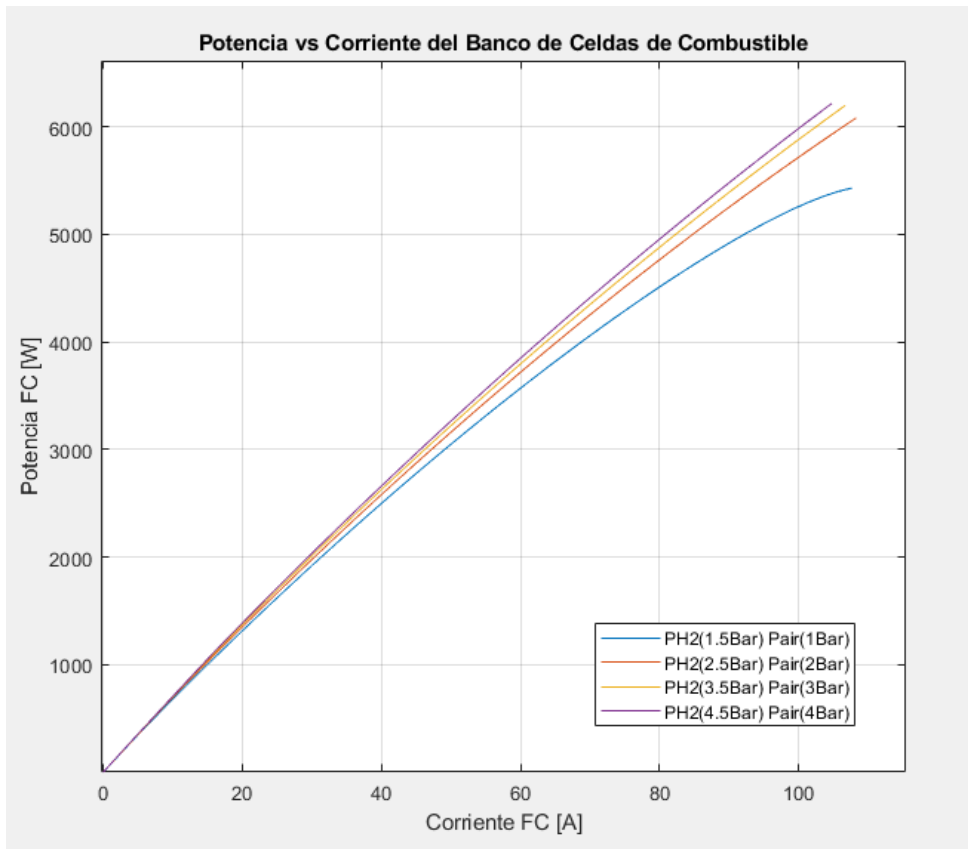


Figura 3.62 Curvas de Potencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión

Debido al aumento de presión tanto de hidrógeno como de aire, se produce un aumento de voltaje como se mostró en la Figura 3.61, debido a lo anterior, con respecto a la potencia, también se presenta una elevada potencia cuando se le proporciona al banco de celdas una presión de 4.5 Bar para el hidrógeno y de 4 Bar para el aire como se muestra en la Figura 3.62 (curva morada); pero para la elección del mejor nivel de presión para nuestro banco de celdas, nos debemos referir a la curva de la eficiencia versus corriente como se muestra en la Figura 3.63.

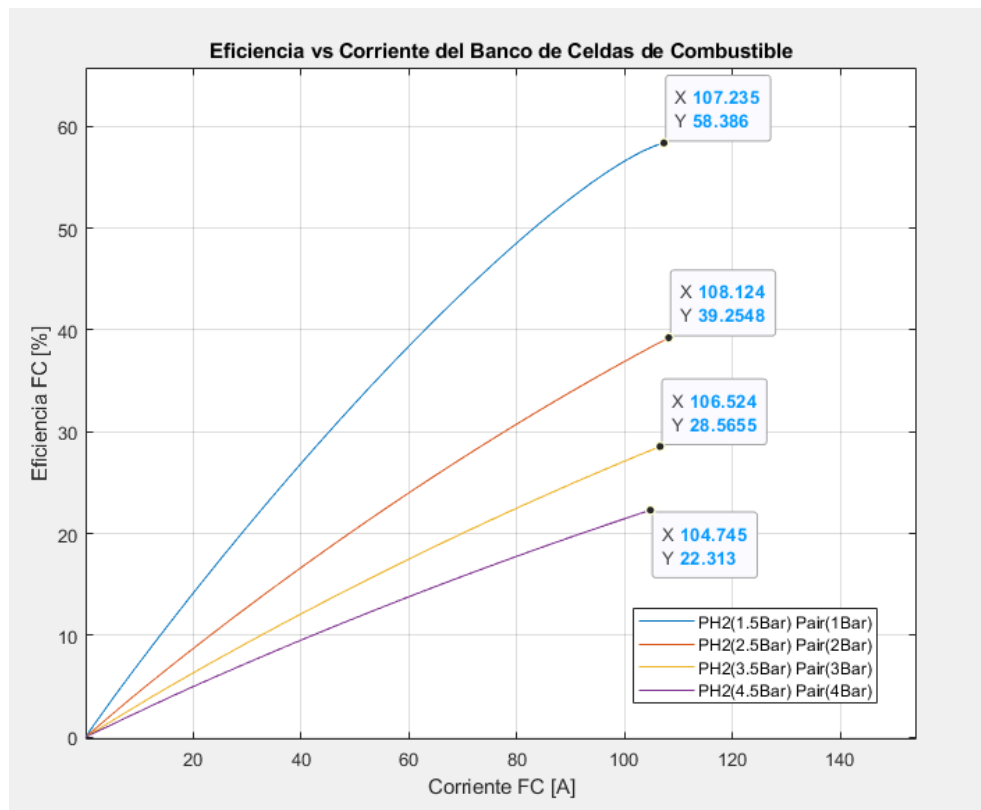


Figura 3.63 Curvas de Eficiencia vs Corriente del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión

Se presenta el resumen de la caracterización del banco de celdas, con respecto a la variación de presión de hidrógeno y de aire, dándonos como resultado la Figura 3.63, donde se evidencia el parámetros mas relevante a la hora de la elección del nivel idóneo de alimentación con respecto a la presión; donde es evidente que se alcanza la eficiencia máxima del 58%, cuando la presión es de 1.5 Bar de H₂ y de 1 Bar para el aire, de esta manera podemos elegir estos valores de presión como los mejores de la caracterización del banco.

Como última gráfica correspondiente a la variación de presión, tenemos la curva de la eficiencia versus el consumo de hidrógeno, donde en la Figura 3.64 se evidencia que cuando se presenta un mayor consumo pues se tiene una mayor eficiencia.

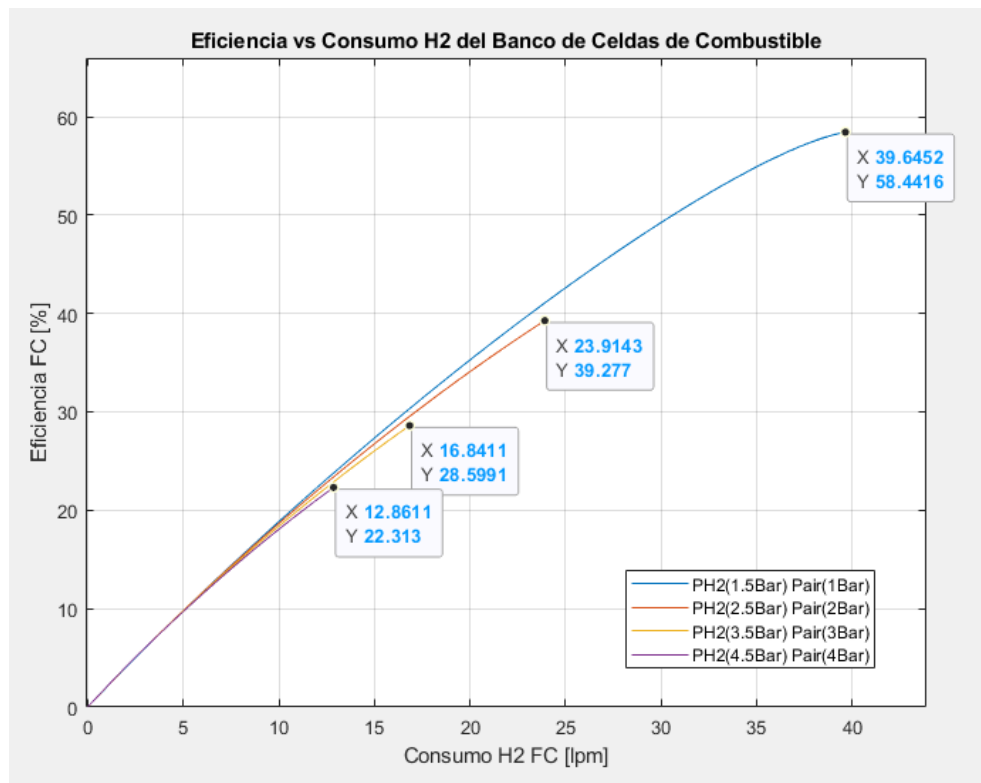


Figura 3.64 Curvas de Eficiencia vs Consumo del banco de celdas de combustible a distintos niveles de presión

3.5 Gráficos del voltaje, corriente, potencia y eficiencia con respecto al tiempo

Una vez realizado el proceso de caracterización del banco de celdas de combustible, es esencial presentar las gráficas de la respuesta del banco de celdas de combustible a los parámetros antes hallados de temperatura, presión y caudal, para generar la mayor eficiencia del mismo. Es por esto que se presentan las curvas del voltaje, corriente, potencia y eficiencia versus el tiempo para visualizar el comportamiento de estas variables en estado estable.

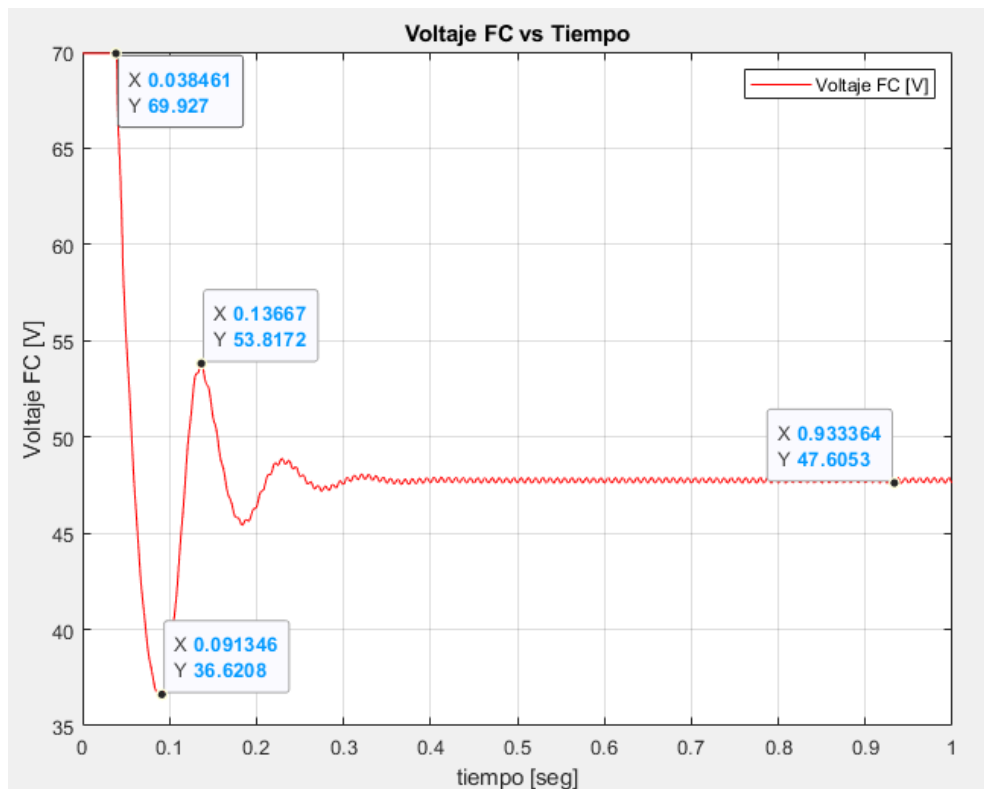


Figura 3.65 Voltaje vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia

La Figura 3.65 muestra la respuesta del banco de celdas de combustible con respecto al voltaje versus el tiempo, donde podemos observar un pequeño transiente hasta los 0.4 segundos antes de la estabilización del banco a un voltaje de 47.6V cuando se presenta toda la carga residencial tanto para el nivel de tensión de 120Vac como para 240Vac; este voltaje DC es el que ingresa directamente al inversor y a partir de aquí se invierte para obtener el voltaje AC que llega hasta el panel de distribución residencial.

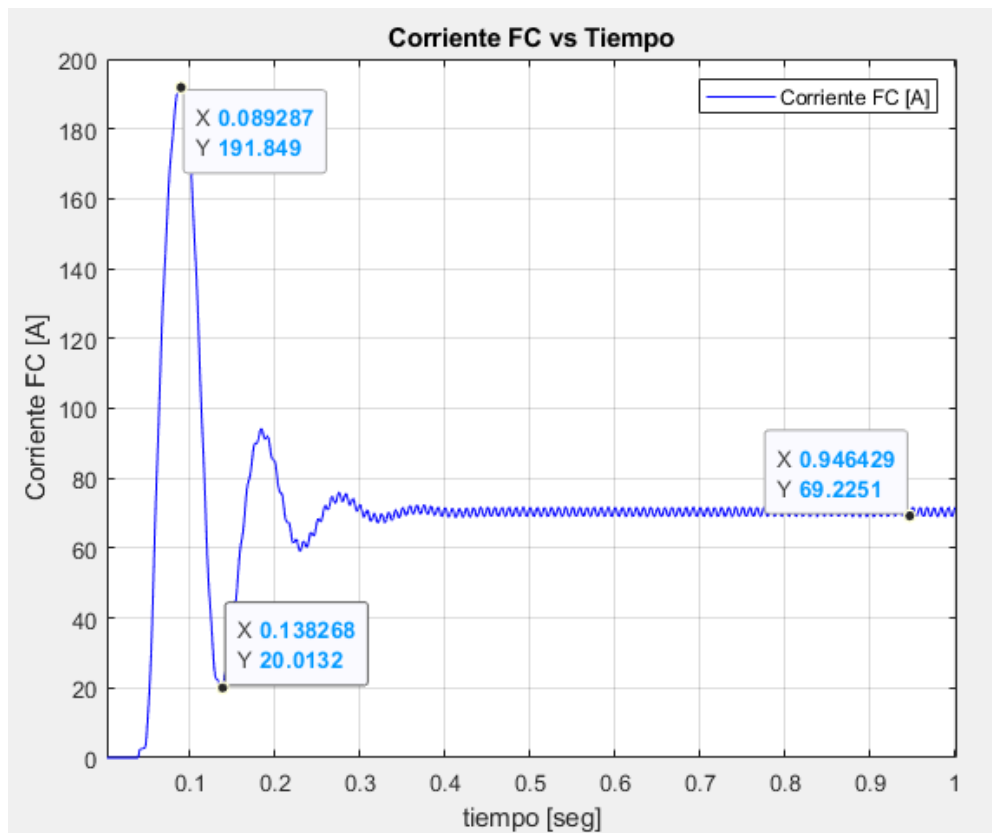


Figura 3.66 Corriente vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia

De la misma manera se presenta la corriente versus el tiempo en la Figura 3.66, donde la corriente en estado estable resulta un valor de 69.23A; corriente la cual es la que sale del banco de celdas de combustible e ingresa al inversor. El nivel de corriente que proporciona el banco dependerá de la carga que esté presente en la residencia, para este caso en el análisis se presenta este nivel de corriente para toda la carga residencial.

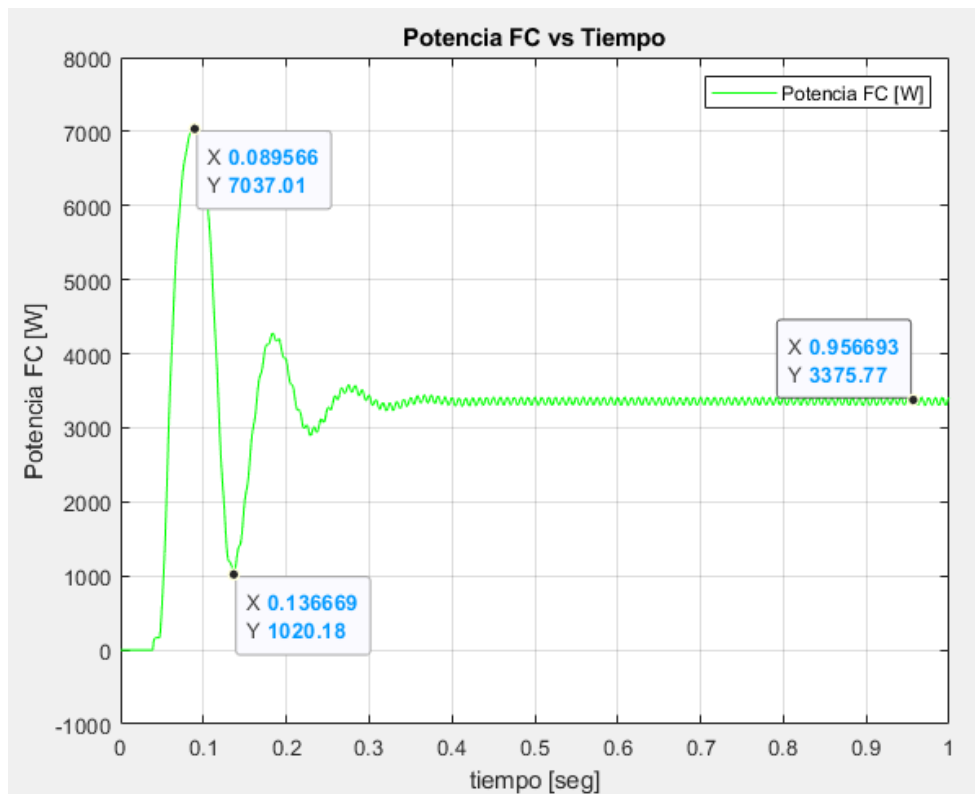


Figura 3.67 Potencia vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia

Por su parte, la Figura 3.67 nos muestra la curva de la potencia frente al tiempo, donde podemos observar la potencia proporcionada por el banco de celdas de combustible de un valor de 3.37kW, de los cuales el inversor consumirá cierta potencia y a partir de aquí llegará hasta el panel de distribución residencial para alimentar a las cargas.

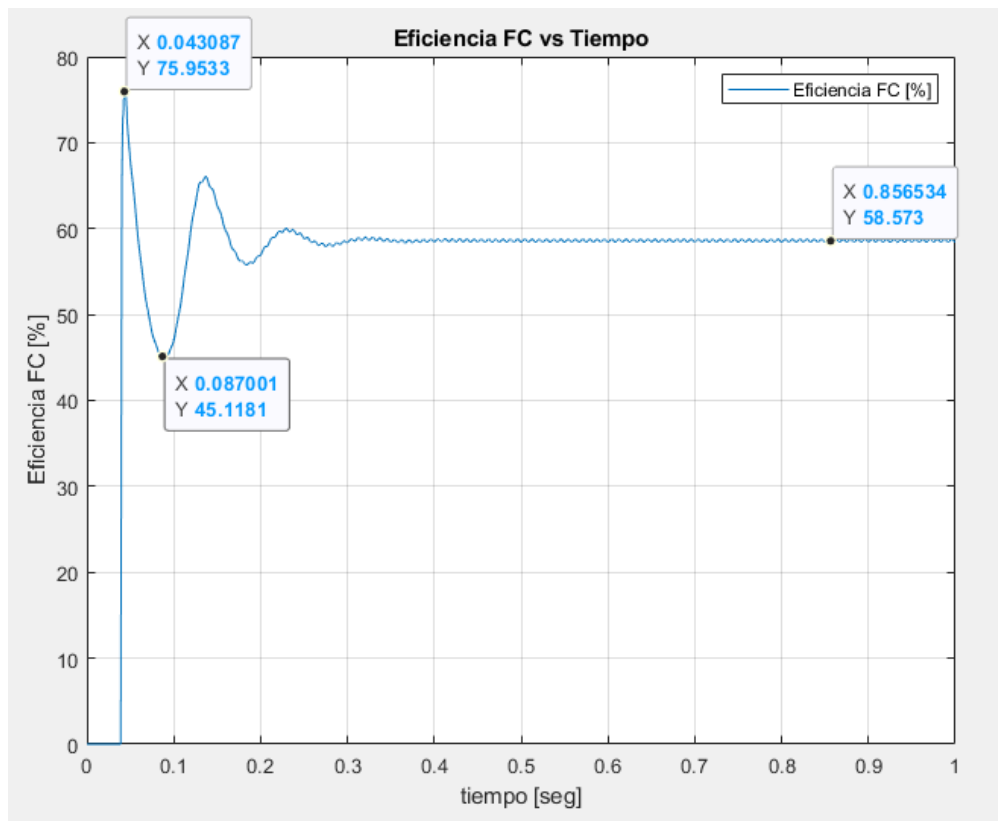


Figura 3.68 Potencia vs Tiempo del banco de celdas de combustible con los parámetros hallados para la máxima eficiencia

Finalmente en la Figura 3.68 se muestra la curva de la eficiencia versus el tiempo, parámetro con mayor consideración para la elección de los niveles de presión, temperatura y caudal de alimentación; donde la eficiencia llega hasta un valor del 58% en estado estable, donde podemos observar que el sistema tiene una rápida respuesta, ya que el sistema se estabiliza alrededor de los 0.4 segundos, el cual es una de las ventajas que presentan las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- 1) Como una de las conclusiones generales del estudio, se encontró inicialmente que, las celdas de combustible del tipo de membrana de intercambio protónico, tienen aplicaciones estacionarias, lo cual es uno de los objetivos de este proyecto, ya que se necesitó alimentar a una residencia de 3kW; además de estos las celdas de combustible tipo PEMFC son el tipo de celdas que trabajan a un rango de temperatura menor en comparación a los otros tipos de celdas de combustible, siendo 90°C su máximo nivel de temperatura, lo cual es un parámetro de relevancia para la aplicación y puesta en marcha en una residencia.
- 2) Como primicia del diseño conceptual del banco de celdas de combustible se eligió una potencia de 6kW, para alimentar la residencia de 3kW con la finalidad de que el banco en cuestión no trabaje a un nivel elevado de tensión y corriente, generando así una elevada temperatura de operación, lo cual podría ser un riesgo en la residencia; además teniendo un banco del doble de la potencia demandada, nos brinda la comodidad de que si en la residencia se presenta un aumento de cargas, el sistema pueda responder acorde a ello sin ningún problema; las distintas cargas de una residencia como los motores, normalmente generan picos de corriente elevada de 5 a 7 veces su corriente nominal, lo cual es otra razón por la cual se eligió un banco de 6kW al permitir estas elevadas corrientes momentáneas ya que el banco es capaz de generar esa corriente, a diferencia de un banco de justamente 3kW que tal vez no pueda generar esta elevada corriente de arranque y su vida útil se vea afectada .
- 3) Los sistemas de control de temperatura y humedad en especial, conllevan a obtener equipos externos al banco de celdas de combustible, para lograr que estos parámetros estén en los niveles adecuados para generar una alta

eficiencia; en una implementación física se debería obtener información de las empresas que comercializar estos productos para adquirir estos banco de celdas de combustible con su equipo externo, que incluso viene incorporado el controlador de estos equipos, una de estas marcas es Horizon que comercializa bancos de celdas de combustible con el equipo externo.

- 4) Con respecto a los resultados obtenidos, es importante mencionar que, a pesar de que a una mayor temperatura, se presente una mayor eficiencia, también se presenta el problema en la implementación física posible de este proyecto, ya que al tener un equipo a unos 90°C (58% de eficiencia), podríamos poner en riesgo la vida de las personas de la residencia; en los resultados se muestra además que cuando reducimos la temperatura efectivamente se ve un decrecimiento en la eficiencia, pero este cambio es de alrededor 3 o 4% de la eficiencia con respecto al cambio de unos 30 o 40°C de temperatura, por lo cual sería mejor tener una baja temperatura considerando la pérdida de 3% de la eficiencia con la finalidad de preservar la temperatura de operación del banco ya que estaría presente en una residencia.
- 5) Gracias a Simulink se pudo realizar las pruebas de caracterización del banco de celdas de combustible, el cual nos permitió obtener todos los gráficos resultantes presentes en el capítulo 3; donde como conclusión general de la caracterización se tiene que a una presión de 1.5 Bar de hidrógeno y 1 Bar de aire, una temperatura de operación de 90°C y un caudal de 42 lpm para el hidrógeno y de 250 lpm para el aire, se tiene la mayor eficiencia del 58% del banco de celdas de combustible.
- 6) Con respecto al caso particular de la variación de presión, podemos concluir que, al aumentar la presión tanto de hidrógeno como de aire, tenemos un incremento de voltaje del banco de celdas de combustible, pero se visualiza una reducción de eficiencia del mismo, por lo cual la mejor opción de presión de hidrógeno y de aire es de 1.5 Bar y de 1 Bar respectivamente; cabe mencionar que con respecto a la diferencia de presión del hidrógeno y del aire no debe ser

mayor a unos 0.5 Bar, ya que internamente esta diferencia de presión se presenta en el ánodo y cátodo de la celda de combustible y podría perforar o dañar la membrana a causa de la gran diferencia de presión.

- 7) Es fácil el pensamiento de que cuando se alimenta al banco a mayor caudal de combustible, tendríamos la máxima eficiencia del banco, pero esto no se da en la caracterización debido a que al alimentar el mismo sistema de carga tanto para 120 Vac como para 240 Vac, estaríamos generando un desperdicio de hidrógeno al hacer circular el caudal máximo por ejemplo al mismo sistema de cargas, donde este último solo necesita de un caudal del 50% de alimentación para el banco, para abastecer la carga residencial.

4.2 RECOMENDACIONES

- I. Para lograr obtener la caracterización del banco de celdas de combustible estudiado es este proyecto, se realizó las pruebas en forma ordenada, de tal manera que como se pudo visualizar en el capítulo 3, se empieza con las respuestas del banco cuando no se presenta ninguna carga; continuando con las variaciones de caudal tanto de hidrogeno como de aire, seguido del cambio de temperatura y finalmente las variaciones de presión de los gases.
- II. Se recomienda estudiar previamente las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del banco de celdas de combustible en general, para entender previamente lo que se está realizando y simulando; acorde a esto se puede tener un criterio propio de que se está obteniendo resultados verdaderos.
- III. Para posibles aplicaciones de esta tecnología, hay que tener en cuenta que a partir de la demanda de la residencia (para este proyecto es de 3kW) se debe seleccionar un banco de celdas de combustible de un nivel superior a la demanda para no tener inconvenientes con las cargas que generan picos de corriente en el arranque.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. D. James Larminie, Fuel Cell Systems Explained, Copyright © 2003 John Wiley & Sons Ltd, 18 febrero del 2003.
- [2] C. Otero, «Tecno-científico,» 15 Agosto 2010. [En línea]. Available: <http://tecnociencia-tecnopedia.blogspot.com/2010/08/fuel-cells-o-celdas-de-combustible.html>. [Último acceso: 13 Octubre 2021].
- [3] E. COMUNICACION, «EADIC formación y consultoría,» 11 Noviembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.eadic.com/asi-funcionan-las-celdas-de-combustible/>. [Último acceso: 2021].
- [4] «USURBILGO LAMBIDE ESKOLA,» [En línea]. Available: http://www.lhusurbil.com/web/es_pila_de_hidrogeno_650.aspx.
- [5] «EcuRED,» 2012. [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Celda_de_combustible.
- [6] Apilados, «Apilados,» 17 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://apilados.com/blog/tipos-de-pilas-de-combustible-su-clasificacion/>.
- [7] C. F. -. B. Badía, «Energética del Hidrógeno,» [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/3.4+C%C3%A9lulas+de+Combustible.pdf>.
- [8] L. A. Escobar, «Análisis de un sistema de alimentación basado en pilas de combustible,» [En línea].
- [9] N. H. Zárate, «BUAP,» 1 2018. [En línea]. Available: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/915>.
- [10] D. C. Spiegel, «Fuel Cell store,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/considerations-for-fuel-cell-design>.
- [11] W. A. G., «researchgate,» 2013. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Superficie-de-control-del-control-Fuzzy-proporcional-5-CONCLUSIONES-Y-PERSPECTIVAS_fig5_228811585.

- [12] N. G. A. B. Zakaria BAROUD, «Algebraic Observer Design for PEM fuel cell system,» 2008.
- [13] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>.
- [14] Horizon, «Fuel Cell Store Horizon,» [En línea]. Available: <https://www.fuelcellstore.com/manuals/horizon-pem-fuel-cell-h-5000-manual.pdf>.
- [15] Growatt. [En línea]. Available: <https://geravolt.shop/wp-content/uploads/2021/02/Ficha-Tecnica-SPF4-12.pdf>.
- [16] «ambientum,» 7 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/principales-problemas-del-uso-de-combustibles-fosiles.asp>.
- [17] Energía, «Comisión Europea,» 18 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/info/news/focus-renewable-energy-europe-2020-mar-18_es.
- [18] E. Comissison, «Europa Commisson,» Mayo 2019. [En línea]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en.

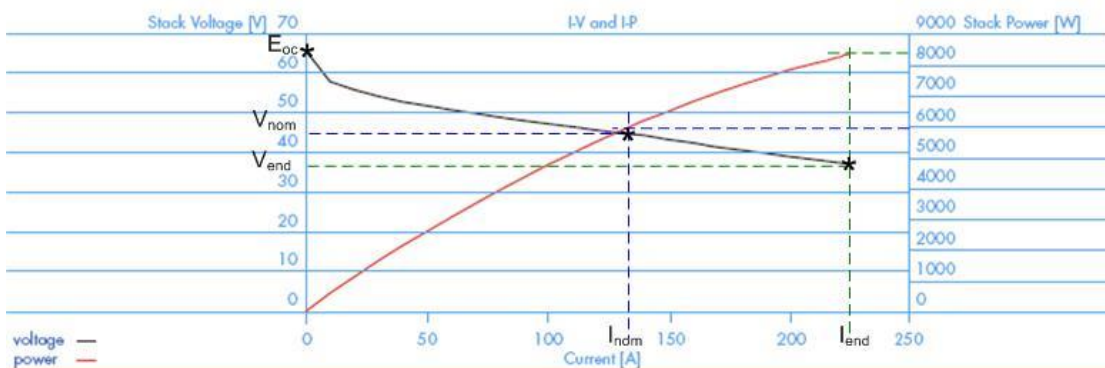
ANEXOS

ANEXO 1

Características de una Pem Fuel Cell de NetStack PS6, donde se puede visualizar sus datos mas importantes donde se basa el modelo de Simulink.

Type	6 kW fuel cell system	NetStack PS6	
Performance	Net Rated Electrical Peak Power	7 kW (DC)	
	Net Rated Electrical Nominal Power	5 kW (AC)	
	Output voltage	60–32 V (DC)	
	Operating current range	0–225 A (DC)	
	Typical Beginning of Life Voltage Range	42 V at nominal	
	Efficiency – LHV	55 % (stack) / 50 % (system)	
	Time from off model to idle	Within 3 min.	
	Time from 10% to full power	Approx. 10 s	
	Expected Life	20,000 h (stack)	
	Maintenance routine	2,000 h (system)	
	Operational ambient temperature	-20 – +40 °C	
	Fuel	H2 or Reformat	
		Purity	99,999 % H2 or Reformat (<50 ppm CO)
Supply pressure		0.5–5 bar	
Stack Operating Pressure		ambient	
Maximum Consumption		12.5 slpm/kW	
Air delivery system	Flow rate	Max. 500 l/min	
	Supply pressure	Ambient	
Physical	Dimensions	400 × 600 × 1600 mm	
	Mass	Approx. 80 kg	
Emissions	Water collected	75 l/min.	
	NOx, SOx	0	
Cooling system requirements	Heat Rejection to Coolant at Maximum Power	10 kW	
	Maximum Ambient Temperature	45 °C	
	FCPM Operating Temperature	65 °C	
	Cooling method	Radiator Fan	

JV-curve NedStack P8/PS6



Hoja de datos PEM Fuel Cell modelo NetStack PS6

ANEXO 2

Hoja de datos del inversor monofásico de fase dividida SPF 6000T DVM Growatt con cargador para baterías tipo MPPT incluido, salida 120VAC/240VAC.

Hoja de Datos	SPF 4000T DVM	SPF 5000T DVM	SPF 6000T DVM	SPF 8000T DVM	SPF 10000T DVM	SPF 12000T DVM
Voltaje de Batería	48VDC					
Tipo de Batería	Litio,Plomo-ácido					
Salida del Inversor						
Potencia nominal	4kW	5kW	6kW	8kW	10kW	12kW
Sobretensión	12kW	15kW	18kW	24kW	30kW	36kW
Tipo de onda	Onda sinusoidal pura / igual que la entrada (modo bypas)					
Voltaje de CA(Modo batería)	104-110-115-120 / 208-220-230-240VAC (opcional)					
Frecuencia de red CA (Rango)	50Hz/60Hz(49.7--50.3Hz/59.7--60.3Hz)					
Eficiencia max.	>85%					
Tiempo de transferencia	10 ms(Para Computadoras); 20 ms (Para Electrodomésticos)					
Cargador Solar						
Corriente máxima de carga	80A			120A		
Máxima potencia PV	5000W			7000W		
Rango de voltaje del MPPT	60-145VDC					
Max. Voltaje de circuito abierto PV	150VDC					
Máxima eficiencia	>98%					
Cargador CA						
Voltaje de entrada CA	240 /AC					
Rangos de voltaje	184--272VAC (Para computadoras); 54--272VAC (Para electrodomésticos)					
Rango de frecuencia	50Hz / 60Hz (detección automática)					
Max. Corriente de carga	40A	50A	60A	70A	80A	100A
Datos Generales						
Grado de protección	IP20					
Dimensiones	360/540/218mm	360/540/218mm	360/540/218mm	380/650/225mm	380/650/225mm	380/650/225mm
Peso	42kg	47kg	52kg	64kg	66kg	75kg

Figura Hoja de datos Inversor 6 kW Growatt 120/240VAC (todo en uno)

