

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN
SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN
PANEL FOTOVOLTAICO-
CELDA DE COMBUSTIBLE PEM PARA
APLICACIONES DE MICRO-
COGENERACIÓN
EN USO RESIDENCIAL**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN
SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN
PANEL FOTOVOLTAICO-
CELDA DE COMBUSTIBLE PEM PARA
APLICACIONES DE MICRO-
COGENERACIÓN
EN USO RESIDENCIAL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: DANIEL FERNANDO VARGAS ORDÓÑEZ

TUTOR: LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA

Quito -Ecuador
2023

Daniel Fernando Vargas Ordóñez

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN PANEL FOTOVOLTAICO-CELDA DE COMBUSTIBLE PEM PARA APLICACIONES DE MICRO-COGENERACIÓN EN USO RESIDENCIAL.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023
Carrera de Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Daniel Fernando Vargas Ordóñez (Y'1994 – S'27). Nació en Quito, Ecuador. Bachiller técnico electromecánico en el colegio Técnico San José, Ecuador 2012. Egresado de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. Áreas de interés: Energías renovables, Protecciones en sistemas eléctricos de potencia. jdvargas01@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Luis Fernando Tipán Vergara (Y'1982 – J'12). Nació en Quito, Ecuador, el 21 de junio de 1982. Se graduó de la Facultad de Ingeniería Eléctrica como Ingeniero en Electrónica en Control en la Escuela Politécnica Nacional. Sus estudios de postgrado los hizo en la Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica, obteniendo el grado de Magister en Eficiencia Energética. Su experiencia la ha desarrollado en el área de mantenimiento y en el diseño especializado de ingeniería básica y de detalle para el desarrollo, expansión y/o mejoramiento de las facilidades de superficie y producción petrolera, actualmente imparte las cátedras de Electrónica Digital, Electrónica de Potencia Física Moderna en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus intereses de investigación incluyen los métodos de GD con Energías alternativas, el IoT basándose en controladores de bajo consumo. Electrónica de potencia, entre otros. ntesla@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO – ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN**

Yo, Daniel Fernando Vargas Ordóñez con documento de identificación N° 1719143610, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 24 de marzo del año 2023

Atentamente,



Daniel Fernando Vargas Ordóñez
1719143610

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Daniel Fernando Vargas Ordoñez, con documento de identificación N° 1719143610, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: "Caracterización Dinámica de un sistema Híbrido de Generación Panel fotovoltaico-Celda de Combustible pem para aplicaciones de Micro- cogeneración en uso residencial", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de marzo del año 2023

Atentamente,



Daniel Fernando Vargas Ordoñez
1719143610

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara con documento de identificación N° 1717329005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN PANEL FOTOVOLTAICO-CELDA DE COMBUSTIBLE PEM PARA APLICACIONES DE MICRO-COGENERACIÓN EN USO RESIDENCIAL**, realizado por Daniel Fernando Vargas Ordóñez, con documento de identificación N° 1719143610, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 24 de marzo del año 2023

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc
1717329005

INDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico	3
2.1	Panel fotovoltaico	3
2.2	Celda de combustible.....	5
2.3	Sistemas estacionarios de potencia.....	8
2.4	Hidrógeno en calidad de vector energético.....	9
2.5	Electrólisis.....	9
2.6	Almacenamiento de energía	10
2.7	Controlador de potencia	10
2.8	Inversor.....	11
3	Sistema acoplado de electricidad-calor	11
3.1	Sistema híbrido de generación eléctrica renovable.....	11
3.2	Sistema de cogeneración	13
4	Modelo matemático del sistema híbrido de generación	17
4.1	Sistema Panel Fotovoltaico.....	17
4.2	Sistema celda de combustible.....	18
4.3	Sistema módulo electrolizador	19
4.4	Modelo controlador de carga	20
4.5	Modelo de las baterías	20
4.6	Modelo del inversor.....	20
5	Análisis de resultados del sistema híbrido de generación.....	20
5.1	Operación en la carga.....	21
5.1.1	Voltaje en la carga.	21
5.1.2	Corriente en la carga.....	22
5.1.3	Potencia en la carga.....	22
5.1.4	Distorsión armónica.....	23
5.2	Sistema de Baterías	23
5.2.1	Voltaje en las baterías.	23
5.2.2	SOC en las baterías.	23
5.2.3	Corriente en las baterías.....	24

5.3	Sistema celda de combustible.....	24
5.3.1	Voltaje en la celda de combustible.	24
5.3.2	Corriente en la celda de combustible.....	25
5.3.3	Potencia en la celda de combustible.....	25
5.4	Potencia del sistema híbrido de generación	25
5.5	Análisis del sistema en diferentes condiciones de operación	26
6	Análisis de resultados sistema de cogeneración	31
6.1	Funcionamiento del sistema de recuperación de calor	33
6.2	Análisis dimensional del sistema de cogeneración.....	34
6.3	Selección de tubería de succión	34
6.4	Selección de tubería de descarga.....	35
6.5	Selección del intercambiador de calor	36
6.6	Modelo NTU	38
6.7	Selección bomba de agua	38
7	Conclusiones.....	40
8	Recomendaciones.....	41
9	Trabajos futuros	41
10	Referencias.....	41
11	Anexos	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito equivalente celda fotovoltaico [12].	4
Figura 2. Esquema de una celda de combustible [7].	6
Figura 3. Diagrama del sistema híbrido de generación eléctrica [autor].	12
Figura 4. Equipo CHP para cogeneración electricidad-calor [28].	14
Figura 5. Circuito equivalente celda de combustible [7].	18
Figura 6. Voltaje en la carga.	22
Figura 7. Corriente en la carga.	22
Figura 8. Potencia en la carga.	22
Figura 9. Distorsión armónica.	23
Figura 10. Voltaje en las baterías.	23
Figura 11. SOC de las baterías.	24
Figura 12. Corriente en las baterías.	24
Figura 13. Voltaje en la celda de combustible.	25
Figura 14. Corriente en la celda de combustible.	25
Figura 15. Potencia en la celda de combustible.	25
Figura 16. Potencia en el sistema híbrido de generación.	26
Figura 17. Irradiancia en función de la potencia del panel fotovoltaico.	28
Figura 18. Eficiencia del sistema híbrido.	29
Figura 19. Irradiancia vs flujo de hidrógeno.	30
Figura 20. Voltaje de la celda de combustible vs flujo de hidrógeno.	31
Figura 21. Sistema de cogeneración [autor].	32
Figura 22. Diagrama de flujo del sistema híbrido de generación [autor].	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de las clases de pila de combustible en cogeneración [9],[28],[39].	13
Tabla 2. Características del panel solar [48].	21
Tabla 3. Características del electrolizador [48].	21
Tabla 4. Características de las baterías [49].	21
Tabla 5. Características del inversor [50].	21
Tabla 6. Leyenda diseño del sistema de cogeneración [52].	32
Tabla 7. Parámetros iniciales de diseño del intercambiador de calor.	33
Tabla 8. Características de la celda de combustible tipo pem marca Horizon [52].	33
Tabla 9. Parámetros iniciales del sistema de cogeneración.	33
Tabla 10. Resumen de tuberías sistema de cogeneración.	36
Tabla 11. Datos para el dimensionamiento de la bomba.	40
Tabla 12. Resumen del sistema de cogeneración propuesto.	40
Tabla 13. Clasificación de las celdas de combustible [7],[18],[19].	46

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN PANEL FOTOVOLTAICO-CELDA DE COMBUSTIBLE PEM PARA APLICACIONES DE MICRO-COGENERACIÓN EN USO RESIDENCIAL

Resumen

El creciente aumento de la población obliga a la industria global a generar mayores cantidades de procesos en diferentes sectores como alimenticios, petroleros, la medicina. lo que supone un incremento en la demanda y con ello una mayor producción de energía eléctrica. En esta investigación el enfoque está dirigido al sector inmobiliario, considerando que todo tipo de edificio o vivienda no solo cubre la demanda eléctrica, también abarca energía para calefacción y refrigeración, en este contexto los sistemas de cogeneración acoplados para la producción de calor y electricidad es una opción viable. He aquí la principal justificación de la presente, realizar un modelo dinámico basado en ecuaciones de conversión de energía, que permita dar una proyección de diseño de sistemas de generación híbrida. Los resultados de este documento, permitirán visualizar cómo se comporta el sistema combinado a diferentes condiciones climáticas, y a su vez se dará un análisis para la determinación de cuan eficiente puede resultar el sistema. Por otro lado, los resultados de esta investigación están destinados a obtener un modelo de sistema que permita recuperar el calor producido de una celda de combustible pem.

Palabras Clave: Celda de combustible pem, Electrolizador, Cogeneración, Intercambiador de calor, Sistema híbrido.

Abstract

The growing increase in population forces the global industry to generate more significant amounts of processes in different sectors such as food, oil, and medicine, which means an increase in demand, with it, greater production of electrical energy. This research focuses on the real estate sector since all types of buildings or houses cover electricity demand and energy for heating and cooling. In this context, coupled cogeneration systems for producing heat and electricity are a viable option. Here is the main justification of the present to carry out a dynamic model based on energy conversion equations, which allows giving a projection of the design of hybrid generation systems. The results of this document will allow visualization of how the combined system behaves under different climatic conditions. In turn, an analysis will be given to determine how efficient the system can be. On the other hand, the results of this research are intended to obtain a system model that allows the recovery of residual heat from a fuel cell.

Keywords: Fuel cell pem, Electrolyzer, Cogeneration, Heat exchanger, Renewable hybrid power systems.

1 Introducción

Sustentabilidad es una palabra que tiene un significado muy imperativo en el actual siglo XXI, ya que hace referencia al cuidado de la atmósfera y a la conservación de los recursos naturales. Para lograr el perfecto equilibrio de convivencia entre el ser humano y el planeta, es necesario el avance de tecnologías que mitiguen al 100% los gases contaminantes al ambiente, por tal motivo en la actualidad se puede observar un uso general de energías renovables [1]. Ahora podemos observar que su uso no solo contempla pequeños sistemas eléctricos, de la misma manera son empleados para un sinnúmero de posibilidades como, la generación distribuida, o como suministro de energía eléctrica en zonas completamente aisladas del servicio eléctrico [1]. Una nueva alternativa hoy en día es el uso conjunto de energías renovables con hidrógeno, juntos conforman sistemas de suministro predominantes ante otras tecnologías, ya que a la hora de implementar una estructura energética que incluya energías renovables, es de suma importancia seleccionar la forma adecuada de almacenar la energía producida [2], por lo cual este gas es perfecto para el almacenamiento de energía limpia en los próximos años [3].

La principal dificultad de estas tecnologías es debido a su origen, ya que presentan cambios en el tiempo que imposibilitan el uso continuo de la energía eléctrica, limitando así las horas de máxima demanda [2]. Una solución a esta problemática son los sistemas combinados o sistemas híbridos de generación renovable, donde se incluyan dos o más tecnologías de esta índole, con esto se pretende mejorar la disponibilidad de energía para consumo [1],[4]. Es por eso que entre todas las tecnologías

amigables con el entorno, la energía solar fotovoltaica es una opción eficaz en cuanto a generación, debido a su madurez en el mercado [1],[5].

Por otro lado, la generación de energía estacionaria fundamentada en celdas de combustible se ha extendido con un alto nivel de proyección en la actualidad preciso por su alto rendimiento como sistema combinado y a su alta modularidad [6], ya que al ser compactos y ligeros pueden adaptarse fácilmente a otros equipos [7], para así cumplir fines específicos como suministro de energía eléctrica y a su vez como un sistema de recuperación de energía térmica [8]. A esta manera de producción se la nombra como la obtención de potencia y calor (CHP) [9]. Y como esta investigación tiene como por objetivo intrínseco mejorar el conocimiento relacionado con sistemas de cogeneración en aplicaciones residenciales (viviendas unifamiliares), en el siguiente apartado se define un corto estudio teórico de los sistemas CHP que ya se encuentran en operación bajo diferentes industrias y marcas de celda de combustible [8].

Uno de los proyectos que se han llevado a la práctica en cuanto a sistemas de cogeneración residencial es el nombrado “Proyect PEMFC”, desarrollado por “Technology Development Department, Tokio Gas Co., Ltd.” [8], esta compañía lanzó el primer equipo funcional basado en PEMFC-CHP, este sistema consta de un depósito de agua caliente para suplir exigencias de uso térmico en la residencia, con respecto a la transformación eléctrica se conecta a la red general de distribución [5],[8]. Se estima que estos modelos de cogeneración, pem, para una vivienda unifamiliar, su potencial eléctrico sea de 1 kW [6], a la vez como se menciona en [7], se podrá extraer de manera proporcional energía calorífica y energía eléctrica de la

celda pemfc, es decir con una celda de combustible de 1000 W de potencia, se podrán extraer 1000 W de potencia calorífica [8]. En cuanto a eficiencia eléctrica se promedian valores del 30%-32%, y un 40 % en niveles de eficiencia calorífica. Por otro lado, la vida útil se estima períodos de 40000 horas/ 4000 ciclos correspondientes a 10 años de uso [5],[8]. Podemos destacar también el proyecto desarrollado por la compañía “Ballard Generation Systems Inc”, situada en Canadá, este sistema ha operado durante 5.026 horas, generando 624 MWh [8], con relación a eficiencia eléctrica se sitúan valores en torno al 34%, y un 42% de eficiencia térmica, como consecuencia su eficiencia global ronda un 76%, de igual manera su conexión a la red eléctrica de distribución es necesaria para suplir aplicaciones eléctricas dentro de la vivienda [9],[8]. En 2010 la industrias Panasonic y Toshiba, promovieron la instalación de pilas de combustible para cogeneración en 5000 viviendas en Japón, esta tecnología se subsidia por el gobierno en un 50% por sus efectos positivos en el medio ambiente [8]. En el mismo país se comercializa un modelo de celda de combustible denominado: “Residential Fuel Cell” [8], este sistema ocupa hidrógeno para su funcionamiento, se trata de un conjunto operativo de elementos capaces de suministrar energía eléctrica y agua caliente [9]. Panasonic encargada de este modelo, dispone de dos tipos de cogeneración residencial, un modelo que incorpora una celda de combustible conjuntamente con un sistema de almacenamiento de agua caliente, y el otro modelo [8], que aparte de los dos mencionados incluye la instalación de una caldera de apoyo, este último presenta una potencia de salida de 700 W. Actualmente esta tecnología

cuenta con equipos instalados en Alemania y Reino Unido [8],[10].

2 Marco teórico

En este apartado de la investigación se dará a conocer la fundamentación teórica con la que se desarrolló el sistema para su posterior simulación:

2.1 Panel fotovoltaico

Este sector tecnológico ofrece una opción viable ya sea como sistema autónomo o en generación distribuida, logrando alta inclusión en cualquier parte del mundo donde las condiciones climáticas sean favorables, ya que dependerá de la temperatura ambiente y nivel de irradiancia solar W/m^2 para su producción [5]. Esta energía de manera puntual se utiliza en dos aplicaciones para la generación eléctrica o la producción de energía calorífica [5],[11].

- **Celda fotovoltaica**

Este elemento es el encargado de asimilar la energía provocada por la propagación solar, y a su vez generar una corriente eléctrica, este es el principio base de los módulos fotovoltaicos que son más que celdas apiladas en una determinada configuración, enlazadas entre sí para transformación de energía [12]. Es por esto que se han destinado materiales y compuestos específicos, detallados en la investigación, para el aprovechamiento de este tipo de efecto, que se resume como tal en absorber fotones de luz y emitir electrones libres que son manipulados para generar corriente eléctrica DC [5],[12]. Dicho esto, las células están conformadas por el enlace de un semiconductor de clase n y otro clase p, cuando estos materiales entran en contacto se convierte en una unión (p-n)

debido a la difusión los electrones fluyen desde la zona de más concentración (n) a la zona (p) de inferior concentración, este proceso también aplica para los huecos, electrones con carga positiva [5]. El desequilibrio de estas cargas a ambos lados del material da como resultado un campo electromagnético, y en su momento una diferencia de potencial cercano a los 0,5v por cada celda, el material del que se componen mayormente es de silicio, de ahí su clasificación [5],[13].

- Silicio cristalino.
- Silicio amorfo.

Una vez descrito los materiales de fabricación comercial y el efecto que tiene implícito, se detallará la parte eléctrica que conlleva esta conversión.

- **Electricidad de una celda fotovoltaica**

Como principio debemos tomar en consideración que el dispositivo eléctrico que basa su funcionamiento en la unión p-n es el diodo [5], la ecuación de Shockley determina la curva V-I de este dispositivo y queda en la ecuación 1 [5]:

$$I_D = I_0 * \left[\exp * \left(\frac{V}{m * V_T} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Donde: I_0 es la corriente de saturación del diodo, V es el voltaje aplicado al diodo y m el factor de idealidad del diodo, el factor m se utiliza para ajustar los valores de la ecuación y sus valores están entre 1 y 2 [5].

Para analizar el correcto funcionamiento de la célula solar, a este comportamiento se lo puede modelar por medio de un circuito eléctrico equivalente

a una sola celda, de ahí resulta conveniente emplear modelos equivalentes donde se tomen en cuenta resistencias propias del material [5],[14], en el circuito estas pérdidas serán representadas por una resistencia en serie R_s .

La corriente fotogenerada es directamente proporcional a la irradiación del sol y se la representará por medio de una fuente de corriente I_{PH} , en condiciones estándar el nivel de irradiación es igual a 1 sol equivalente a $1000 \frac{w}{m^2}$; y como hemos mencionado el diodo que por el circula la corriente I_D , conformada por la corriente I_0 [5]. En esta ecuación infiere la variable V_T que es el voltaje térmico del diodo, para una temperatura ambiente alrededor de 25°C o 300°K, en condiciones estándar [5].

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2)$$

Siendo así: k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de operación del diodo medido en °K, y q representa la carga del electrón. Entonces el circuito eléctrico equivalente se define en la imagen de la Figura 1 [12].

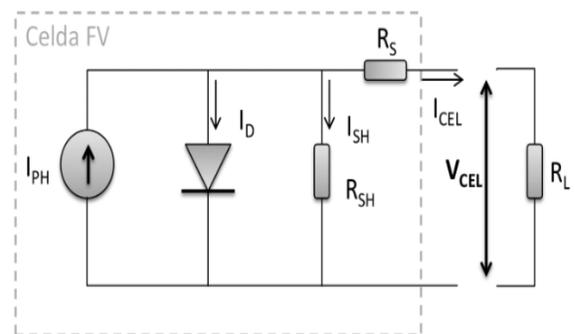


Figura 1. Circuito equivalente celda fotovoltaico [12].

Como se menciona en [5], “la resistencia R_{SH} representa fugas de corriente en la celda fotovoltaica y los posibles cortocircuitos metálicos, para el modelado en ciertas ocasiones esta resistencia se desprecia”. Realizando un análisis circuital la corriente total se expresa mediante las ecuaciones 3 y 4 [14].

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (3)$$

$$I = I_{PH} - I_0 * \left[e^{\frac{V+(I*R_s)}{m*V_T}} - 1 \right] \quad (4)$$

Donde: I es la corriente total generada de la celda, y I_{PH} se usa para designar la fotocorriente [5]. De esta manera, podemos parametrizar el comportamiento eléctrico de una celda fotovoltaica [14], algunos de estos parámetros los facilita el fabricante, además cada panel posee su propia curva de operación determinada por valores de voltaje y corriente V-I, sometidos a condiciones estándar de medida [5].

Como es de interés en la investigación el panel fotovoltaico es el encargado de suministrar energía eléctrica a la carga de forma directa y también en condiciones donde las baterías estén cargadas completamente, suministrará de corriente regulada al electrolizador para la obtención de hidrógeno que es el reactivo de operación para la celda pem [15]. En estos sistemas los módulos fotovoltaicos suelen estar conectados a un controlador de potencia y a un convertidor de corriente continua DC-DC, ya que estos equipos denominados electrolizadores precisan de una corriente y una tensión específica para su correcto funcionamiento. Es por esto que se toma

en consideración el acondicionamiento de estas señales en la simulación mediante controladores de flujo o potencia [1].

2.2 Celda de combustible

En la actualidad esta es una de las tecnologías con un alto nivel de desarrollo científico, ya que utiliza el hidrógeno como carburante, que es considerado como un vector energético amigable con el medio ambiente [1]. Estos estudios especializados tratan de mejorar aspectos tales como: materiales de fabricación, construcción de componentes, sistemas eficientes de control y potencia, sistemas aplicados en la industria automotriz, puesta en marcha sistemas de cogeneración, y desarrollo de equipos de control que permitan la optimización de este dispositivo [7],[16].

Todo esto con la finalidad de aumentar índices de confiabilidad y eficiencia, ya que se desea que esta tecnología proporcione un apoyo energético sustentable en los próximos años [17],[18]. En este contexto, la celda de combustible presenta numerosas características en cuanto a diseño y fabricación que fomentan el desarrollo continuo [6], como son altas tasas de eficiencia al momento de operación, sus aplicativos no son dependientes del tamaño ya que se ajustan a diferentes rangos energéticos y una característica importante es que estos sistemas pueden operar a media carga, esto quiere decir que realizan un eficiente uso del combustible [16],[19]. Ya mencionadas ciertas propiedades de esta tecnología se puede argumentar una definición puntual ya descrita en investigaciones referidas al tema [7]:

“Una pila de combustible es un equipo electroquímico, que modifica la energía química en energía eléctrica” [7],[18], este proceso químico es similar al de una

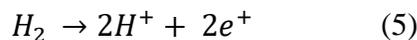
batería con la primordial característica de que está diseñado para el reaprovisionamiento constante del combustible, por así decirlo la energía eléctrica producida por este dispositivo no se agota mientras que el suministro de los reactivos que son hidrógeno y oxígeno sean continuos, los subproductos resultantes de esta reacción son calor y agua [7],[19].

Para realizar un correcto estudio de la celda de combustible, el presente artículo se ha dividido en tres secciones descritas a continuación:

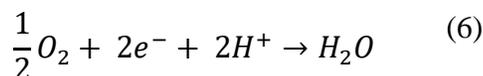
- **Especificación de una celda de combustible**

La estructura está compuesta por una capa electrolítica en contacto con dos electrodos, ánodo por un lado y por el otro lado de la celda el cátodo [7]. El hidrógeno se suministra a través de conductos hasta el ánodo, el contacto del mismo con el electrodo y en presencia de un catalizador, produce una reacción que separa a los electrones y a protones o iones positivos. A este proceso se lo denomina oxidación del hidrógeno. Por otro lado, el proceso de reducción tiene lugar en el electrodo cátodo, el reactivo suministrado es el oxígeno en forma de aire [7],[18],[19]. Los cambios químicos que se llevan a efecto en la pila de combustible se describen en la ecuación 5,6,7 [19].

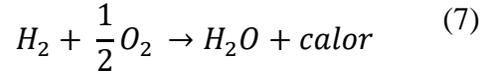
Reacción anódica:



Reacción catódica:



Reacción exotérmica global:



Estas ecuaciones son válidas para un modelo donde el combustible suministrado hacia la celda sea hidrógeno y el oxígeno como oxidante, “no obstante toda materia capaz de ser oxidada y reducida se puede utilizar en la celda” [4],[6],[7]. En la Figura 2 se indica el esquema de una celda de combustible con sus respectivos flujos de reactivos y productos [7].

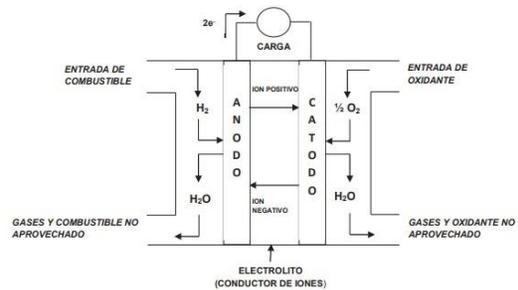


Figura 2. Esquema de una celda de combustible [7].

Si se analiza la Figura 2, los electrones que proporcionan corriente eléctrica del tipo DC, son dirigidos hacia los terminales donde se conectará la carga, esto se lo hace a través de un material conductor, por medio de un circuito externo propio en la celda [4], [7]. Se indica también el flujo de los iones positivos del hidrógeno desprendido, que van del ánodo hacia el cátodo, aquí se lleva a cabo una combinación entre iones con carga positiva y negativa conjuntamente con el oxígeno [19], para finalmente formar agua 100% pura como producto por así decirlo, esto es posible a través de una membrana semipermeable que se encuentra en medio de los electrodos [1],[7],[18].

Al ser una reacción exotérmica esta emite un porcentaje de energía en forma

de calor, en otras palabras, desprenderá calor por su operación, en la ecuación 7 se describe la reacción completa [17].

El voltaje total de este dispositivo dependerá del número de celdas conectadas entre si, de tal manera que para aplicaciones prácticas es necesario realizar combinaciones en serie y paralelo [18], para aumentar el nivel de voltaje y corriente, ya que un arreglo simple de una sola celda puede producir una diferencia de potencial entre 0,6 y 1,2 v [7],[20]. Este potencial eléctrico generado por la celda de combustible es utilizado para estudiar el comportamiento en régimen estacionario [7], esto quiere decir, cuando la demanda de corriente que realiza una carga externa conectada a la celda, permanece constante en el tiempo [18]. El objeto de estudio es una gráfica donde se representa el voltaje [V] vs la densidad de corriente [A/m^2] [7], también se suele representar la máxima tensión teórica que podría generar la celda si su comportamiento fuera ideal, sin pérdidas, a este valor teórico máximo se lo determina mediante la ecuación 8, [16],[19].

$$E = \frac{\Delta G}{2F} \quad (8)$$

Donde, ΔG es la alteración de la energía de Gibbs, y F representa la constante de Faraday [7].

- **Elementos de una celda de combustible**

Los elementos propios que describen la operación de una celda de combustible son los siguientes [7]:

- Ánodo

- Cátodo
- Membrana o electrolito
- Placas bipolares
- Circuito externo
- Hidrógeno
- Oxígeno

- **Clasificación de las celdas de combustible**

Las pilas de combustible pueden ser divididas, con respecto a la naturaleza de combustible o conforme al electrolito a emplearse, siendo la membrana objeto de clasificación de las celdas, descritas en la tabla 1 del Anexo No.1 [7],[18],[19].

Una vez dado una breve clasificación de las celdas, se dará un enfoque especial en las celdas de combustible tipo PEM ya que este equipo es parte del sistema híbrido mencionado en la investigación.

- **Celda de membrana polimérica pem**

A este tipo de elemento se lo denota como celdas de combustible de membrana de intercambio de protones o pilas pemfc o celdas pem [19], este tipo de celda posee una membrana conductora de iones que consiste en una delgada película de polímero sólido, ensamblada en medio de dos electrodos porosos: ánodo y cátodo impregnados mediante un catalizador de platino [7],[18].

En estas pilas de combustible “el hidrógeno es accionado por catálisis para conformar iones positivos y dirigirlos hacia el cátodo, es decir el protón circula a través de la membrana electrolítica mientras que el electrón con carga negativa es obligado a circular por un circuito exterior para generar electricidad, seguidamente el ion negativo vuelve al cátodo donde se mezcla con el oxígeno y el ion positivo para conformar agua” [6],[7]. La respuesta global química que

sucede en esta celda se indica en la ecuación 9 [7].



La conformación más importante de las pilas pem es la composición de membranas de electrodos (MEAs por sus siglas en inglés) [21]. Esta facilita el transporte de los protones, y para realizarlo de una manera eficaz la hidratación de la misma es de suma importancia, ya que la PEMFC depende de la presencia de agua líquida para realizar el transporte de iones, es por eso que los sistemas de gestión térmica de agua en la membrana de la celda de combustible, son esenciales para el funcionamiento eficiente del equipo, además esta puede ser de Nafión o Hidrocarbonada [22],[23].

Las pemfc funcionan a temperaturas relativamente bajas entre 50 y 100 °C aproximadamente, son sistemas livianos y compactos ideales para aplicaciones de baja potencia o en sistemas combinados de generación [24]. Su aplicación más importante es en la industria automovilística, debido a sus altas densidades de potencia [22]. El uso de oxígeno puro a cambio de aire mejora el rendimiento de la celda en un 30%, al igual que el uso de hidrogeno de alta pureza [6], [7]. En común la eficacia eléctrica de estas pilas de combustible se hallan en un rango del 40 y 50 % [7].

Como es de objeto de estudio, los sistemas de cogeneración, existen varias investigaciones que proponen una pila de combustible de electrolito que opere a alta temperatura denominada “PEMFC-HT (High Temperatures)”, [15],[25],[26]. Las celdas pem-ht mejoran su rendimiento al trabajar con altas temperaturas >120°C hasta el orden de los 180°C, además mejoran el nivel de tolerancia al

monóxido de carbono es decir que el combustible suministrado puede tener índices no tan altos de pureza [19],[26]. Es así que en la práctica las PEMFC-HT ofrecen ventajas significativas tales como, que son ideales para la utilización en sistemas de cogeneración, simplifican el procesamiento de combustible y reducen costes de diseño y operación [6],[26].

2.3 Sistemas estacionarios de potencia

En cuanto a las aplicaciones de generación distribuida, estas se basan en instalaciones adaptables, diseñadas según las necesidades de energía requerida, y están ubicadas próximas al punto de consumo [27]. En este contexto las celdas de combustible pueden funcionar como sistema aislado, conectado a la red, o como sistemas de respaldo de generación, además a que el calor producido por su operación puede ser ocupado por sistemas que dispongan de agua caliente o calefacción [27].

Los avances de las celdas de combustible en usos residencial y comercial se reflejan en dos tipos de celda principalmente, las pemfc y las sofc [17],[22], estos sistemas pueden generar potencia en el orden de los kW y MW en aplicaciones estacionarias. Como se menciona en [27], Westinghouse Electric diseño un prototipo de SOFC, que ha operado sin interrupción durante más de 69.000 horas, y se considera la celda con mayor rentabilidad comercial si es utilizado en fines de generación estacionaria.

Siendo así, que esta tecnología junto con otros sistemas de igual manera de generación renovable como lo son sistemas fotovoltaicos, eólicos, biomasa, se encuadran en el grupo de las futuras micro-redes eléctricas que satisfagan el

uso de electricidad y energía térmica en aplicaciones estacionarias, alcanzando diferentes niveles residencial, comercial e industrial [28].

2.4 Hidrógeno en calidad de vector energético

Es uno de los gases más copioso en el medio ambiente, representando alrededor de un 70% de toda la materia visible en el universo [29], aunque este gas se lo encuentre en grandes cantidades está ligado a otros elementos formando compuestos, hidrocarburos, agua, entre otros [30]. Si el hidrógeno es extraído a partir de hidrocarburos el proceso involucra la producción de gases contaminantes CO_2 , volviendo así al problema ambiental [1]. Otra manera de extraerlo es mediante electrólisis del agua por acción de una corriente eléctrica, siendo esta la manera más sustentable de obtención de dicho gas [2]. De este modo la idea de usar este gas como vector energético basa su ciclo en el almacenamiento de energía en forma química, mediante la descomposición del agua en sus moléculas que lo componen [29],[31].

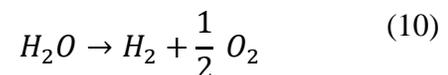
Citando algunas propiedades de este gas empleado como combustible se puede decir que, es amigable con el medio ambiente, posee mayor eficiencia que otros combustibles, es de fácil acopio y traslado, también existen sistemas económicos a la hora de producción [2]. Y como ya se ha mencionado anteriormente este vector energético¹ consigue un alto rendimiento mediante el uso conjunto con celdas de combustible y subsistemas como el electrolizador,

sistemas de almacenamiento de hidrógeno y baterías [7],[29].

2.5 Electrólisis

Este proceso consiste en descomponer las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno, para lograr esta separación es necesario aplicar cierta cantidad de corriente eléctrica DC [30], está determinada corriente se aplica en dos electrodos que lo conforman ánodo y cátodo respectivamente, los cuales están en contacto con un electrolito [1],[29]. El hidrógeno que se obtiene en el proceso de la electrólisis es de alta pureza, superior al 99%, este proceso se lo puede considerar como el inverso a la celda de combustible [7]. Para que este proceso ocurra la tensión aplicada debe superar un umbral de voltaje, que dependerá del tipo de material de los electrodos, a esto se lo conoce como voltaje de descomposición [1],[32].

El dispositivo que cumple dicha función se denomina electrolizador [32]. Los electrolizadores pem tienen un diseño simple y compacto, su componente central es la membrana polimérica, la tensión que se aplica en estos tipos de electrolizadores es de 1,23 V, pero debido a las resistencias propias del material y de contactos, los voltajes suelen ser mayores [3],[7]. La eficiencia teórica de este tipo de electrolizadores con membrana de intercambio protónico suele superar valores del 85% [1],[30]. La reacción global que se lleva a cabo en este proceso se describe en la ecuación 10 [7].



¹ Vector Energético: es el nombre con el que se designa a los dispositivos y a las sustancias que

tienen capacidad para almacenar una energía que posteriormente será liberada [29].

2.6 Almacenamiento de energía

En aplicaciones de generación autónoma por parte de sistemas renovables, la energía producida debe ser convertida y almacenada [3]. Seguidamente se describe cortamente los tipos de almacenamiento energético desarrollados en la presente investigación, se estudia un modelo de generación híbrida los cuales permiten un almacenamiento a corto plazo por el sistema de baterías debido a su rapidez de carga y descarga, y el almacenamiento del hidrógeno a largo plazo debido a su larga vida útil y a su alta densidad energética [1],[3]. Por lo tanto, una combinación de un banco de acumuladores de energía y un sistema de almacenamiento de hidrógeno mejoran significativamente la fiabilidad de estos sistemas [11].

- Almacenamiento de Hidrógeno: El almacenamiento y la distribución del hidrógeno son puntos clave a la hora de comercialización del gas, ya que en función de sus aplicaciones donde el hidrógeno sea consumido, se seleccionará el tipo de almacenamiento y la disposición de trabajo de los mismos [31]. Como se menciona en [27], “las estructuras de acopio de energía eléctrica por medio de este gas deben afianzar una concordancia total entre ambos vectores, desarrollando para ello una óptima estructura que incorpore los equipos y componentes óptimos para producir hidrógeno a partir de energía eléctrica” [30]. Así hoy en día, el hidrógeno se acopia fácilmente a gran escala, pero en aplicaciones móviles aún se

requiere un desarrollo importante [27].

- Baterías: Este dispositivo está compuesto por un arreglo de celdas electroquímicas capaces de almacenar energía eléctrica mediante una reacción química denominada “Redox” reducción-oxidación entre dos polos ánodo y cátodo [33], durante la descarga este proceso se revierte espontáneamente, el cual nos permite extraer energía de la batería en forma de corriente eléctrica DC, durante esta transformación la batería puede ser recargada, restaurando así su estructura original y sus niveles de energía [1],[33].

2.7 Controlador de potencia

Son dispositivos con equipamiento electrónico que tienen la función de controlar y limitar la potencia eléctrica suministrada a una carga. Como se menciona en [34], “los sistemas de control están divididos en tres jerarquías: medición, potencia y control”.

El bloque de medición se encarga de medir la corriente suministrada por el panel fotovoltaico, así mismo de la tensión de la pila de combustible y la corriente que se entrega al usuario, el sistema de potencia se encarga de suministrar corriente a la batería y suministrar corriente al electrolizador, y por último, la parte de control se encargará de realizar las respectivas estrategias de energía para que el sistema híbrido opere sin interrupciones y en operaciones óptimas [34],[35].

2.8 Inversor

Todas las tecnologías de desarrollo renovable, por sus características propias del material generan potencia en corriente continua, el inversor es el dispositivo electrónico de potencia que permite el cambio de corriente continua a alterna (DC-AC), ya que la potencia consumida por las cargas o la red eléctrica es corriente AC [34]. En el mercado el desarrollo de estas tecnologías ya es bastante maduro, alcanzando eficiencias del 95%, incluso del 99% según la aplicación a la que esté dispuesta [36].

3 Sistema acoplado de electricidad-calor

Esta investigación tiene por objetivo principal desarrollar y caracterizar un sistema combinado de producción eléctrica de índole renovable, el software a utilizar para el respectivo análisis es Matlab/Simulink. Por otra parte, los resultados están sujetos a un sistema de cogeneración, se ha tomado en consideración un modelo propuesto por Ozgirgin citado en [15], donde hace uso de un intercambiador de calor para recuperar el calor residual generado por la celda de combustible pem, tomando en consideración el sistema propuesto, en la presente investigación se desarrollan cálculos de vital importancia con respecto al intercambiador, ya que los sistemas mencionados deben acoplarse de tal manera que el sistema conjunto opere sin ninguna interrupción. Siendo así en esta investigación se realiza un análisis individual de los sistemas en cuanto a generación eléctrica y al sistema de suministro de agua caliente para la vivienda cogeneración.

3.1 Sistema híbrido de generación eléctrica renovable

Se entiende que la restricción de las energías renovables en cuanto a generación, es su intermitencia de producción al depender de factores climáticos, la mayoría de veces estas tecnologías, cuando operan de manera autónoma se conectan a la red pública para suplir la demanda de energía [9],[11]. Como solución a esta problemática, en la actualidad se busca acoplar de manera eficiente sistemas conjuntos de energías renovables como se menciona en [1]: “es el único camino de solucionar la cuestión de naturaleza imprevista o casual de dichas tecnologías”.

Las diferentes fuentes de energía renovable deberán operar conjuntamente como una sola unidad, para suplir la demanda requerida, esto se hace posible mediante un óptimo control energético ya que en ciertos períodos de operación algunos subsistemas generan más o menos potencia eléctrica, por lo tanto, los sistemas de control de energía o potencia tienen un puesto primordial a la hora de llevar a cabo, sistemas combinados de generación [4],[8].

Con este contexto el sistema de generación híbrida, para la siguiente investigación, queda estructurada de la siguiente manera:

- Panel solar fotovoltaico
- Celda de combustible pem
- Electrolizador
- Banco de baterías
- Controlador de energía.
- Inversor DC-AC

Una vez dado una breve introducción de los dispositivos que conforman el sistema híbrido, el próximo paso es describir el funcionamiento del sistema, y

poseer un esquema óptimo de la disposición material de los equipos que conformarán el modelo. Esto le permitirá al futuro diseñador poseer una idea clara de los requerimientos para su posterior construcción [11]. Para esto, en este artículo académico se realiza un diseño y análisis de un sistema eléctrico integrado en el hogar. El sistema híbrido PF-PEMFC-CHP, se considera para una aplicación residencial de un solo hogar (4 personas), este sistema proveerá de energía eléctrica y demanda de agua caliente para diferentes temporadas [15],[28].

La energía eléctrica se genera en una serie de unidades fotovoltaicas situadas en el techado de la residencia, el suministro de respaldo se genera a través de una celda de combustible tipo pem y un módulo electrolizador [15]. La energía primaria producida por la luz solar es

supervisada en el controlador de carga del sistema, al igual que la energía almacenada en las baterías. Además cuando la energía solar generada sea mayor a la requerida por el usuario y si el tanque de hidrógeno se encuentra vacío, la energía en el banco de baterías se entrega al electrolizador para la disolución de este gas y su posterior aplicación en la celda de combustible pem para la producción de electricidad [15],[37].

Para lograr que el sistema híbrido funcione simultáneamente, un porcentaje de corriente almacenada en las baterías es utilizada en la electrólisis del agua, estas trabajan hasta el límite de descarga. Todos estos componentes generan corriente continua, para su uso residencial conectamos un inversor de corriente DC-AC con un voltaje nominal de 120 voltios.

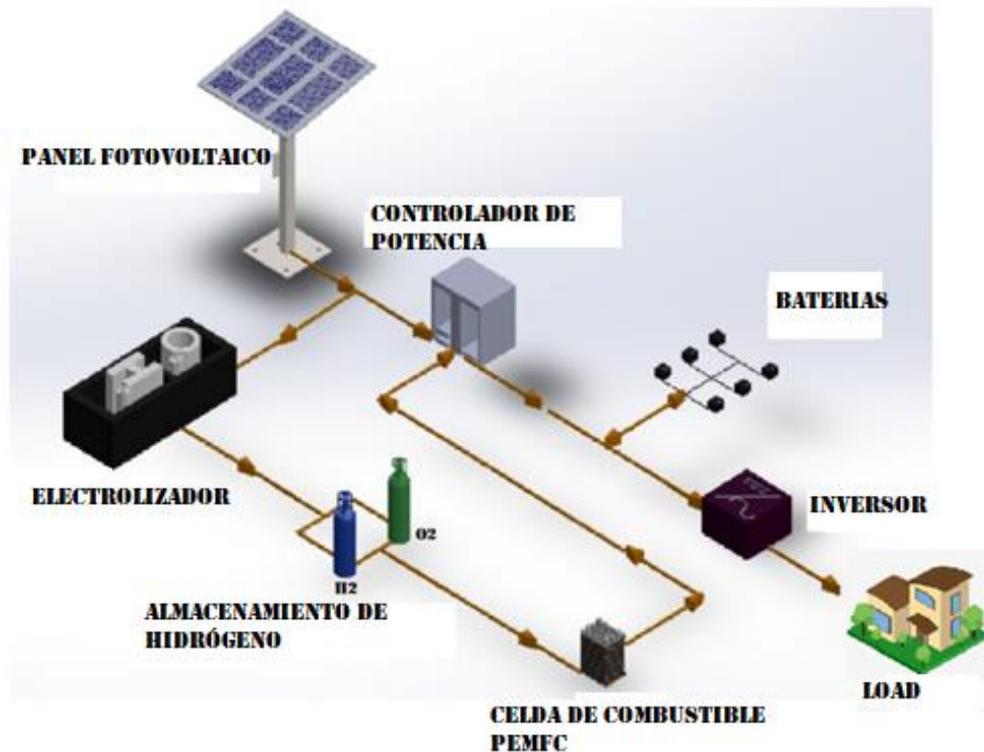


Figura 3. Diagrama del sistema híbrido de generación eléctrica [autor].

Para comprender de manera óptima el funcionamiento del sistema híbrido, se presenta en el Anexo No.2 el esquema de control, en un diagrama de flujo.

3.2 Sistema de cogeneración

Los sistemas de cogeneración surgen de la necesidad de suplir demandas energéticas y térmicas simultáneamente, mediante el uso de un único combustible, este puede ser el gas natural, que es el elemento práctico más común, o la utilización de energías renovables [9].

Con respecto a este prototipo de generación también se lo conoce como producción CHP, que quiere decir “combinación de calor y potencia” [28],[42]. Como se menciona en [5], “la utilización de estos sistemas se prevé en mayor uso en generación distribuida, donde la generación se ubique de forma estratégica y cerca de los puntos de consumo ya sea comercial o industrial”. Entre las ventajas más significativas de estos sistemas se incluye las siguientes [9].

- Producción simultánea de energía eléctrica y térmica, esto conduce a una óptima utilización del combustible [28].
- Estas unidades suponen un ahorro energético considerable en las facturas de energía, debido a su alta eficiencia como sistema de cogeneración, esto se ve reflejado en mayor porcentaje cuando se utiliza energías renovables [9].

En este contexto las pilas de combustible cumplen con los parámetros de salida en cuanto electricidad y calor, dependiendo de las necesidades a cubrir se utilizará un tipo u otro de celda [28], siendo posible combinar el uso de la celda de combustible con turbinas de gas,

calderas o intercambiadores de calor, este último dispositivo es caso de análisis en la presente investigación, el motivo es porque estos sistemas de cogeneración necesitan equipos auxiliares que permitan recuperar de manera óptima este calor residual [38]. También se debe tener en cuenta algunos sistemas de control de temperatura, control en niveles de presión y niveles de flujos de reactivos, importantes para el funcionamiento eficiente del proceso [6],[8]. En la presente investigación no se tomó en cuenta estas variables de control de temperatura.

En esta investigación se eligió la celda de combustible pemfc para aplicaciones de cogeneración residencial, ya que esta es una tecnología con el mercado más relevante, esta selección se la realizó argumentada por [15],[26],[31],[39].

Un punto clave de la cogeneración bajo esta tecnología son los niveles de eficiencia, ya que al acoplar un equipo CHP a un sistema de celda de combustible, se aumenta favorablemente dichos porcentajes [28], a continuación, se realiza un resumen de características en cuanto a eficiencia eléctrica y eficiencia con cogeneración de los diferentes tipos de celdas susceptibles a emplearse en el ámbito de la cogeneración y generación estacionaria [9],[28],[40].

Tabla 1.Eficiencia de las clases de pila de combustible en cogeneración [9],[28],[40].

Tecnología	PEMF C	PAF C	MCF C	SOF C
Eficiencia eléctrica	40-60%	36-45%	50-60%	50-60%
Eficiencia con cogeneración	70-85%	85%	85%	85%

Como se menciona en [28] “en particular, los equipos CHP basados en celdas de combustible logran una

eficiencia global mayor que otros equipos que utilizan otro tipo de tecnología para su funcionamiento”. Para una mejor esquematización del proceso, la Figura 4 muestra un diagrama con los elementos principales de un equipo CHP funcional [28].

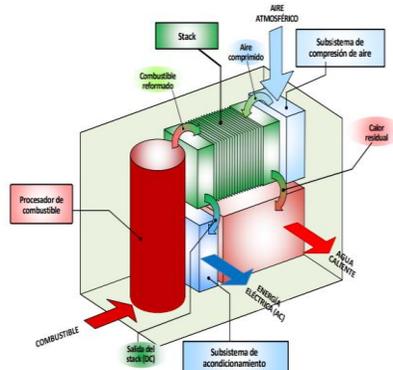


Figura 4. Equipo CHP para cogeneración electricidad-calor [28].

Los sistemas que combinan electricidad y calor, requieren principalmente de un dispositivo que permita recuperar el calor residual proveniente de la tecnología utilizada, en este caso una celda de combustible [8],[28].

Para cumplir este objetivo se hace uso de un intercambiador de calor, algunos de estos sistemas acoplan calderas o calentadores de gas instantáneos para mantener el agua de consumo sanitario a temperaturas requeridas por la demanda, o a su vez para componer sistemas de aire acondicionado y calefacción en la residencia [6],[41].

- **Sistemas de recuperación de calor**

Es de mucha importancia considerar la eficiencia con la que se recupera el calor residual de la celda ya sea a manera de agua o de vapor, una opción de recuperar esta potencia calorífica es mediante

intercambiadores de calor, el uso de estos facilita dicha transferencia [15],[42].

Fundamentalmente un intercambiador de calor es un dispositivo que posibilita transmitir el calor de un fluido ya sea líquido o gas a otro de menor temperatura [43], esta transferencia es posible gracias a una placa y tubos metálicos, estos materiales deben secundar la transmisión de calor entre fluidos, sin que estos interrelacionen [43]. Hoy en día, esta tecnología se implementa comúnmente para estos fines, pero sigue en desarrollo con el propósito de aumentar su eficacia [46]. Los intercambiadores de calor pueden ser clasificados según: la geometría de sus componentes y según sus aplicaciones [43].

- **Según la geometría de sus componentes**

Con respecto a esta clasificación, están divididos en los siguientes [43],[44]:

- **Intercambiadores de doble tubo:** En estos dispositivos uno de los fluidos se transmite por la tubería interior y el otro fluido por la tubería exterior, en este tipo de equipos la transferencia calorífica es limitada debido a la poca área de intercambio [43].
- **Intercambiadores de carcasa-tubo:** Este tipo consiste en una unión de tubos y de un depósito denominado carcasa, del mismo modo existe dos flujos uno interno y el otro externo; el flujo interno es el que circula por los tubos, y el flujo de fluido exterior circula dentro del contenedor o carcasa. Estos intercambiadores de calor poseen una gran área de transferencia y pueden ser empleados para aplicaciones en cogeneración [42],[43].

- Intercambiadores con respecto al recorrido de fluidos: Estos intercambiadores se los subdivide en intercambiadores de flujo en paralelo, flujo en contracorriente, flujo cruzado a un solo paso o de pasos múltiples [42],[43].
- **Según sus aplicaciones**

Estos módulos pueden ser clasificados de la siguiente forma [42],[43]:

- Intercambiadores gas/gas: estos equipos son utilizados como recuperadores de aire de combustión en motores de combustión interna y de turbinas [44].
- Intercambiadores gas/líquido: estos dispositivos son usados en la recuperación de calor a media y alta temperatura [42].
- Intercambiadores líquido/líquido: son mayormente usados en aplicaciones industriales, comúnmente para la recuperación de calor en las cilindros del motor y en la refrigeración de motores de combustión interna [42].

En la práctica se han puesto en operación todos los intercambiadores de calor que se han citado anteriormente [42] [43], es así que un ingeniero a menudo se encuentra en la capacidad de seleccionar el tipo de intercambiador a utilizar, ya que en ciertos casos se necesita que este dispositivo alcance un cambio de temperatura específico, o a su vez, de predecir las temperaturas de salida de movimiento de fluido caliente y frío respectivamente [45]. En la actualidad existen principalmente dos modelos de configuración de intercambiadores de calor el primero denominado: “el método

de la diferencia media logarítmica LMTD por sus siglas en ingles”. Y el segundo modelo se denomina, método de la efectividad NTU [44],[45], este método es utilizado en esta investigación ya que es un modelo que facilita la selección del tamaño y del tipo de intercambiador de calor, otro aspecto importante por el cual se escogió este modelo, es que es ideal para pronosticar las temperaturas de salida del intercambiador y que es un modelo mejorado al LMTD [43],[45],[46].

- **Modelo de la efectividad NTU**

Antes que se describa este modelo se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones, ya que estos dispositivos basan su funcionamiento en la transferencia y la conducción de calor, por ende, se rigen por leyes termodinámicas [45]. “Con esta suposición se describe brevemente la ley de la termodinámica con la cual se rige el sistema y demanda que la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido caliente sea equitativa a la transferencia de calor hacia el fluido frío” [46], la segunda ley de la termodinámica involucrada se menciona en [46], que el calor que se necesite se transfiera en la dirección de menor temperatura, en otras palabras, esto quiere decir que el sistema de mayor temperatura cederá o transferirá calor al sistema de menor temperatura [46]. En las ecuaciones 11 y 12 se ilustra el modelo NTU [45].

$$\dot{Q} = \dot{m}_c * C_{pc}(T_{c,sal} - T_{c,ent}) \quad (11)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h * C_{ph}(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad (12)$$

Donde, \dot{Q} representa la razón de la transferencia de calor, los subíndices c y h se refieren a los fluidos frío y caliente

[45]. Los subíndices en la ecuación 11, 12 representan lo siguiente [45]:

\dot{m}_c, \dot{m}_h = gastos o flujos de masa.
 C_{pc}, C_{ph} = calor específico caliente y frío.
 $T_{c,sal}, T_{h,sal}$ = temperaturas de salida.
 $T_{c,ent}, T_{h,ent}$ = temperaturas de entrada.

En este análisis resulta apropiado realizar la multiplicación entre el flujo de masa y el calor específico de un fluido en una sola cantidad, esto dará como resultado la denominada razón de capacidad calorífica y están dadas para los fluidos caliente y frío [45]. Este valor se describe en las ecuaciones 13 y 14 [49].

$$C_h = \dot{m}_h * C_{ph} \quad (13)$$

$$C_c = \dot{m}_c * C_{pc} \quad (14)$$

Este método de análisis, basa su matemática en un parámetro adimensional conocido como efectividad de la transferencia de calor (ϵ), en la ecuación 15, Cengel menciona este valor [45].

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} \quad (15)$$

Donde, Q_{max} , es la razón máxima posible del intercambio de calor.

La razón de intercambio de calor real de un intercambiador de calor es \dot{Q} , se la analiza con respecto a un balance de energía entre fluidos y se expresa en la ecuación 16, según se cita en [45].

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,sal} - T_{c,ent}) \quad (16)$$

$$\dot{Q} = C_h(T_{h,ent} - T_{h,sal}) \quad (17)$$

En el cual, C_c y C_h , representan las razones de capacidad calorífica [43],[45].

En este caso en particular donde se hace uso de un intercambiador de calor de líquido/líquido, el primer fluido que percibirá la diferencia de máxima temperatura, será el fluido con la menor razón de capacidad calorífica, es decir el agua a temperatura ambiente [45]. Así pues, la razón máxima posible de intercambio de calor se representa en la expresión 18 [45]:

$$Q_{max} = C_{min}(T_{h,ent} - T_{c,ent}) \quad (18)$$

Como se menciona redundantemente, el calor es el modo de energía que se podrá transmitir entre los sistemas involucrados, la ciencia que determina la razón de cambio o velocidad con la que ocurre la transferencia de un fluido a otro se nombra como transferencia de calor [46].

- **Transferencia de energía en los intercambiadores de calor**

En cuanto a estos dispositivos, como se menciona en [43], existen tres intercambios posibles, en este punto se debe considerar el funcionamiento básico de estos dispositivos, donde un fluido circula internamente de una tubería, y otro fluido circula alrededor de la tubería [45], para esto se hace necesario describir los diferentes tipos de transferencia calorífica que se presentan en los intercambiadores de gas/líquido [46].

- Transferencia de calor convectiva del fluido, a la pared interior de la tubería [46].
- Transferencia de calor convectiva desde la parte externa del tubo, a el fluido exterior [46].

- Transferencia de calor conductiva por medio de la pared del tubo [46].

En la sección 3.2, se ha redactado un corto análisis estructural de un sistema que recupera el calor en una celda de combustible, de la misma manera se detalla algunas de las ecuaciones y leyes que rigen estos sistemas. A continuación, en la sección 4, se describe el modelo matemático con el que se rige el sistema de generación renovable.

4 Modelo matemático del sistema híbrido de generación

A este capítulo de la investigación se lo ha dividido en varias secciones, cada una con las ecuaciones que definen el modelo propuesto.

4.1 Sistema Panel Fotovoltaico

Ya se describió el comportamiento de una sola celda en la ecuación 4, ahora bien, es de interés generar un voltaje determinado, integrar matrices de celdas en diferentes configuraciones, sea paralelo o serie, o combinando las dos [14].

Para lograr la salida de corriente del panel fotovoltaico se utiliza la ecuación 19 [28].

$$I = Np * I_{PH} - Np * I_o \left[e^{\frac{V + R_s}{N_s * N_p * m * V_T}} - 1 \right] \quad (19)$$

Donde, Np representa el valor de celdas en paralelo, Ns el número de celdas en serie y V el voltaje de cada celda [28].

Para calcular la corriente fotogenerada I_{PH} , se utiliza la ecuación 20 [47].

$$I_{PH} = I_{SC} + ki(T - 298) * \frac{R}{R_{ref}} \quad (20)$$

Siendo, I_{SC} la corriente de cortocircuito, Ki el coeficiente de cortocircuito, T es la temperatura de funcionamiento del panel en grados Kelvin, R representa la radiación solar medida en el instante, y R_{ref} es la radiación solar en condiciones estándar 1000 W/m^2 [47].

Para determinar la corriente de saturación del panel, en función de la temperatura se hace uso de la ecuación 21 [52]:

$$I_o = I_{rs} \left(\frac{T}{Tr} \right)^3 * e^{\left[\frac{qEg \left(\frac{1}{Tr} - \frac{1}{T} \right)}{K * m} \right]} \quad (21)$$

Donde, Tr es la temperatura de operación del panel solar en condiciones estándar (298°K), y Eg es igual a $1,1 \text{ eV}$ [14]. Dentro de esta ecuación está contenida la variable I_{rs} , es la corriente de saturación inversa del diodo en condiciones de referencia [47].

$$I_{rs} = \frac{I_{SC}}{e^{\left(\frac{V_{OC}}{N_s * K * T * m} \right)}} \quad (22)$$

Siendo, V_{OC} el voltaje a circuito abierto del módulo fotovoltaico [47].

Para un modelo más preciso se determina la corriente que pasa por la resistencia R_{SH} , para determinar dicha corriente I_{SH} , se debe conocer el valor de la resistencia en ohmios, así como también la tensión térmica del diodo [35]. De esta manera la corriente I_{SH} se calcula con la ecuación 23 [47].

$$I_{SH} = \frac{V + \frac{Np}{Ns} + I * R_s}{R_{SH}} \quad (23)$$

Donde, V representa la caída de tensión de la celda, y R_s representa la resistencia en serie indicada en el circuito equivalente [47].

Con estas ecuaciones a disposición, se determina la corriente total generada por el panel solar, y por consiguiente se calcula la potencia total generada por el módulo fotovoltaico. Haciendo uso de la ley de ohm [35].

$$P_{PF} = I_{PF} * V_{PF} \quad (24)$$

Donde, los subíndices PF representan las siglas de “Panel Fotovoltaico” [47].

4.2 Sistema celda de combustible

En una celda de combustible, la energía que se dispone para realizar el movimiento de los electrones a través del circuito externo, se la define como la energía libre de Gibbs [7]. De tal forma que la máxima cantidad de energía que puede entregar este dispositivo queda definida por la ecuación 25, medida en $K/Joule$ [18].

$$\Delta G_f = \sum G_{f,productos} - \sum G_{f,reactantes} \quad (25)$$

Esta ecuación representa un balance de energía para cualquier reacción o compuesto, donde se deben sumar las energías de formación de todos los productos y restar la suma de las energías de Gibbs de formación de todos los reactivos [7],[18]. A partir de este balance de energía y en relación al potencial

reversible de la celda E_{NERNST} , se obtiene la tensión en la celda sin carga, la ecuación 26 describe este potencial [18].

$$E_{NERNST} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) \quad (26)$$

$$+ \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right]$$

Donde, ΔG está en $[J/mol]$, F es la constante de Faraday, ΔS es la variación de entropía de los reactivos dada en $[J/mol]$, R es la constante universal de los gases, P_{H_2} y P_{O_2} son las presiones parciales del hidrógeno y el oxígeno, en atmósferas [18]. La variable T representa la temperatura de funcionamiento de la celda en $^{\circ}K$, y T_{ref} equivale a $298.15^{\circ}K$ [16].

Para representar adecuadamente las ecuaciones que se emplea en el modelado de este dispositivo es necesario generar un circuito equivalente como se representa en la Figura 5, donde se indican las pérdidas resistivas R_r , el voltaje de activación modelado por la resistencia R_a y el efecto capacitivo de la celda [18]; el capacitor suaviza los picos de voltaje, producidos por la activación de la celda de combustible [7].

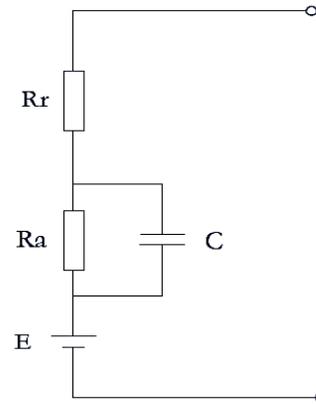


Figura 5. Circuito equivalente celda de combustible [7].

Se hace uso de la de tensión de Kirchhoff en el circuito, el voltaje de salida queda definido en la ecuación 27 [18].

$$V_S = E - V_{act} + \eta_{ohmic} \quad (27)$$

En cuanto a las pérdidas producidas por el voltaje óhmico [18].

$$\eta_{ohmic} = -i * R_r \quad (28)$$

Siendo, i la corriente de la pila de combustible.

Para determinar la resistencia interna R_r , se elige el modelo presentado por [48], las ecuaciones que se presentan, se desarrollan a partir de análisis empíricos.

$$R_r = 0.01605 - 3.5 * 10^{-5}T + 8 + 10^{-5}i \quad (29)$$

Por otro lado, para calcular la tensión necesaria para el accionamiento de la pila de combustible, se emplea la ecuación 30 [48]:

$$v_{act} = -0.9514 + 0.00312T - 0.000187T \ln(i) + 7.4 * 10^{-5}T \ln(C_{O_2}) \quad (30)$$

Donde C_{O_2} , representa la concentración de oxígeno en gas o en líquido, definido por la ley de Henry [48].

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 * 10^6 * e^{-\frac{498}{T}}} \quad (31)$$

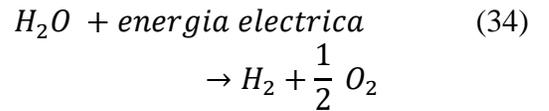
La ecuación matemática que representa R_a , resistencia de activación, en función al voltaje de activación, resulta de la siguiente expresión 32 [18], [48].

$$R_a = -\left(\frac{\eta_{act}}{i}\right) \quad (32)$$

4.3 Sistema módulo electrolizador

Para el modelado del electrolizador se escoge un modelo que adapte eficientemente, la potencia de electrolizador con la potencia del panel fotovoltaico, y el voltaje de operación del electrolizador con la tensión de la celda de combustible, por la razón que el electrolizador necesita de una corriente específica para su funcionamiento, con esto se asegura la correcta operación del sistema [1],[4].

Es así que las ecuaciones que describen el funcionamiento de este dispositivo se recogen de [40]. Como se indica en la ecuación 10, la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, se la realiza mediante una corriente eléctrica, haciendo uso de dos electrodos separados entre sí mediante un electrolito [40], de este proceso se obtiene la ecuación 34 [48].



Si se toman en cuenta los lineamientos de la ley de Faraday, la producción de hidrógeno en un electrolizador es directamente proporcional al valor de electrodos trasferidos al ánodo y al cátodo, y a su vez corresponde a la corriente eléctrica necesaria para realizar el proceso [48]. De tal forma esta producción de hidrógeno dada en (mol/s), se la aprecia en la ecuación 35 [48].

$$H_{H_2} = \frac{\eta_F \eta_{Celectr} i_e}{2F} \quad (35)$$

Donde, i_e es la corriente del electrolizador y $\eta_{Celectr}$ es el valor de celdas en serie en el electrolizador [48].

4.4 Modelo controlador de carga

El modelo del controlador de carga se define por la ecuación 36 [35].

$$P_{cont-DC} = V_{bat} * (I_{PV} + I_{FC} + I_{rec}) \quad (36)$$

Donde V_{bat} es la multiplicación del voltaje en corriente DC del sistema, I_{PV} son los electrones producidos por el panel fotovoltaico, I_{FC} es la corriente de la celda, I_{rec} es la salida de corriente rectificada del sistema [35].

4.5 Modelo de las baterías

El sistema de baterías es el encargado de acumular la excedencia de energía producida por el panel fotovoltaico para luego emplearlo en el electrolizador en la producción de hidrógeno [35]. Este modelo se lo describe en la ecuación 37 [35].

$$V = V_r + \frac{I \left(\frac{0.189}{1.142 - soc + R_i} \right)}{Ah} + (soc - 0.9) * \ln \left(300 \frac{I}{Ah} + 1 \right) \quad (37)$$

V_r está determina por la ecuación 38 [35].

$$V_r = 2.94 * (1.0 - 0.001(T - 25^\circ C)) \quad (38)$$

I es la corriente del acumulador, amperio-hora en el momento de descarga, soc es el nivel de carga del mismo [35]. Para el ciclo de descarga se utiliza la siguiente ecuación 39 [35].

$$V = V_r + \frac{I}{Ah} + \left(\frac{0.189}{soc} + R_i \right) \quad (39)$$

Donde R_i es la resistencia de la celda y T tiene un valor de 25 °C.

$$R_i = 0.15 + (1.0 - 0.02(T - 25^\circ C)) \quad (40)$$

4.6 Modelo del inversor

Este modelo se describe en función de las potencias que se incorporan al inversor y las potencias que surgen del inversor [35].

$$P_{inv-out} = P_{inv-in} * n_{inv} \quad (41)$$

5 Análisis de resultados del sistema híbrido de generación.

En este apartado, se va a realizar el análisis de las gráficas obtenidas mediante la simulación en el software Simulink, del modelo propuesto, el cual está basado en un sistema híbrido de generación conformado por paneles fotovoltaicos y un arreglo de celdas de combustible, se realiza un análisis del comportamiento general del sistema en condiciones normales de operación; 1000 W/m^2 . Este estudio comprende al sistema con sus respectivas fases de operación de voltaje, corriente y potencia, tomando en cuenta diferentes niveles de radiación solar, se considera que la celda de combustible es el equipo de respaldo al sistema primario de generación, además se analizará cuál va a ser el comportamiento del flujo de hidrógeno.

Uno de los aspectos importantes que se debe considerar es el análisis de todos los datos en función de cargas residenciales, es decir no se consideran cargas

especiales. Para una mejor deducción del sistema se presentarán tablas de especificaciones características de los equipos utilizados en la investigación [49],[50],[51].

Panel solar:

Tabla 2.Características del panel solar [49].

Salida de potencia máxima	5000	W
Configuración	12 en serie y 2 en paralelo	Módulos
Voltaje circuito abierto	36.3	V
Voltaje de salida máxima	29	V
Temperatura	25	°C
Corriente de cortocircuito	7.84	A
Corriente máxima	7.35	A

Electrolizador:

Tabla 3.Características del electrolizador [49].

Voltaje de operación	48	Vdc
Corriente de operación	5	A

Baterías:

Tabla 4.Características de las baterías [50].

Voltaje máximo de salida	48	Vdc
Capacidad	100	Ah
Configuración	4 baterías de 12v en serie	Baterías

Inversor:

Tabla 5.Características del inversor [51].

Voltaje de salida	120	Vac
Frecuencia	60	Hz

5.1 Operación en la carga

5.1.1 Voltaje en la carga.

En cuanto al voltaje que se genera en la carga tiende a tener un pico que rodea los 124 V constantes, sin embargo, en el inicio del proceso de generación combinada, este voltaje se ve afectado durante un período de tiempo considerablemente corto alrededor de 0.4s, después de un tiempo el sistema busca la estabilidad energética dentro del rango de los 110 a 118 voltios AC, ideal para consumo residencial.

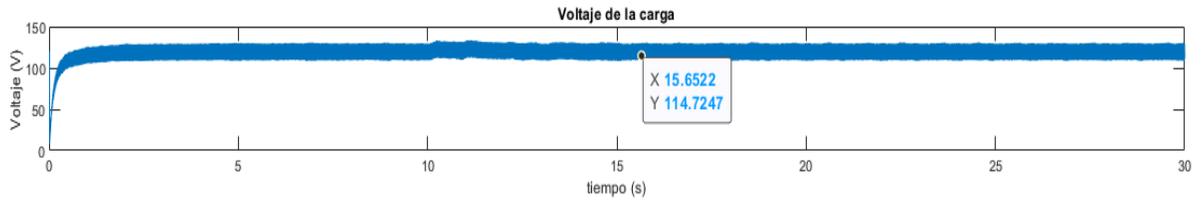


Figura 6. Voltaje en la carga.

5.1.2 Corriente en la carga.

Al tomar en cuenta los valores obtenidos previamente del voltaje en la carga, y considerando que no existirán cargas especiales prominentes que afectarían al factor de potencia en el cual se aplicará el sistema de cogeneración, la corriente tendría el mismo comportamiento que el

voltaje suministrado, cuyos valores no superarían los 35 a 38 amperios de consumo en la carga residencial distribuidos entre todos los aparatos electrónicos que estén inmersos dentro de la residencia unifamiliar aplicada al estudio sistemático de la cogeneración de energía.

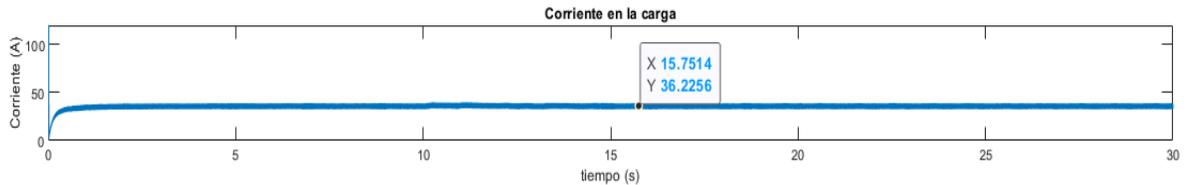


Figura 7. Corriente en la carga.

5.1.3 Potencia en la carga.

Se analiza, en la Figura 8, la potencia consumida por el usuario en función a los parámetros de voltaje y corriente suministrados, obteniendo así

resultados óptimos al momento de realizar la implementación del sistema, teniendo así una variación de potencia entre 3.6 a 4 kilovatios de potencia abastecidos al sistema residencial.

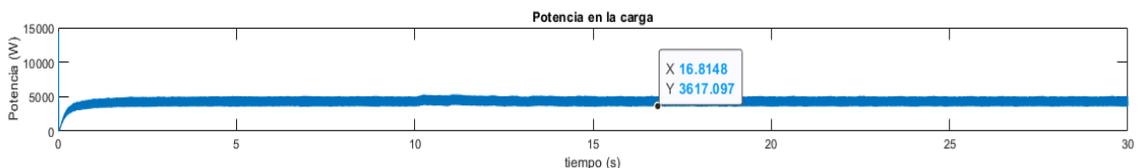


Figura 8. Potencia en la carga.

5.1.4 Distorsión armónica.

Cuando se analiza el sistema operando en condiciones normales se observa un valor de distorsión armónica relativamente bajo

del 3.5%, teniendo en cuenta que por el momento de arranque siempre se presentan variaciones de voltaje, obteniendo un valor de distorsión armónica hasta del 40%.

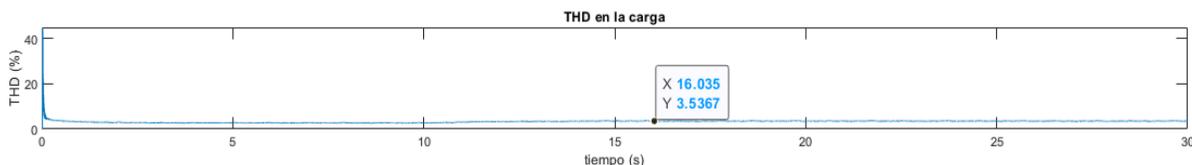


Figura 9. Distorsión armónica.

5.2 Sistema de Baterías

5.2.1 Voltaje en las baterías.

Se puede observar que a lo largo de los primeros 10 segundos, la batería se mantiene con un voltaje nominal de 48 a

50 voltios. A partir del segundo 10, el voltaje tiende a un incremento de 52 v, ya que a partir de este tiempo se simula la carga de la batería. Con esto podemos tener un claro valor de voltaje en la batería mientras las mismas están completamente cargadas.

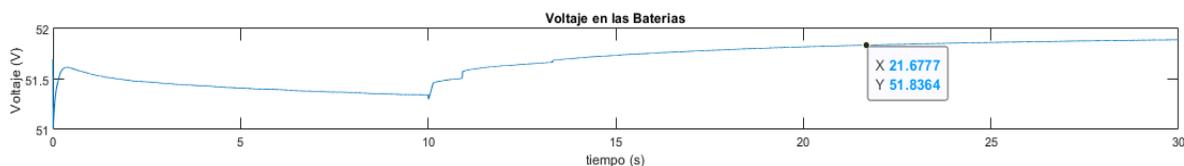


Figura 10. Voltaje en las baterías.

5.2.2 SOC en las baterías.

Los resultados obtenidos del estado de carga de la batería, a partir de la cantidad relativa de energía que almacena tomando un criterio del 50% como profundidad de descarga máxima, se observa distinguidamente los porcentajes que inciden en el estado de la misma al momento de entregar energía al sistema conformado por una celda de combustible y el electrolizador.

En los momentos iniciales tiene un pico máximo del 50% de la carga de la batería siendo este el estado de comportamiento funcional.

Una vez cumplido dicho período el sistema de baterías buscará volverse a cargar y superará el umbral del estado inicial, no obstante, a partir de los 10 segundos, esta misma no superará el 49% como tasa máxima de descarga general, logrando así para el presente estudio un comportamiento ideal en cuanto al sistema de baterías.

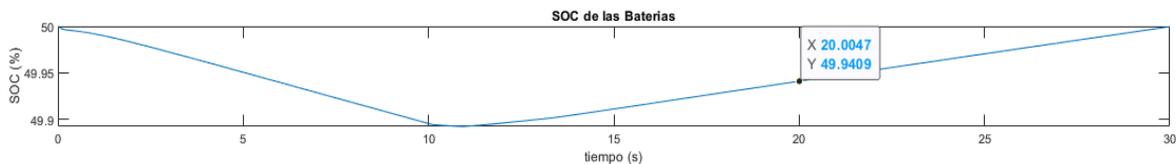


Figura 11. SOC de las baterías.

5.2.3 Corriente en las baterías.

En la Figura 12, se analiza el proceder inicial de la corriente de abastecimiento en las baterías, tiende a alcanzar un pico de 100 amperios, esto por el efecto disparo o tendencia delta de la corriente de carga.

La corriente no presenta cambios significativos, no hasta un cierto período de tiempo donde esta tensión decrece y la corriente con la que la batería se carga nuevamente alcanza un umbral máximo de 43 Amperios, valores óptimos para un sistema residencial de cargas, mismos que serán paulatinamente consumidos en conjunto, hasta alcanzar un nivel de descarga de la batería.

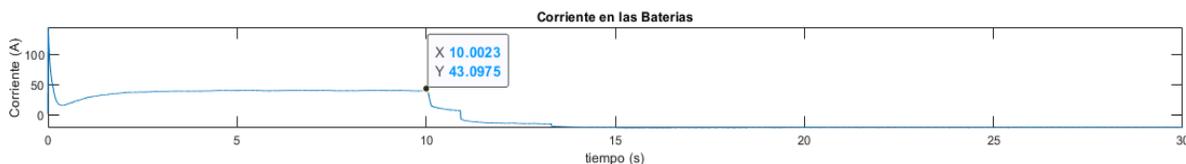


Figura 12. Corriente en las baterías.

5.3 Sistema celda de combustible

5.3.1 Voltaje en la celda de combustible.

La tensión presente en la celda, justo en el momento de arranque del sistema tiene un comportamiento transitorio, superando los picos esperados en dicho proceso, tomando valores de hasta 62 V, sin embargo, después del arranque fluctuante que tiene y prolongándose por un corto

tiempo, tiende a estabilizarse entre los 47 V y 49 V constantes, generados por el arreglo de celdas de combustible. Teniendo en cuenta que este equipo es un sistema secundario de generación y operará siempre y cuando las baterías estén cargadas y estén en la capacidad de entregar energía al electrolizador para la generación de combustible, manteniendo así un sistema de generación totalmente sustentable en todo el proceso.

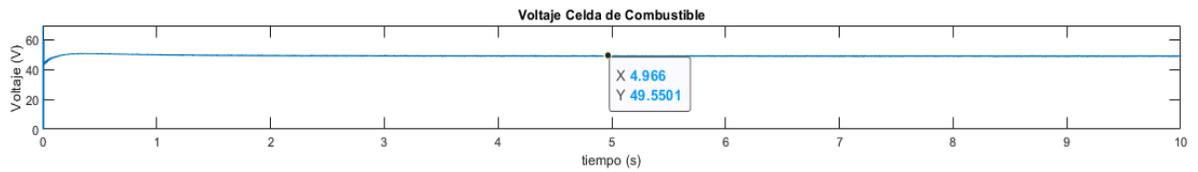


Figura 13. Voltaje en la celda de combustible.

5.3.2 Corriente en la celda de combustible.

Con respecto al comportamiento de la corriente en estos dispositivos no es tan abrupto como en las celdas fotovoltaicas,

ya que esta variable dependerá de la carga, sin embargo, la potencia en el arranque sí es elevada pero no abrupta alcanzando valores de hasta 100 A en el punto más alto. En cuanto al tiempo de estabilización los valores se encuentran entre los 38 a 44 amperios.

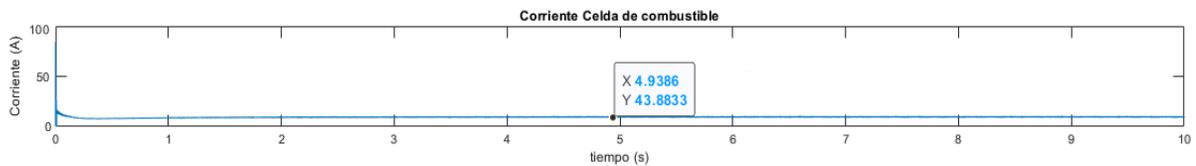


Figura 14. Corriente en la celda de combustible.

5.3.3 Potencia en la celda de combustible.

Cuando se refiere a la potencia en la celda de combustible, en el momento del

arranque el sistema tiene picos elevados, alcanzando los 5200 vatios de potencia, pero al pasar el período de arranque tiende a estabilizarse de tal manera que en el proceso tomará valores de entre 3400 a 4100 vatios de potencia.

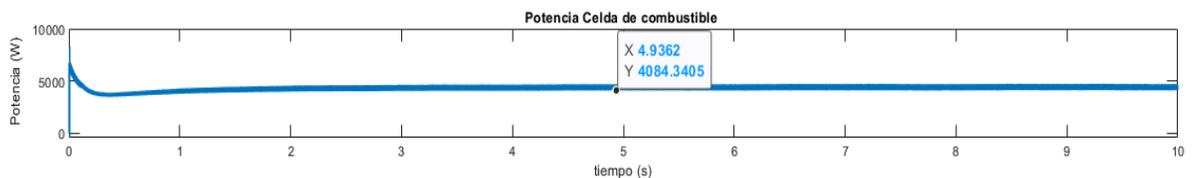


Figura 15. Potencia en la celda de combustible.

5.4 Potencia del sistema híbrido de generación

En este apartado, se analiza la energía consolidada del sistema de generación

renovable, tenemos un claro indicativo de cómo se están comportando tanto la batería, el panel fotovoltaico y la celda de combustible, obteniendo así curvas de potencia de cada una de ellas, en la cual el factor común de todos es la alta potencia en el arranque, que se va a presentar en

todo el sistema. Con estos datos se puede determinar la necesidad de un sistema de amortiguación capaz de tolerar altas potencias a la hora del arranque del sistema.

Se aprecia en la Figura 16, que la energía consumida por el usuario es alrededor de 4 kWh/día como demanda máxima con todos los dispositivos funcionando en una vivienda típica con 4 personas. Además, se analiza que la potencia en la pila de combustible y en el arreglo solar tienen un comportamiento parecido en todo el tiempo, a razón que la energía del panel solar disminuya la potencia entregada por la pila PEM aumentará según sea el requerimiento del usuario.

Así mismo se puede analizar en la imagen de la Figura 16, que no se representa redundantemente a la potencia del sistema de baterías, por la razón que este equipo sirve como almacenamiento energético mas no como un proceso de generación en sí, de aquí el motivo de la gráfica. De este almacenamiento se dispone la energía suministrada al sistema de respaldo, en este caso se analiza el estado de carga de las baterías. Con esto el valor total máximo de potencia de generación será el complemento de los dos sistemas, alcanzando una potencia máxima de 3.8 kW a 4.4 kW, ideal para el consumo residencial.

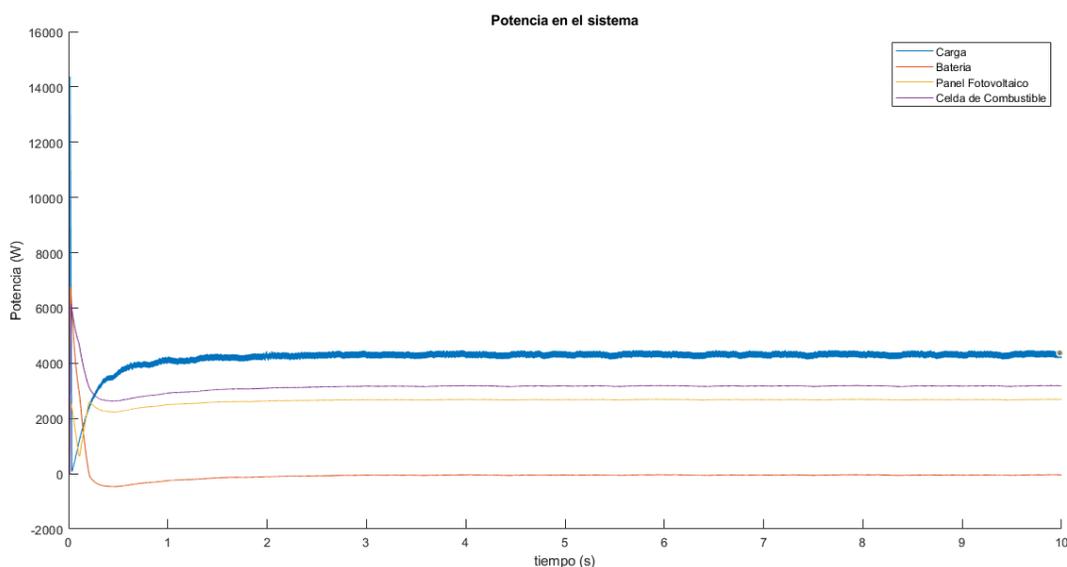


Figura 16. Potencia en el sistema híbrido de generación.

5.5 Análisis del sistema en diferentes condiciones de operación

En este análisis se estudia tres casos dispersos en el tiempo, para eso se debe tomar en cuenta las horas de un día completo, en este caso se escoge tres horarios principales los cuales

comprenden en la mañana que se ponderará hasta las 9 de la mañana, el segundo horario hasta las 3 de la tarde y el tercer horario hasta las 7 de la noche, gracias a esta segmentación de horarios se pudo establecer parámetros principales de análisis.

En el primer horario comprendido hasta las 9 de la mañana se establece un

valor de irradiancia de $750 \text{ W}/\text{m}^2$, los mismos que tienen relación directa con el horario establecido, para el segundo caso se analiza el sistema híbrido con el valor de radiación de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, que pondera el segundo horario, ya que el mejor nivel de irradiación captado por los paneles se establece a partir del mediodía. Para el tercer caso de estudio se denota la finalización del período solar durante un día, se relaciona este valor con un nivel de irradiación de $500 \text{ W}/\text{m}^2$ los cuales dan a denotar las horas donde el panel fotovoltaico recibe la menor cantidad de fotones.

Para todos los tres casos se ha elegido una potencia aparente de 4000 W cuya cantidad total de potencia se asemeja a un valor de consumo residencial, este valor de potencia se deriva de ciertas fases de análisis [52], además se debe tomar en cuenta que, al tener este valor de potencia, no se consideran por ningún motivo ninguna carga especial, ya que el sistema híbrido está exclusivamente dedicado a abastecer cargas residenciales típicas.

- **Irradiancia en función de la potencia del panel fotovoltaico.**

El comportamiento del panel fotovoltaico se lo puede medir respecto al nivel de irradiación captado por el mismo y a la potencia de operación, en este caso tenemos 3 claros comportamientos muy diferentes. En el primer caso el cual la radiación es de $750 \text{ W}/\text{m}^2$, la potencia del panel solar es de 3450 watts al momento de arranque, sin embargo, vemos que estos valores tienden a decrecer súbitamente mediante una caída en su potencial, por razón que la gráfica de la Figura 17, representa la operación del panel fotovoltaico en función al sistema híbrido, se observa que a partir del segundo 1.5, la potencia del panel tiene un pico de 2140 w, ya que en ese instante de tiempo la celda de combustible comienza su operación normal.

Para el segundo caso donde se observa claramente que la irradiancia tiene un valor constante en los $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, la potencia del panel fotovoltaico toma valores de 4.6 kW y con la menor cantidad de irradiación solar; $500 \text{ W}/\text{m}^2$, se obtiene un pico de potencia de 3.3 kW, y la potencia que se registra cuando la celda de combustible está operando a condiciones normales es de 1500 vatios.

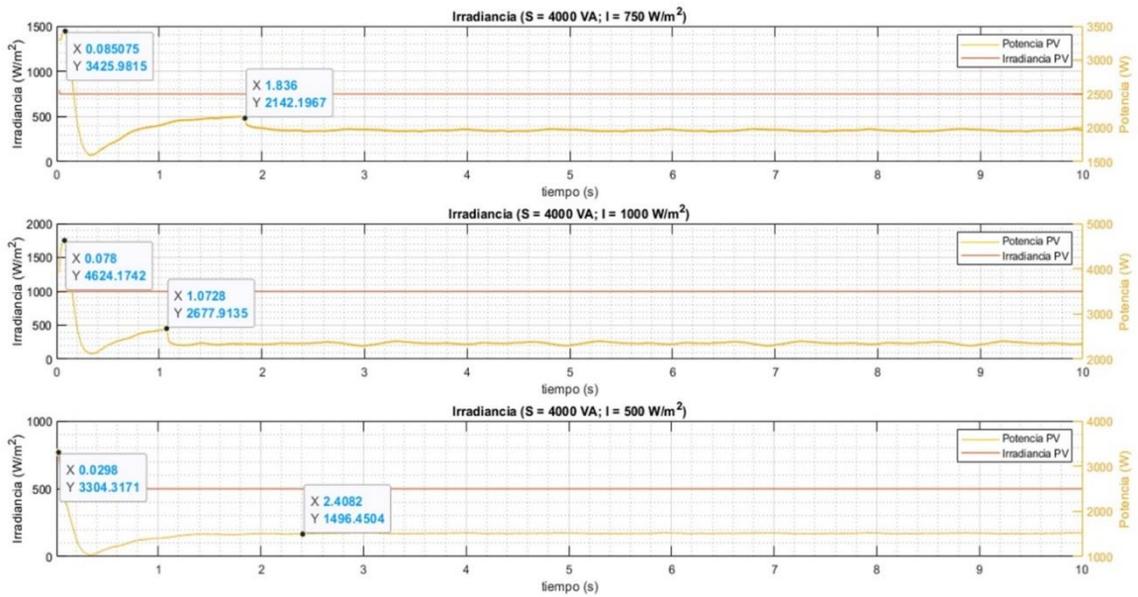


Figura 17. Irradiancia en función de la potencia del panel fotovoltaico.

• Rendimiento del sistema híbrido

Como se observa en el análisis, en los tres casos de eficiencia se toma como una potencia base de 4000 kW. Como primera instancia se establece una irradiancia de 750 W/m^2 , teniendo un comportamiento de la pila de combustible con un número de eficiencia que supera el 52% alcanzando su pico máximo con un valor del 60%. Por otro lado, cuando analizamos el panel fotovoltaico se tiene un claro dato de una eficiencia de alrededor del 30% aproximadamente, datos que son óptimos para el análisis del sistema híbrido de generación, con estos niveles de radiación obtendremos un rendimiento general del sistema del 6% al 8%. En los 3 casos la batería se mantendrá en un valor constante de reserva en función de la variación de la celda de combustible como del panel fotovoltaico, este equipo rodea un valor de eficiencia del 95%, al igual que el inversor con una eficiencia del 90%.

Para el segundo horario de análisis se tiene un comportamiento similar al primer

caso, no obstante, al ser el nivel de irradiación con mayor incidencia solar; 1000 W/m^2 , los valores de eficiencia serán los ideales para la operación del sistema, con esto obtenemos un valor total de eficiencia del 7% al 10%, alcanzado por el sistema híbrido de generación. En cuanto valores individuales obtenidos en la simulación, la celda pem posee un valor de eficiencia del 70%, y el panel fotovoltaico alcanza un nivel de eficiencia del 40%.

En el tercer caso, el inversor y las baterías se mantienen con un valor constante de eficiencia, este valor es el mismo con el que se simuló los dos horarios anteriores. En este último análisis la eficiencia del panel fotovoltaico obtendrá un valor cercano al 25%, la celda de combustible pondera un valor de eficiencia de alrededor del 40% llegando al 45% como pico máximo. La eficiencia total del sistema obtenida mediante simulación, en este horario bordea del 4% al 6%.

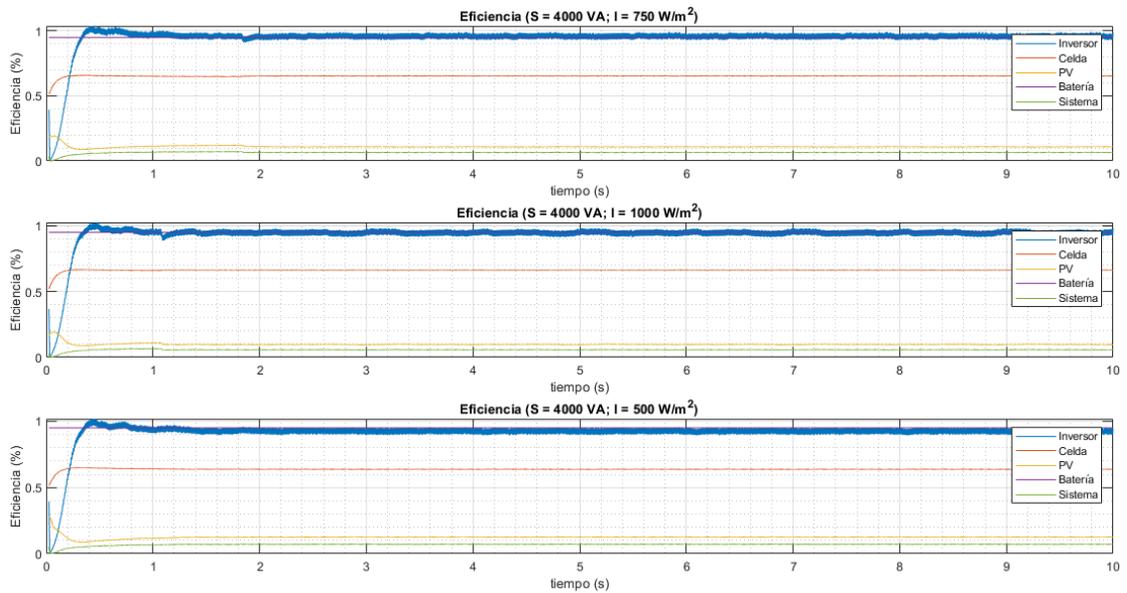


Figura 18. Eficiencia del sistema híbrido.

• Irradiancia vs flujo de hidrógeno

Retomando el análisis de los tres casos que se formularon, y variando el nivel de radiación solar en función de los tres períodos de tiempo, se analiza los datos recogidos en función de la masa de hidrógeno separado por el electrolizador a partir del agua.

En el primer caso tenemos una relación sistemática de crecimiento lineal a medida que el flujo de hidrógeno empieza a crecer paulatinamente entre 56 kg, también se presenta de manera lineal la radiación solar cuyo pico máximo es de 750 W/m^2 con esto se puede deducir la

cantidad de hidrógeno separado del oxígeno en consideración de la radiación solar.

El segundo caso de análisis, la irradiación presente cuyo valor se mantiene constante en los 1000 W/m^2 , el flujo de masa del hidrógeno no se ve afectado en el transcurso del tiempo, al ser este un valor de radiación ideal para el sistema, con esto el electrolizador generará alrededor de 60 a 65 kg de hidrógeno utilizables en la celda de combustible. Sin embargo, para el tercer caso de análisis la presencia de menor irradiación, su curva tiende a tener una inclinación altamente notada, siendo así que para una radiación de 500 W/m^2 el electrolizador separa alrededor de 43 a 45 kg de hidrógeno separados del agua.

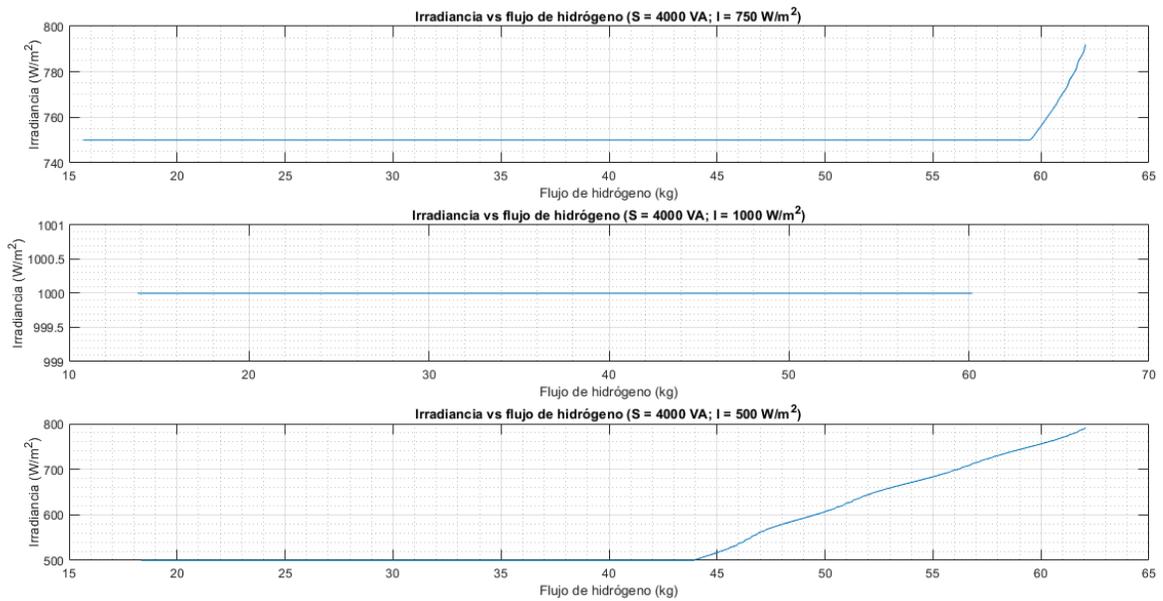


Figura 19. Irradiancia vs flujo de hidrógeno.

- **Voltaje de la celda de combustible vs flujo de hidrógeno**

A disimilitud del panel solar fotovoltaico, la celda de combustible pem tiene una estrecha relación con el voltaje generado. En este análisis, entre el voltaje de la celda de combustible y el flujo de hidrógeno consumido por la misma, se va a mantener la misma potencia consumida por la

carga, variando netamente el nivel de radiación solar.

Se observa claramente que en los tres casos se genera un punto de pico máximo de voltaje en la celda de 54 voltios y un consumo de hidrógeno de 65 kg, a partir de este punto tiende a tener un decremento constante en todo el proceso de generación del sistema híbrido, dado esto el voltaje de la celda de combustible va a tender a aumentar a medida que la masa de hidrógeno va en disminución, hasta llegar a valores cercanos a los 42 voltios y un consumo de hidrógeno de 56 kg.

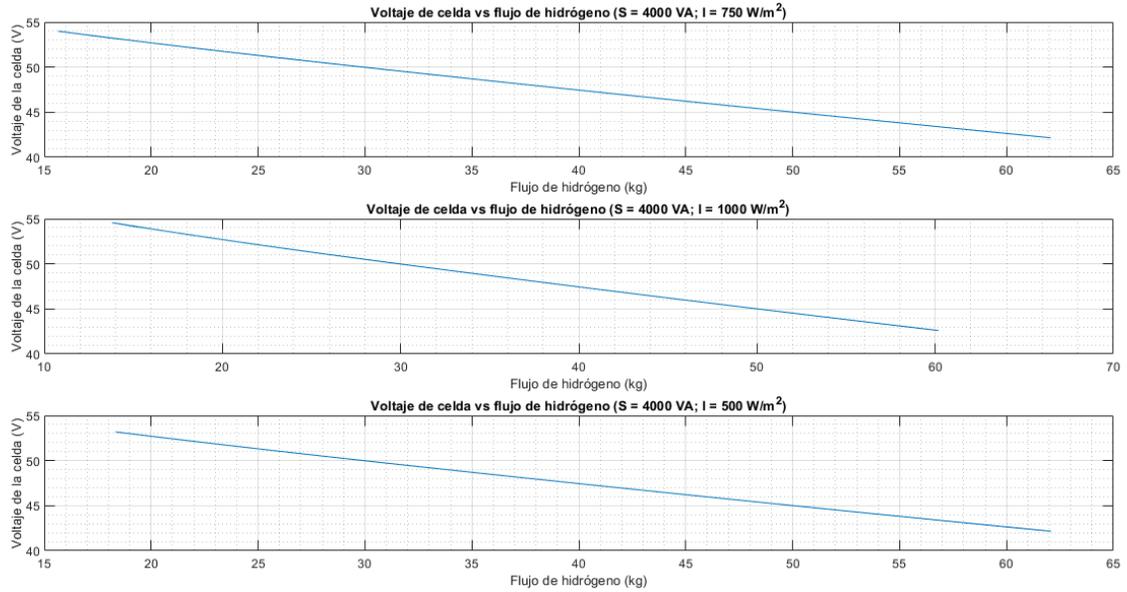


Figura 20. Voltaje de la celda de combustible vs flujo de hidrógeno.

6 Análisis de resultados sistema de cogeneración

Para todo estudiante de ingeniería todo diseño empieza desde un esquema, para esta investigación se desarrolló varios cálculos antes de proponer un diseño de recuperación de calor. En la Figura 21, se indica el diseño del sistema propuesto en esta investigación.

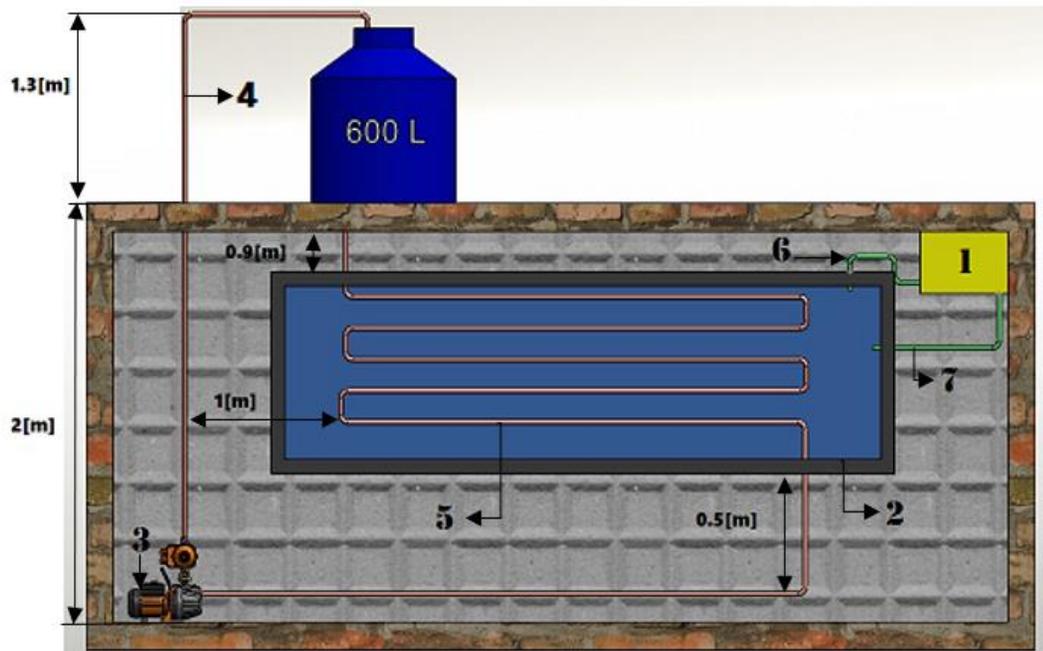


Figura 21. Sistema de cogeneración [autor].

Los números que se muestran en el esquema de la Figura 21, se representan en la Tabla 6.

Tabla 6. Leyenda diseño del sistema de cogeneración [53].

1	Celda de combustible tipo Pem (Marca Horizon).
2	Intercambiador de calor.
3	Bomba de agua.
4	Tubería de cobre para descarga.
5	Tubería de cobre para succión.
6	Tubería de salida de agua caliente de la celda de combustible.
7	Tubería de recirculación de agua hacía la celda de combustible.

El objetivo de la arquitectura mostrada en la Figura 21, es diseñar un sistema que

permita recuperar el calor eficientemente de la celda de combustible. El calor recuperado servirá para calentar agua a temperatura ambiente alrededor de 35°C y 37°C en Quito, este parámetro se escoge al ser la ciudad donde se realiza la investigación. Esta agua se almacenará en un tanque para su posterior recolección en usos de agua de consumo sanitario para una vivienda unifamiliar, estos valores de temperatura se toman en consideración ya que la temperatura ideal interna del ser humano es de 37°C [54].

En esta investigación se realizó varios diseños antes de proponer un sistema de recuperación de calor. En este punto se toma en cuenta el tamaño y espacio que ocupa la infraestructura, con esto el autor sugiere un intercambiador con las siguientes especificaciones.

Tabla 7. Parámetros iniciales de diseño del intercambiador de calor.

Valor longitudinal de un paso de la tubería de succión contenida en el intercambiador de calor	3 metros
Valor longitudinal del intercambiador incluido coraza	3.1 metros (5 centímetros de separación por cada lado)

Se hace referencia en la Tabla 6, sobre la marca de la celda de combustible, ya que para estos cálculos se ve preciso conocer los valores reales de flujo de producto saliente de la celda de combustible pem, es decir, el subproducto de haber transformado energía química en energía eléctrica [7]. Estas características provenientes del fabricante se resumen en la tabla 8, [53].

Tabla 8. Características de la celda de combustible tipo pem marca Horizon [53].

Potencia máxima	4000	W
Número de celdas	65	Celdas
Rendimiento nominal	28.8	V
Flujo máximo de salida	26	L/min
Temperatura máxima de operación	65	°C

Los parámetros iniciales que se tomó en cuenta para el desarrollo del sistema de cogeneración en la presente investigación se indica en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros iniciales del sistema de cogeneración.

Capacidad de almacenamiento del tanque	600 litros.
Altura total del sistema, tomados de referencia desde el nivel del suelo.	3.3 metros

Ya con estos valores, se describe un funcionamiento inicial, ya que es la parte más importante en cuanto a la puesta en marcha de cualquier equipo o dispositivo, con esto se propone dar una representación del sistema, para sus posteriores cálculos.

6.1 Funcionamiento del sistema de recuperación de calor

Como inicio, el tanque va a contener 600 litros de agua para consumo sanitario, como se observa en el diseño existen dos tuberías conectadas al tanque, una para descarga y otra para succión del agua, le corresponden los números (4) y (5) respectivamente. La tubería de succión está contenida dentro del intercambiador de calor y es la misma que representa el valor de tuberías a emplear.

Por otro lado, la celda de combustible posee dos tuberías conectadas al mismo dispositivo, de estas, la tubería que proporciona la temperatura de 65°C, es el número (6). El número (7) corresponde a un fluido, con cierta temperatura del producto al haber calentado agua a temperatura ambiente en el intercambiador de calor, situación de no interés en la presente investigación.

Con esto, cuando la celda de combustible empieza a generar energía eléctrica DC a potencia y a voltaje nominal, al mismo tiempo también como reactivo o subproducto desprenderá agua

a su temperatura máxima de operación a 65°C, es aquí cuando la bomba de agua empezará su operación.

Como principio succiona el agua desde el tanque hacia el intercambiador de calor, este caudal de agua llega a la bomba y nuevamente se descarga en el tanque, este proceso se lo repite durante 15 minutos. La condición para que este sistema funcione, es que la celda de combustible y la bomba de agua deben trabajar simultáneamente durante este tiempo.

Con esto obtenemos agua seteada a temperaturas de 35°C y 36°C, para confort térmico en una vivienda [54]. Se propone estas dos temperaturas ya que no se consideran las pérdidas de calor del sistema hacia el ambiente.

6.2 Análisis dimensional del sistema de cogeneración

Teniendo en cuenta el volumen y el tiempo podemos calcular el caudal de funcionamiento del sistema, hacemos uso de la fórmula 42 [45]:

$$Q = \frac{vol}{t} = \frac{volumen}{tiempo} \quad (42)$$

$$Q = \frac{600 \text{ lt}}{15 \text{ min}} = 40 \frac{\text{lt}}{\text{min}}$$

Transformándolo a metros cúbicos:

$$Q = 40 \frac{\text{lt}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} \quad (43)$$

$$Q = 6.6667 * 10^{-4} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Una vez obtenido el caudal se procede a realizar un cálculo de selección de tuberías, en este caso se dispondrá de una tubería de succión y otra tubería de

descarga como se mencionó en el funcionamiento del sistema. Para este cálculo se relaciona el caudal con la velocidad del fluido, se hace uso de la ecuación 44 [45]:

$$Q = A * v \quad (44)$$

Donde, A es el área de la tubería, y v es la velocidad de succión 2 m/s , esta velocidad se la recoge de [55], aquí se determina esta velocidad como la ideal para tuberías de succión o aspiración.

6.3 Selección de tubería de succión

Este análisis basa su teoría en las máquinas hidráulicas, donde el material idóneo en estos sistemas de bombeo de agua es el cobre ya que es un excelente conductor térmico [45]. Se despeja el área de la ecuación 44.

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{6.6667 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}} \quad (45)$$

$$A = 3.3334 * 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

El valor de $3.3334 * 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$, representa el área de la tubería de succión, esta va a ser el área necesaria para que el fluido en este caso agua, recorra la tubería con cierta velocidad específica [45].

El criterio de selección de tubería que se considera en esta investigación se recoge de las tablas para el dimensionamiento de tubos de cobre del libro de Robert L. Mott [56], donde hace referencia el valor del flujo de área medida en m^2 .

A continuación se escoge dos datos de flujo de área que promedien el valor de área calculado en la ecuación 45 [56]. Cabe mencionar que esta área se obtiene a partir del caudal de diseño.

$$A_{3/4} = 2.812 * 10^{-4} [m^2] \quad (46)$$

$$A_{1'} = 5.017 * 10^{-4} [m^2] \quad (47)$$

Estos dos datos de área escogidos en la expresión 46, 47, y se los obtiene del libro de Mott [56].

Para calcular la velocidad con la que el flujo de agua recorrerá estas dos áreas, se hace relación el tamaño nominal de la tubería a emplear 3/4' y 1' pulgada respectivamente. Se hace uso de la ecuación 48 [45].

$$v_{3/4} = \frac{Q}{A_{3/4}} \quad (48)$$

$$v_{3/4} = \frac{6.6667 * 10^{-4} [\frac{m^3}{s}]}{2.812 * 10^{-4} [m^2]}$$

$$v_{3/4} = 2.37 [\frac{m}{s}]$$

Lo mismo para el área de 1' pulgada.

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} \quad (49)$$

$$v_1 = \frac{6.6667 * 10^{-4} [\frac{m^3}{s}]}{5.017 * 10^{-4} [m^2]}$$

$$v_1 = 1.329 [\frac{m}{s}]$$

De estas dos velocidades mencionadas en las ecuaciones 48, 49 se selecciona la que tenga el menor valor, en este caso el de 1', este dato se lo selecciona de tal manera, para evitar efectos de cavitación y de flujo turbulento [56].

6.4 Selección de tubería de descarga

La velocidad de diseño para esta tubería se sustenta por [57], respecto a la norma hidrosanitaria NHE, donde la velocidad de diseño del agua en tuberías debe fluctuar entre 0,6 $[\frac{m}{s}]$ y 2.5 $[\frac{m}{s}]$, valores mínimo y máximo respectivamente. Se toma como valor ideal el máximo de 2.5 $[\frac{m}{s}]$. A continuación, se realiza la misma consideración de cálculos que se hizo en la selección de la tubería de succión [44].

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{6.6667 * 10^{-4} m^3/s}{2.5 m/s} \quad (50)$$

$$A = 2.6667 * 10^{-4} [m^2]$$

Según las tablas del libro de Mott [56], las dos cifras de tamaño nominal promedio que hacen referencia a estas dos áreas encontradas, se expresan en la ecuación 51 y 52.

$$A_{5/8} = 2.154 * 10^{-4} [m^2] \quad (51)$$

$$A_{3/4} = 2.812 * 10^{-4} [m^2] \quad (52)$$

A continuación recoge estos dos valores de área con diferente medida 5/8' y 3/4' de pulgada y se calcula la velocidad del flujo para cada valor de área [56].

$$v_{5/8} = \frac{6.6667 * 10^{-4} [\frac{m^3}{s}]}{2.154 * 10^{-4} [m^2]} \quad (53)$$

$$v_{5/8} = 3.0950 [\frac{m}{s}]$$

$$v_{3/4} = \frac{6.6667 * 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s}\right]}{2.812 * 10^{-4} [m^2]} \quad (54)$$

$$v_{3/4} = 2.3708 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Se escoge la velocidad $v_{3/4} = 2.3708 \left[\frac{m}{s}\right]$, y a su vez se escoge el área de flujo que corresponde a dicha velocidad $A_{3/4}$. Con estos datos obtenidos se realiza un resumen de las áreas a disponer en las tuberías:

Tabla 10. Resumen de tuberías sistema de cogeneración.

Tubería de succión	1 pulgada
Tubería de descarga	$\frac{3}{4}$ de pulgada

6.5 Selección del intercambiador de calor

El siguiente paso a tomar, es el cálculo del intercambiador de calor para eso ya se ha dado ciertas ecuaciones en el capítulo 3. En este caso se toma en consideración el flujo masico de la pila de combustible pem y el flujo másico del agua en el tanque a condiciones normales, este se representó como el caudal en la ecuación 43. Además, como se cita en [49], es necesario saber las temperaturas iniciales de los dos flujos de entrada al intercambiador de calor. Ahora para los cálculos del intercambiador es preciso poseer el flujo másico de ambos fluidos, para ello se relaciona los litros con los kilogramos y décimos que 1 litro es igual a 1 kilogramo [45].

Para representar el flujo másico de salida de la celda de combustible o fluido

caliente se indica en la siguiente ecuación [56]:

$$\dot{m}_{hot} = 26 \frac{lt}{min} * \frac{1 kg}{1 lt} * \frac{1 min}{60 s} \quad (55)$$

$$\dot{m}_{hot} = 0.4333 \frac{kg}{s}$$

En cuanto al fluido frío, su flujo másico se lo representa en la ecuación 56, [56].

$$\dot{m}_{cold} = 40 \frac{lt}{min} * \frac{1 kg}{1 lt} * \frac{1 min}{60 s} \quad (56)$$

$$\dot{m}_{cold} = 0.6667 \frac{kg}{s}$$

Por otro lado, las temperaturas de operación del sistema se disponen de la siguiente manera: La temperatura aprovechable de la operación nominal de la pila de combustible pem [53]:

$$t_{hi} = 65^{\circ}C \quad (57)$$

La temperatura del agua a temperatura ambiente en Quito es de alrededor de $11.5^{\circ}C$ en todo el año, para esta investigación se tomó un promedio de temperatura de $10^{\circ}C$ [58], entonces:

$$t_{ci} = 10^{\circ}C \quad (58)$$

Como se menciona en [45], el balance de energía en el intercambiador de calor sugiere de cuatro temperaturas dos de entrada y dos de salida, la siguiente temperatura que se describe es la temperatura de confort térmico en la residencia el cual definimos a $35^{\circ}C$. Para

los próximos cálculos este valor se lo representa en la ecuación 59.

$$t_{co} = 35^{\circ}\text{C} \quad (59)$$

Del documento citado en [56], se obtiene la tabla de propiedades del agua saturada, en este índice se muestra las propiedades del agua a diferentes temperaturas. A continuación, se realiza una selección de dato basándose en las temperaturas de entrada del sistema de recuperación de calor, los subíndices son t_{hi} , t_{ci} [45].

Los valores de calor específico que hacen mención a estas temperaturas son recogidos de la tabla de Yanus A. Cengel [45]:

$$c_{phot} = 4187 \frac{J}{kg * K} \quad (60)$$

$$c_{pcold} = 4194 \frac{J}{kg * K} \quad (61)$$

Con las ecuaciones 60 y 61, se calcula la capacidad calorífica de cada fluido, caliente y frío respectivamente, haciendo uso de las ecuaciones 13,14.

$$C_{hot} = 0.4333 \frac{kg}{s} * 4187 \frac{J}{kg * K} \quad (62)$$

$$C_{hot} = 1814.2 \frac{J}{^{\circ}\text{C}}$$

$$C_{cold} = 0.6667 \frac{kg}{s} * 4194 \frac{J}{kg * K} \quad (63)$$

$$C_{cold} = 2796.1 \frac{J}{^{\circ}\text{C}}$$

Como se menciona en la teoría de intercambiadores de calor en [45], se selecciona un valor mínimo y un valor máximo:

$$C_{min} = 1814.2 \frac{J}{^{\circ}\text{C}} \quad (64)$$

$$C_{max} = 2796.1 \frac{J}{^{\circ}\text{C}} \quad (65)$$

Así se obtiene una relación entre estos dos valores.

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{1814.2 \frac{J}{s^{\circ}\text{C}}}{2796.1 \frac{J}{s^{\circ}\text{C}}} \quad (66)$$

$$C = 0.649$$

Para hallar la efectividad del intercambiador aplicamos la ecuación 67 [45]:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} \quad (67)$$

$$\varepsilon = 0.455$$

El intercambiador seleccionado es de agua hacia agua, mediante el coeficiente de transferencia de calor citado en [49].

$$U_{prom} = \frac{1700 + 850}{2} \quad (68)$$

$$U_{prom} = 1275 \frac{W}{m^2^{\circ}\text{C}}$$

Con estos valores previamente obtenidos, y necesarios para el dimensionamiento del intercambiador de calor, seguidamente se aplica el algoritmo para la solución del mismo, este modelo se obtiene de [45].

6.6 Modelo NTU

Cuando se especifican todas las temperaturas de entrada y salida, el tamaño del intercambiador se lo puede resolver fácilmente empleando métodos como el LMTD, y de modo alternativo el modelo de la efectividad NTU [43]. En esta investigación se escoge el intercambiador de tubos y coraza, para este intercambiador la relación de unidades de transferencia NTU es [45]:

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+C^2}} \cdot \ln\left(\frac{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - C - \sqrt{1+C^2}}{\frac{2}{\varepsilon} - 1 - C + \sqrt{1+C^2}}\right) \quad (69)$$

$$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1+(0.649)^2}} \cdot \ln\left(\frac{\frac{2}{0.455} - 1 - 0.649 - \sqrt{1+(0.649)^2}}{\frac{2}{0.455} - 1 - 0.649 + \sqrt{1+(0.649)^2}}\right)$$

$$NTU = 0.7798$$

Para calcular el área superficial se calcula con la ecuación [45], esta área en la Figura 21, se la representa con el número (8).

$$A_s = \frac{NTU * C_{min}}{U} \quad (70)$$

$$A_s = \frac{0.7798 * 1814 \frac{W}{^\circ C}}{1275 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}$$

$$A_s = 1.1016 m^2$$

Se obtiene el área superficial podemos conseguir el número de tubos del intercambiador mediante la ecuación 71 [55]:

$$t = \frac{A_s}{\pi * D_i * L} \quad (71)$$

$$t = \frac{1.1016 m^2}{\pi * (25.27 * 10^{-3}) * 3 m}$$

$$t = 4.65 \text{ tubos}$$

Este valor calculado debe ser redondeado a fin de tener un número entero. En conclusión, el número de tubos a disponer es 5, o dicho a su vez 5 pasos de tubería.

6.7 Selección bomba de agua

Para esta selección de bomba de agua se utiliza un criterio de pérdidas por fricción en los conductos, definido por el método de Hazen-Williams [56],[59], este procedimiento hace la utilización de la ecuación para el cálculo de pérdidas por fricción:

$$hf = 10.648 * \left(\frac{1}{C_{HW}}\right)^{1.852} * \frac{Q^{1.852}}{D^{4.871}} * L \quad (72)$$

Siendo, C_{HW} coeficiente de fricción y hace referencia al valor de tubería de cobre con un valor de 135 adimensional, Q es el caudal de fluido que circula dentro de la tubería, D es el diámetro de la tubería, L es la longitud de la tubería [56].

Como se analiza en este sistema de cogeneración se empleará dos tuberías una de succión y otra de descarga, las longitudes de esta tubería se expresan a

continuación en la ecuación 73. Estos valores se rigen al diseño del autor del documento:

$$L_{tubería\ de\ descarga} = 3.3 \text{ [m]} \quad (73)$$

Para la longitud de la tubería de succión, se suman los siguientes valores.

$$\begin{aligned} L_{tubería\ de\ succión} &= 0.90 + 5(3) + 1 + 3 \\ &+ 0.5 \text{ [m]} \end{aligned} \quad (74)$$

$$L_{tubería\ de\ succión} = 20.4 \text{ [m]}$$

El valor de 15 m representa los 5 pasos de tubería de 3 metros.

Para la selección de esta bomba se toman en cuenta las pérdidas por fricción del fluido en la tubería tanto de succión como de descarga, a continuación, se presentan las ecuaciones que se emplean bajo la ecuación 72, éstas expresiones se sustentan de [56],[59].

En cuanto a los valores del diámetro en la tubería representados con la letra D, se hace referencia a las tablas descritas en el libro de Mott [56], donde relaciona el tamaño nominal en pulgadas de la tubería, con el diámetro interior en milímetros mm. Es así que se escoge un valor de 18.92 mm para descarga y en succión 25.27 mm [56].

$$\begin{aligned} h_{f_{descarga}} &= 10.648 * \left(\frac{1}{135}\right)^{1.852} \\ &* \frac{\left(6.6667 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)^{1.852}}{(18.92 * 10^{-3} m)^{4.871}} * 3.3 m \end{aligned} \quad (75)$$

$$h_{f_{descarga}} = 1.2924 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} h_{f_{succión}} &= 10.648 * \left(\frac{1}{135}\right)^{1.852} \\ &* \frac{\left(6.6667 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}\right)^{1.852}}{(25.27 * 10^{-3} m)^{4.871}} * 20.4 m \end{aligned} \quad (76)$$

$$h_{f_{succión}} = 1.9513 \text{ [m]}$$

Las pérdidas totales en el sistema se obtienen de la suma de estas dos anteriores.

$$h_{f_{total}} = 3.2437 \text{ [m]} \quad (77)$$

Además, para este dimensionamiento, es necesario obtener la altura geométrica del sistema, para esto es de importancia regirse al diseño. Esta altura, representa la altura total del sistema medida desde el nivel del suelo, ya que la aplicación se dispone para una vivienda unifamiliar de un solo piso [59].

$$h_{geométrica} = 3.3 \text{ [m]} \quad (78)$$

Con este dato, se obtiene la altura manométrica mediante la ecuación 79 [59].

$$h_{manométrica} = h_{f_{total}} + h_{geométrica} \quad (79)$$

$$h_{manométrica} = 6.5427 \text{ [m]}$$

A continuación se procede a dimensionar la bomba de agua, para esta selección el autor se basa en [60], esta página web permite dimensionar la potencia de la bomba adecuada, el punto de operación real y su respectivo catálogo de operación. Los datos necesarios para este diseño se redactan en la tabla 11.

Tabla 11. Datos para el dimensionamiento de la bomba.

Caudal (Q)	6.6667* $10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	$2.4 \frac{m^3}{h}$
h(manométrica)	6.5427 [m]	

En conclusión, la potencia de la bomba de agua a disponer en el sistema es de 180 watos, para un mejor detalle se presentan una tabla resumen con los resultados obtenidos en cuanto al sistema de cogeneración.

Tabla 12. Resumen del sistema de cogeneración propuesto.

Área superficial del intercambiador de calor	1.1016	m^2
# de pasos de tubería del intercambiador	5	pasos
Longitud total tubería de succión	20.4	m
Diámetro tubería succión	1	pulgada
Longitud total tubería de descarga	3.3	m
Diámetro tubería descarga	$\frac{3}{4}$	pulgada
Potencia de la bomba	180	w
Volumen máximo de agua caliente disponible en el sistema	600	lt

7 Conclusiones

Se realizó la implementación mediante la simulación procedente del software Matlab/Simulink, estos datos medidos se los obtuvo a partir de un modelo dinámico de generación comprendido por un panel fotovoltaico y una celda de combustible, de estos dos equipos se logró obtener diferentes comportamientos tanto de voltaje, corriente y potencia en función de la adquisición de energía solar fotovoltaica, estas variables son utilizadas para un modelo de consumo residencial para proveer hasta 4 kWh/día, todo esto se logró utilizando procesos de transformación de energía. Por tal motivo se puede decir que la generación de energía híbrida es viable para la implementación residencial a gran escala, con el hidrógeno verde como avance importante para viabilizar y garantizar un consumo de energía limpia. Con respecto a las pruebas en condiciones de radiación $750 \text{ W}/m^2$, $1000 \text{ W}/m^2$, $500 \text{ W}/m^2$, se puede notar la producción de este gas, dato importante para su almacenamiento y control.

En el análisis de todos los resultados obtenidos se tiene una clara evidencia del modo en que opera el sistema híbrido de generación, gracias a la integración de la celda pem dota al sistema de un respaldo de energía confiable, está claro que el rendimiento y la eficiencia del sistema se verá condicionado por la radiación solar que se presenta en ciertos períodos de tiempo, sin embargo, la falta de compensación de energía serán sustentados mediante el sistema de respaldo y un sistema de depósito de energía tanto en hidrógeno como en el sistema de baterías, los cuales al ver un decremento considerable de la potencia suministrada al sistema, darán lugar a una retroalimentación sistemática de energía, verificada por el control de carga del

sistema, dando lugar a un sistema sostenible y eficaz.

Basados en la temperatura del agua residual de la celda de combustible a 65°C y la temperatura ambiente del agua reservada en un tanque a 10°C, se diseñó un sistema de cogeneración el cual consta de un intercambiador de calor, el mismo calentará agua a 35°C para consumo sanitario, esta selección basó su estudio en dos leyes de la termodinámica y la transferencia de calor. En la investigación se obtuvo un dato importante el área superficial del intercambiador de calor, con un valor de 1.1 m², esta área representa el espacio disponible para realizar la denominada transferencia de calor entre fluidos.

8 Recomendaciones

Como se menciona, el intercambiador de calor basa su operación en dos temperaturas de entrada y dos de salida, la temperatura que no se tomó en cuenta en esta investigación es la de desfogue del equipo utilizado en la Figura 23 se la representa con el número 7, este caudal de agua puede utilizarse para recirculación en la celda de combustible, por el motivo que esta necesita un sistema de enfriamiento, es ahí donde se puede realizar un estudio, si es factible o no aplicar el modelo.

9 Trabajos futuros

En base a este análisis se obtienen valores reales de operación tanto como voltaje y corriente en un sistema combinado, estos valores se podrán comparar con un sistema híbrido real implementado.

Para el análisis del sistema de cogeneración se hace uso de un intercambiador de calor, un trabajo a futuro será la optimización de diseño del

modelo de cogeneración propuesto en la investigación.

10 Referencias

- [1] V. Ángel, A. Pérez, J. Luís, M. Tabarés, and Á. Sánchez Bermúdez, “Modelización de Sistemas Energéticos Híbridos con Hidrógeno como Vector Energético,” 2015.
- [2] J. R. Ares, F. Leardini, C. Sánchez, and J. F. Fernández, “EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO: MUCHO HECHO PERO CASI TODO POR HACER,” *Encuentros Multidiscipl.*, pp. 1–10, 2019, doi: 10.32457/ISBN978956845445643 2019-ED1.
- [3] ARIEMA, “Almacenamiento de Hidrógeno,” *Hidrógeno*, 2019. <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2#:~:text=El hidrógeno puede ser almacenado,envasa en botellas o plataformas.>
- [4] F. Pamela, C. Barba, D. Andrés, V. Fajardo, and E. Renovables, “Sistema Híbrido de Suministro de Energía basado en Energía Renovable para Aplicación en un Laboratorio Móvil,” pp. 1–11, 2015.
- [5] O. Perpi, “ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA,” no. January 2011, 2014.
- [6] J. A. Flores and G. R. Qui, “CELDA DE COMBUSTIBLE COMO ELEMENTOS POTENCIADORES PARA UN DESARROLLO ENERGÉTICO SUSTENTABLE,” vol. 0, pp. 242–259, 2019, doi: <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/4707>.
- [7] L. F. T. Vergara, “Diseño Y

- Construcción De Un Prototipo De Celda De Combustible (Tesis de Maestría),” p. 120, 2015, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11517/1/CD-6497.pdf>
- [8] M. Marimón Sarmiento, “Modelización Y Análisis Energético De Configuraciones De Trigeneración En Edificios,” pp. 1–284, 2011.
- [9] P. Sánchez Sobrini and V. Mesa Vélez Bracho, “Sistema de cogeneración basado en un sistema de pila de combustible de carbonatos fundidos para abastecer las necesidades de edificios y distritos,” *CONSTRUIBLE.es*, 2014. <https://www.construible.es/comunicaciones/sistema-cogeneracion-basado-sistema-pila-combustible-carbonatos-fundidos-para-abastecer-necesidades-edificios-distritos>
- [10] R. Tutor, M. Felipe, and R. Iglesias, “Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda,” 2016.
- [11] J. Olmedo Gonzáles, “Diseño de un sistema híbrido solar-hidrógeno de baja potencia con administracion de energía,” *Inst. Politécnico Nac.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–164, 2018, doi: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24250>.
- [12] Oriol Planas, “Energía Solar,” *energia.net*, 2016. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica#> (accessed Apr. 04, 2022).
- [13] T. Rachman, “ESTADO DEL ARTE PARA MÉTODOS DE PREVISIÓN EN EL PRONÓSTICO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN CELDAS FOTOVOLTAICAS,” *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951–952., vol. 4, no. 1, pp. 10–27, 2018.
- [14] Marcos Sanchez fraile, “Desarrollo de una herramienta para el modelo del comportamiento eléctrico de células solares,” 2019, p. 63, 2019.
- [15] E. Ozgirgin and A. Albostan, “Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer-PEM fuel cell system for micro-cogeneration applications,” *ScienceDirect*, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.122.
- [16] A. San Martin, J; Zamora, IDel, “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEMFC,” vol. 0, pp. 1–9, 2009.
- [17] E. Rincón Castrillo, J. García Pabón, and J. Bermúdez Santaella, “ESTADO DEL ARTE DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE STATE OF THE ART OF FUEL CELLS,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, pp. 1–14, 2018, doi: 10.24054/16927257.v33.n33.2019.3320.
- [18] L. Escobedo, E. & Zamora, “Modelado Dinámico De Celdas De Combustible,” *Cuernavaca, Mor. México*, 2006, [Online]. Available: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/6055%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Modelado+din+mico+de+celdas+de+combustible#0>
- [19] Q. Roza, M. Sandra, G. Tibaquirá, and E. Juan, “Proton exchange

- membrane fuel cells (PEMFC),” 2007.
- [20] W. Mogrovejo and J. Sarmiento, “Análisis de factibilidad técnica y económica en la implementación de energía fotovoltaica y termo solar para generación de electricidad y calentamiento de agua mediante paneles solares fijos y con un seguidor de sol de construcción casera, para una vivien,” *El Escorial*, p. 234, 2011.
- [21] J. Oyola and G. Gordillo, “Estado del arte de los materiales fotovoltaicos y de la tecnología solar fotovoltaica,” 2007.
- [22] Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, “Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible,” *Ceram. y Vidr. Artic. revisión*, vol. 52, pp. 105–117, 2013, doi: 10.3989/cyv.142013.
- [23] D. of C. E. I. I. of T. D. SUDDHASATWA BASU, *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology*. 2007.
- [24] M. T. CALDERÓN and L. D. J. MESA P., “Principios de funcionamiento y construcción de una celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC),” *Sci. Tech.*, vol. X, no. 25, pp. 125–130, 2004, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84911685023>
- [25] A. Chandan *et al.*, “High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) e A review,” *J. Power Sources*, vol. 231, pp. 264–278, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.126.
- [26] E. Jannelli, M. Minutillo, and A. Perna, “Analyzing microcogeneration systems based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by energy balances,” *Appl. Energy*, vol. 108, pp. 82–91, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.067.
- [27] J. I. San Martín, I. Zamora, S. M. J. Javier, V. Aperribay, and G. Buigues, “APLICACIONES ESTACIONARIAS DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE.” *Décimo Segundo Encuentro Reg. Ibero-americano del CIGRÉ*, pp. 1–8, 2007.
- [28] M. Anton and E. Guillermo, “Sistemas de microcogeneración que integran paneles fotovoltaicos con generadores de electricidad y calor combinados (CHP) y almacenamiento en batería Microcogeneration systems combining solar PV , combined heat and power plant (CHP) and battery stora”.
- [29] C. Fúnez Guerra, E. Almansa Rodríguez, and D. Fuentes Ferrera, “El hidrógeno: vector energético del futuro,” *Actual. Tecnol. / Energ.*, pp. 20–27, 2010.
- [30] E. M. López González, “Definición de criterios de diseño de instalaciones de almacenamiento de hidrógeno producido con energías renovables,” *Tesis Dr.*, pp. 1–265, 2013.
- [31] Á. M. Mateus Rueda, “Modelo en matlab simulink para un sistema de acumulacion de hidrogeno para sistemas fotovoltaicos autonomos,” vol. 0, pp. 1–112, 2021, doi: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/14055>.
- [32] I. Azkárate, “Almacenamiento De Hidrógeno,” *ResearchGate*, no. January 2010, pp. 1–12, 2014, [Online]. Available:

- <http://www.fao.org/docrep/005/y4628e/y4628e05.htm>
- [33] F. A. Padrón-jabib, U. Pontificia, and B. Cq, “Baterías: Estado del Arte y Vigilancia Tecnológica 2013,” pp. 1–21, 2014.
- [34] D. Hoyos, M. Villena, V. H. Serrano, F. Farfán, and C. Cadena, “Controlador de carga para un sistema fotovoltaico aislado,” *Congr. Argentino Sist. Embebidos*, pp. 158–162, 2011.
- [35] E. S. Marín Calle, “Simulación Dinámica de Sistema Híbrido (Pila Combustible PEM y Panel Solar Fotovoltaico) para una vivienda tipo de hasta 1200 Wh/día,” pp. 1–47, 2020, doi: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7980>.
- [36] V. Cárdenas, R. Álvarez, and M. González, “Inversores inteligentes en sistemas de energía solar fotovoltaica,” *Univ. potosinos.*, vol. 53, no. 9, pp. 24–29, 2019, doi: 10.23857/pc.v7i4.3887.
- [37] F. Segura, “Sistema híbrido inteligente para la predicción de tensión de una pila de combustible basada en hidrógeno,” vol. 16, pp. 492–501, 2019, doi: <https://doi.org/10.4995/riai.2019.10986>.
- [38] J. Asencio De Miguel, “SISTEMAS DE COGENERACIÓN BASADOS EN PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM.MODELADO Y OPTIMIZACION ORIENTADA A LA MAXIMIXACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.” 2017.
- [39] J. García Martín, “Pilas de combustible Parte II : Análisis funcional y Aplicaciones,” *Esc. Organ. Ind.*, 2014.
- [40] S. Ham, S. Jo, H. Dong, and J. Jeong, “A simplified PEM fuel cell model for building cogeneration applications,” *Energy Build.*, vol. 107, pp. 213–225, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.023.
- [41] A. Ferguson and V. I. Ugursal, “Fuel cell modelling for building cogeneration applications,” vol. 137, pp. 30–42, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.05.021.
- [42] R. García Soutullo, “Intercambiadores de Calor,” *Ingeniero marino*, 2017. <https://ingenieromarinero.com/intercambiadores-de-calor/>
- [43] G. R. De Fernandez and J. Onh, “Intercambiadores de calor,” p. 33, 2007.
- [44] C. Jacobo, “Design and Analysis of a Heat Exchanger,” p. 73, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/912/4/042056.
- [45] Ç. Yunus A., *Transferencia de Calor y Masa*, vol. 1, no. 9. 2013. [Online]. Available: <https://itscv.edu.ec/wp-content/uploads/2019/06/Transferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edición.pdf>
- [46] R. A. ANANIAS and R. B. KEEY, “Transferencia de calor,” *Teor. del secado*, pp. 75–99, 2020, doi: 10.22320/978-956-9275-85-2_4.
- [47] A. G. Vera-Dávila, J. C. Delgado-Ariza, and S. B. Sepúlveda-Mora, “Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab,” *Rev. Investig. Desarro. e Innovación*, vol. 8, no. 2, pp. 343–356, 2018, doi: 10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972.

- [48] C. A. Cango Japón, “Simulación dinámica de sistema híbrido Eólico y Pila- Combustible por Simulink / Matlab y validación de datos para una vivienda Tipo de hasta 2000 Wh ”,” *Comunidad al Serv. del Pueblo UNIDAD ACADÉMICA Ing. , Ind. Y CONSTRUCCIÓN*, vol. 0, pp. 1–76, 2018, doi: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/6211>.
- [49] C. B. with C. S. Made in china, “Made in China.” <https://expo.made-in-china.com/venue/oxmnEEQrKJIV/productSearch?word=solar+panel> +
- [50] R. P. L. S. G. M. L. G. Gallardo A, “Diseño de un cargador de baterías en aplicaciones de energía solar,” *Maskana*, vol. 5, no. 0, pp. 89–98, 2016.
- [51] M. Electronics, “Inversor.” <https://www.mouser.ec/c/power/power-inverters/>
- [52] L. Tipán and J. Rumipamba, “Determinación del factor de potencia mediante el uso de SBC en clientes,” *Rev. Técnica “Energía,”* vol. 15, no. 2, pp. 66–75, 2019, doi: 10.37116/revistaenergia.v15.n2.2019.379.
- [53] F. cell technologies Horizon, “Horizon Fuel Cell.” <https://www.directindustry.es/product/horizon-fuel-cell-technologies/product-62133-1198855.html>
- [54] Seiscubos, “Confort Térmico y cuerpo humano,” 2021.
- [55] Bombas Lesa, “Recomendaciones para la Tubería de Aspiración y Descarga.”
- [56] R. L. Mott, *Mecanica de Fluidos*. 2006. [Online]. Available: https://www.academia.edu/31396567/Mecánica_de_Fluidos_-_6ta_Edición_-_Robert_L._Mott.pdf
- [57] MIDUVI, “NEC-11, Norma Hidrosanitaria NHE Agua,” *Norma Ecuatoriana La Construcción*, p. 38, 2011.
- [58] EPMAPS, “AGUA DE QUITO,” *Sist. Distrib. del DMQ*, 2020.
- [59] J. Serch, “Hidráulica,” 2017.
- [60] “GRUNDFOS,” 2022.

11 Anexos

Anexo No.1 Clasificación de las celdas de combustible.

Tabla 13. Clasificación de las celdas de combustible [7],[18],[19].

Tipo	Tipo de electrolito	Temperatura de operación	Aplicación
Membrana de intercambio protónico (PEM)	Polímero Sólido	30-100 °C	Vehículos, aplicaciones móviles, generación estacionaria
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	50-200 °C	Aplicaciones militares y espaciales (Apolo)
Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido	175-220 °C	Aplicaciones en generación estacionaria. Ciclos combinados de alta potencia
Carbonato fundido (MCFC)	Solución líquida de litio, sólido y potasio	600-1000 °C	Generación estacionaria.
Metanol Directo (DMFC)	Nafion	20-90 °C	Dispositivos electrónicos de baja potencia
Oxido solido (SOFC)	Óxido de zirconio sólido con adiciones de litio sólido	500-1000 °C	Generación estacionaria, Ciclos combinados desde 2 kW hasta los MW

Anexo No.2. Diagrama de flujo esquema de control del sistema híbrido de generación renovable.

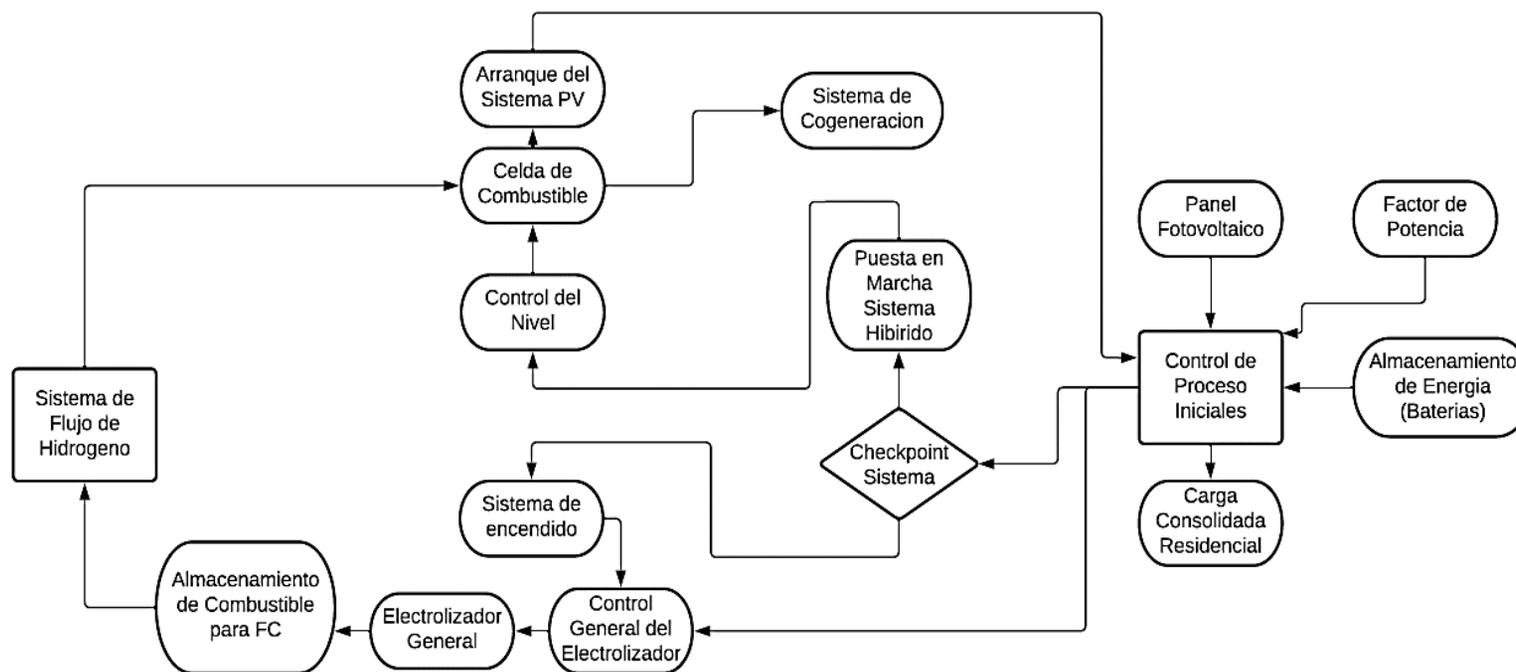


Figura 22. Diagrama de flujo del sistema híbrido de generación [autor].