



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“SUMINISTRO HÍBRIDO DE ENERGÍA (PV-FC-H2) DE BAJA POTENCIA
PARA APLICACIÓN EN ESTACIÓN ESTACIONARIA TIPO ISLA DE
TRANSMISIÓN DE DATOS”

INFORME DE MATERIA DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por:

DAVID ANDRÉS LÓPEZ REDROBÁN
PEDRO FRANCISCO SALCEDO INTRIAGO

Guayaquil-Ecuador

2015

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Santísima Virgen María.

Pedro F. Salcedo Intriago

A mis padres que siempre me apoyaron, a mis profesores y amigos que aportaron con conocimientos y ayuda a lo largo de mi vida universitaria.

David A. López Redrobán

DEDICATORIA

A mi padre, Pedro.

A mis hermanas: Jessica y Priscila.

Y muy especialmente a mi madre Carmen.

Pedro F. Salcedo Intriago

A toda mi familia que siempre estuvo pendiente de mí y me apoyaron.

David A. López Redrobán

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ph. D. Wilton Edixon Agila Gálvez

PROFESOR DE LA MATERIA DE GRADUACIÓN

MSc. Holger Ignacio Cevallos Ulloa

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este informe, nos corresponde exclusivamente a nosotros; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

DAVID ANDRÉS LÓPEZ REDROBÁN

PEDRO FRANCISCO SALCEDO INTRIAGO

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un sistema híbrido de potencia (SHP) conformado por una celda de combustible de hidrógeno, paneles solares fotovoltaicos y baterías como solución para el suministro de energía a un sistema de transmisión de datos de baja potencia que no está conectado a la red eléctrica convencional. Se analiza a través de simulación la respuesta eléctrica del SHP para la carga de baja potencia no conectada a la red eléctrica, mediante la variación de los principales parámetros que influyen en el comportamiento del sistema híbrido, que representa uno de los objetivos de este trabajo.

Se realiza un análisis individual del funcionamiento y tipo de tecnología de las partes de: celda de combustible de hidrógeno, panel solar y batería, seleccionando entre las diferentes tecnologías la más adecuada para nuestra aplicación.

Se simulan individualmente los principales elementos del SHP para analizar sus características. Luego es simulado el sistema completo del SHP en cuatro escenarios diferentes que cubren un abanico amplio de probabilidades de ocurrencia en funcionamiento real del SHP, el análisis de los resultados de estas simulaciones permite definir la mejor configuración y estrategia de operación (control) del SHP. La ubicación geográfica de la carga a alimentar es trascendental para el diseño del SHP, ya que de ella depende la irradiación disponible para la generación de energía con recursos naturales, uno de los sub-objetivos de la presente propuesta.

Los distintos elementos del SHP interactúan internamente mediante un controlador, el cual evalúa las condiciones climáticas y la demanda de potencia requerida por la carga en cada momento para direccionar de manera óptima el correcto flujo de energía hacia la misma.

La simulación se realizó en el Software Matlab, en el entorno de programación de Simulink haciendo uso de las librerías SimPowerSystems y Simscape, las mismas que presentan los modelados de la celda de combustible de hidrogeno, panel solar y batería, realizándose ciertos ajustes para los componentes seleccionados del mercado actual.

Finalmente, el sistema de suministro de energía propuesto fue evaluado en los diferentes escenarios de operación teniendo en consideración un flujo estable de energía hacia la carga, objetivo principal que persiguen los sistemas de energía tipo isla.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vi
ABREVIATURAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPITULO 1	1
1 GENERALIDADES	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVO	2
1.4 RESULTADOS ESPERADOS	3
CAPÍTULO 2.....	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO	5
2.2 ENERGÍA FOTOVOLTAICA	14
2.3 BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	21
2.3.1 BATERÍAS LIQUIDAS.....	25
2.3.2 BATERÍAS TIPO VRLA.....	25

2.4	SISTEMAS HÍBRIDOS DE POTENCIA	29
2.4.1	SHP CON ACOPLAMIENTO DC	30
2.4.2	SHP CON ACOPLAMIENTO AC.....	32
CAPÍTULO 3.....		35
3	ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA.....	35
3.1	UBICACIÓN.....	35
3.2	CARÁCTERÍSTICAS DE LA CARGA	36
3.3	DISEÑO DEL SHP.....	39
3.4	PRICIPALES ELEMENTOS DEL SHP	42
3.5	ESCENARIOS DE APLICACIÓN DEL SHP	48
CAPÍTULO 4.....		52
4	PARAMETRIZACIÓN DE SUBSISTEMAS EN MATLAB.....	52
4.1	CONTROLADOR.....	53
4.2	PANELES SOLARES	58
4.3	PEMFC	63
4.3.1	COMPORTAMIENTO DE LA PEMFC ALIMENTANDO CARGAS DE 150 Y 200 W	71
4.3.2	COMPORTAMIENTO DE LA PEMFC ALIMENTANDO A UNA CARGA INDUCTIVA VARIABLE	74

4.4 BANCO DE BATERÍAS	84
CAPÍTULO 5.....	86
5 SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SHP	86
5.1 ESCENARIO 1.....	87
5.2 ESCENARIO 2.....	94
5.3 ESCENARIO 3.....	102
5.4 ESCENARIO 4.....	107
5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SHP	116
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
ANEXOS.....	122
ANEXO A: Hoja de Datos - Panel Solar.....	122
ANEXO B: Hoja de Datos - Estación Meteorológica	124
ANEXO C: Cálculo del Número de Paneles Solares	126
ANEXO D: Cálculo del banco de baterías	131
ANEXO F: Hoja de datos - PEMFC	134
BIBLIOGRAFÍA.....	135

ABREVIATURAS

AC	Alternating Current (Corriente Alterna)
AFC	Alkaline Fuel Cell (Celda de Combustible Alcalina)
AGM	Absorbed Glass Mat (Vidrio Absorbente)
CHP	Combined heat and power
DC	Direct Current (Corriente Directa)
e.g.	Del latín <i>exempli gratia</i> (por ejemplo)
FC	Fuel cell (Celda de combustible)
H ₂	Hidrógeno
i.e.	Del latín <i>id est</i> (esto es, es decir)
lpm	Liters per minute
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (Celda de Combustible de Carbonato Fundido)
PEMFC	Proton Exchange Membrane fuel cell
PAFC	Phosphoric acid Fuel Cell (Celda de Combustible de Ácido Fosforico)
PV	Photovoltaics (Fotovoltaico)
SHP	Sistema híbrido de potencia
slpm	Standard liters per minute (Litros por minutos estandar)
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (Celda de Combustible de Oxido Sólido)

VRLA Valve Regulated Lead Acid Battery (Batería de Plomo Acido con Válvula Regulada)

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Funcionamiento básico de una celda de combustible	7
Figura 2.2 Componentes básicos de una celda de combustible	13
Figura 2.3 Celda de combustible de una membrana de intercambio de protones	14
Figura 2.4 Estructura básica de una celda solar	16
Figura 2.5 Composición Panel Solar.....	18
Figura 2.6 Composición de una Celda de múltiples Junturas	19
Figura 2.7 Dispositivo Multijuntura	20
Figura 2.8 Tipos de baterías según su capacidad por volumen y peso	23
Figura 2.9 Batería de Gel.....	27
Figura 2.10 Baterías Hoppecke OPzS	28
Figura 2.11 Diagrama de bloques de un SHP con acoplamiento DC	31
Figura 2.12 Diagrama de bloques de un SHP con acoplamiento AC.....	34
Figura 3.1 Sensores Típicos de una estación meteorológica	37
Figura 3.2 Estructura en bloques del sistema híbrido de potencia.....	40
Figura 3.3 Panel Solar	44
Figura 3.4 Batería AGM	45
Figura 3.5 PEMFC de 200W	46
Figura 3.6 Bombona de Hidrógeno	47
Figura 4.1 Esquema de la Lógica del Controlador	55
Figura 4.2 Diagrama interno del Controlador en Matlab	56

Figura 4.3 Curva P-V del panel solar CHSM6612P Series	60
Figura 4.4 Curva Característica de la PEMFC Horizon H-200 Fuel	63
Figura 4.5 Simulación de la PEMFC con una carga de 200[W]	65
Figura 4.6 (a) Curva característica V-I y (b) Curva característica P-I de la PEMFC	70
Figura 4.7 PEMFC con carga inductiva variable	76
Figura 4.8 Torque aplicado al motor	77
Figura 4.9 Respuesta de la PEMFC ante una carga variable	79
Figura 4.10 Señales generadas por la PEMFC.....	81
Figura 4.11 Señales de la Carga	83
Figura 4.12 Característica de descarga de la batería	85
Figura 5.1 Escenario 1: Irradiación aplicada a los paneles solares (KW-h/m ²)	88
Figura 5.2 Señales eléctricas en la carga	90
Figura 5.3 Disparos en las compuertas de los Interruptores.....	91
Figura 5.4 Evolución Temporal de las señales eléctricas en los principales elementos del sistema	93
Figura 5.5 Escenario Completo: Irradiación aplicada a los paneles solares (KW-h/m ²)	95
Figura 5.6 Disparos en las compuertas de los Interruptores.....	96
Figura 5.7 Señales eléctricas en la carga Voltaje, Corriente y Potencia	98
Figura 5.8 Señales eléctricas en los principales elementos del sistema.....	101

Figura 5.9 Señales eléctricas en la carga	103
Figura 5.10 Disparos en las compuertas de los Interruptores.....	104
Figura 5.11 Señales eléctricas en los principales elementos del sistema...	106
Figura 5.12 Diagrama de Conexiones con carga variable	108
Figura 5.13 Señal de irradiación que incide sobre los Paneles Fotovoltaicos	109
Figura 5.14 Curva de torque aplicada al motor DC.....	110
Figura 5.15 Señales de disparo de los interruptores.....	111
Figura 5.16 Señales de voltaje y corriente para los distintos elementos.....	113
Figura 5.17 Señales en la carga	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos para diferentes tipos de celdas de combustibles [1]	9
Tabla 2.2 Cuadro para resumir las aplicaciones y principales ventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible, y en diferentes aplicaciones [1] .	10
Tabla 3.1 Cuantificación de paneles y baterías del SHP	41
Tabla 4.1 Características de la Celda	61
Tabla 4.2 Dependencia de la temperatura en el panel solar.....	62
Tabla 4.3 Parámetros configurados en la PEMFC.....	66
Tabla 4.4 Parámetros configurados en el regulador de flujo.....	69
Tabla 4.5 Comparación entre parámetros de la PEMFC	72
Tabla 4.6 Parámetros configurados en las baterías.....	84
Tabla 5.1 Costo de los elementos.....	117

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la humanidad se ha valido del uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica, los cuales han tenido como consecuencia un impacto negativo en el medio ambiente además de repercutir directamente en la salud del ser humano. Como su nombre lo indica, al ser estas fuentes de energía no renovables el acceso a las mismas es cada vez más complejo, lo que obliga a explotar depósitos que son cada vez más inasequibles, lo que se ve reflejado directamente en el precio de los combustibles.

En este contexto, es necesario buscar otras fuentes de energía, en especial energías renovables y limpias. Tal es el caso de la energía solar que a través de paneles solares fotovoltaicos se la aprovecha para convertirla en electricidad sin consecuencias directas para el medio ambiente y el ser humano. Sin embargo, esta energía solo se la puede adquirir en presencia del sol, debido a ello surge la necesidad de almacenarla en periodos de exceso de producción fotovoltaica para posteriormente usarla, ello implica el uso de baterías, las cuales son los elementos más críticos en un sistema fotovoltaico debido al desgaste que sufren durante su operación y al uso de elementos

químicos que en caso de tener contacto con el exterior pueden ser muy contaminantes. Por otro lado, un sistema fotovoltaico-baterías presenta limitaciones en el suministro de energía, al ser las baterías el único respaldo en caso de que los paneles fotovoltaicos no puedan suplir con la energía suficiente para la carga. En estos casos se hace necesario buscar nuevas alternativas para mejorar el sistema de suministro de energía basado en Paneles Fotovoltaicos-Baterías.

Es en esta búsqueda se encuentra al hidrogeno como una fuente energética ideal, el hidrogeno es el elemento más abundante de la naturaleza, puede ser extraído por la electrolisis del agua y productos hidrogenados (residuos orgánicos), el hidrogeno es reutilizado en combinación con el oxígeno en un proceso electroquímico mediante una celda de combustible de cuya reacción electroquímica se obtiene electricidad como producto, calor y agua como subproducto, lo que representa un ciclo cerrado que no tiene ninguna repercusión en la naturaleza y medio ambiente.

La unión de un sistema fotovoltaico con las celdas de combustible es lo que se conoce como un Sistema Híbrido de Potencia (SHP) y una de sus posibles

aplicaciones es la alimentación de sistemas tipo isla, que no cuentan con acceso directo a la red eléctrica.

En el presente trabajo, se propone un SHP conformado por: una celda de combustible de hidrogeno, panel solar fotovoltaico y batería como solución para el suministro de energía a un sistema de transmisión de datos de baja potencia que no está conectado a la red.

CAPITULO 1

1 GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El ahorro de energía y la eficiencia de los procesos son de vital importancia en la realización de proyectos, en zonas remotas donde el acceso es difícil y por ende el abastecimiento de energía eléctrica también, el uso de los recursos naturales para generar electricidad es una gran opción. Existen diferentes tipos de generación de energía eléctrica alternativa, como: la fotovoltaica, eólica y solar, entre otros. El uso de estas formas alternativas de generación de energía eléctrica está muchas veces limitados por las condiciones climáticas de la zona y por el elevado costo de la tecnología a utilizar. Es por ello, la necesidad de realizar estudios y análisis, en los cuales se tomen en consideraciones

todas o la mayor parte de las variables para realizar simulaciones y proyecciones que nos conduzcan a encontrar el sistema híbrido de suministro de energía adecuado y óptimo en función de la aplicación y el costo de implementación del mismo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El levantamiento de información y los estudios adecuados para conocer el alcance de los paneles fotovoltaicos (PV) y de las celdas de combustible de hidrógeno (FC) que permitan determinar las ventajas y desventajas de la implementación de estos sistemas de generación de energía en un sistema integrado de generación es la principal motivación, además del actual interés de cambiar la forma de generar electricidad a nuevas técnicas que sea más amigables con el medio ambiente, más eficientes y por ende rentables.

1.3 OBJETIVO

GENERAL

Investigar y verificar mediante simulación las diferentes configuraciones y estrategias que permitan determinar la mejor solución híbrida para el suministro de energía a una pequeña estación tipo isla de transmisión de datos mediante la elaboración de un informe técnico-económico con el fin de determinar la viabilidad del mismo.

ESPECÍFICOS

- Investigar características, comportamientos y costos de los diferentes equipos que intervienen en la generación eléctrica a partir de los paneles fotovoltaicos disponibles en el mercado.
- Diseñar y dimensionar el sistema híbrido de potencia: PV, FC y Batería.
- Diseñar las estrategias del controlador que cumpla con las condiciones establecidas para el correcto funcionamiento del SHP en el suministro estable de energía a la carga.

1.4 RESULTADOS ESPERADOS

Informe económico - técnico del sistema de suministro de energía híbrido.

Informe de detalle para la adquisición de los dispositivos necesarios.

Curvas características simuladas de los elementos del SHP similares a la realidad, es decir, que las curvas resultado de las curvas simulaciones se asemejen a la de los fabricantes.

Diseño funcional y sencillo del sistema híbrido de potencia aislado de la red, en el cual la potencia eléctrica entregada a la carga sea estable sin importar las condiciones climáticas y en las que se encuentren los

diferentes elementos durante el tiempo establecido de operación del mismo.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO

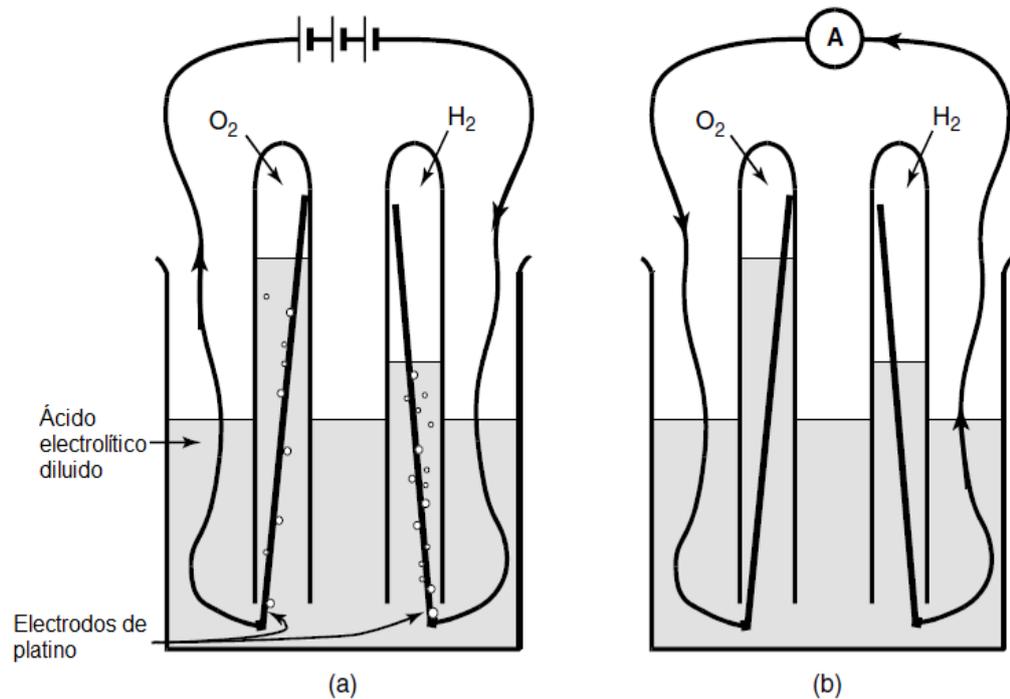
Una celda de combustible puede ser definida como un dispositivo electroquímico que convierte de manera directa la energía química almacenada en el combustible (generalmente hidrógeno) en electricidad, más calor potencialmente útil como sistema de cogeneración.

La principal ventaja de la celda de combustible sobre la batería es que la celda de combustible continúa produciendo electricidad mientras sea alimentada con combustible. Comparada con un motor de combustión

interna, la celda de combustible tiene una mayor eficiencia debido al hecho que la celda de combustible no tiene partes giratorias y convierte directamente el combustible en electricidad.

La operación básica de una celda de combustible de hidrógeno es extremadamente simple. En la Figura 2.1a el agua es electrolizada en hidrógeno y oxígeno por el paso de una corriente eléctrica en la misma, en este caso la celda trabaja como electrolizador.

En la Figura 2.1b la fuente de poder ha sido reemplazada con un amperímetro, y una pequeña corriente fluye por este. En este caso, la electrólisis está siendo revertida – el hidrógeno y el oxígeno son recombinados, y una corriente eléctrica es producida. La celda de combustible trabaja como generador. [1]



Note que las flechas representan el flujo negativo de electrones de - a +.

Figura 2.1 Funcionamiento básico de una celda de combustible

Hay diferentes tipos de celdas de combustible, la Tabla 2.1 proporciona características generales de los tipos de celdas de combustibles que existen.

Tipo de Celda de Combustible	Ion móvil	Temperatura de operación	Notas y aplicaciones
Alcalina – AFC Alkaline – AFC	OH^-	50 – 200 °C	Usada en vehículos espaciales, e.g.

			Transbordador Apolo.
Membrana de intercambio de protones Proton exchange membrane (PEM)	H ⁺	50 - 100 °C	Especialmente apropiado para vehículos y aplicaciones móviles, pero también para sistemas de baja potencia CHP.
Ácido fosfórico Phosphoric acid PAFC	H ⁺	~ 220 °C	Usada en un gran número en sistemas de 200 kW CHP.
Carbonato fundido Molten carbonate MCFC	CO ₃ ²⁻	~650 °C	Apropiada para mediana y gran escala de sistemas CHP, hasta capacidades de MW.

Ácido sólido Solid oxide SOFC	O ²⁻	50 – 1000 °C	Apropiada para todas las escalas de sistemas CHP, 2 kW a varios MW.
--	-----------------	--------------	---

Tabla 2.1 Datos para diferentes tipos de celdas de combustibles [1]

La Tabla 2.2 resume las aplicaciones y principales ventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible, y en diferentes aplicaciones. El alto costo de las celdas de combustible es considerado su principal desventaja, el mismo que se espera se reduzca con su producción en masa.

Aplicaciones	Equipos electrónicos portátiles			Carros, barcos y CHP domésticos		Generación de energía, CHP, y también buses		
Potencia en vatios	1	10	100	1k	10k	100k	1M	10M
Ventajas	Mayor densidad de			Potencial para cero		Alta eficiencia, menos contaminación.		

	energía que las baterías. Recarga rápida	emisiones, alta eficiencia	
Rango de aplicación de			
las diferentes tipos de celdas			
de			
combustibles			

Tabla 2.2 Cuadro para resumir las aplicaciones y principales ventajas de los diferentes tipos de celdas de combustible, y en diferentes aplicaciones [1]

Al analizar las Tablas 2.1 y 2.2 se establece que la celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) por sus siglas en inglés es el tipo de celda de combustible adecuada para nuestra aplicación por las siguientes razones: temperatura de operación relativamente baja comparada con otras celdas de combustible; potencialmente no contaminante, prácticamente cero emisiones de CO₂; alta eficiencia y porque las notas de aplicación describen a este tipo de celda de combustible como la indicada para un SHP, además de ser un

tipo de celda de combustible adecuada para la demanda que se desea cubrir.

La PEMFC, también llamada “celda de combustible de polímero sólido” fue desarrollada por General Electric en USA en 1960.

El electrolito es un polímero conductor de ion de H^+ o protón. El electrolito de polímero trabaja a bajas temperaturas, lo que trae ventajas en el tiempo de arranque o estabilización frente a las otras pilas.

En el proceso interno de la PEMFC, el hidrógeno entra en el lado del ánodo y en presencia del catalizador (platino) se descompone para generar protones H^+ y electrones e^- , ecuación (2.1). Los electrones son forzados a viajar a través de un circuito externo (generando corriente eléctrica) para producir trabajo útil, mientras los protones son conducidos por la membrana al lado del cátodo. En el lado del cátodo el oxígeno se recombina con los electrones y protones en presencia del catalizador para formar agua y calor como subproducto de la reacción electroquímica, ecuación (2.3)

La PEMFC tiene las siguientes reacciones electroquímicas:

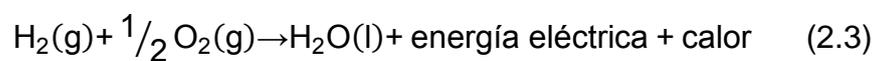
Ánodo:



Cátodo:



En general:



Las Figuras 2.2 y 2.3 muestran los componentes básicos de una celda de combustible (ánodo, electrolito y cátodo), los compuestos químicos necesarios para la operación de la misma (hidrógeno y oxígeno tomado

del aire), el flujo de los electrones a través de la carga y los elementos resultantes de la reacción electroquímica (agua y calor).

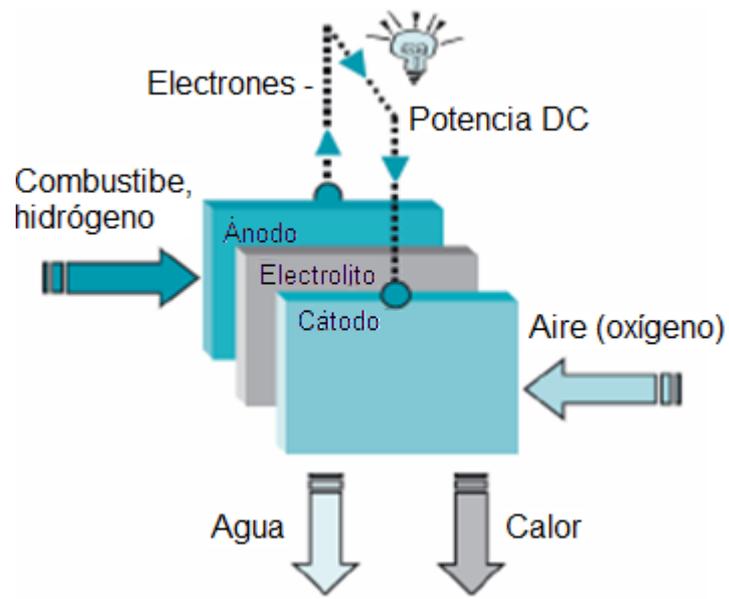


Figura 2.2 Componentes básicos de una celda de combustible

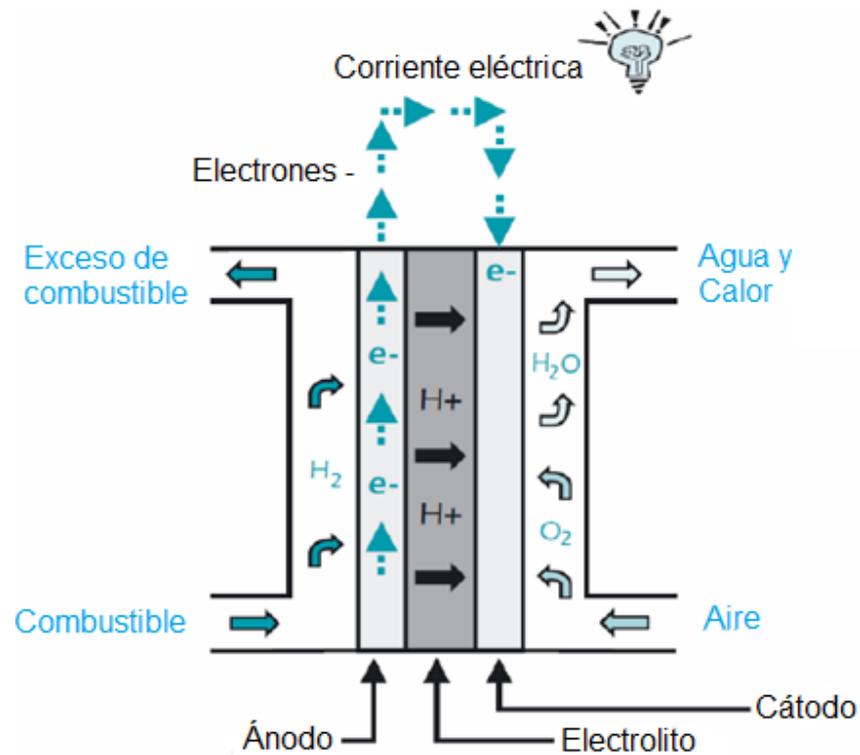


Figura 2.3 Celda de combustible de una membrana de intercambio de protones

2.2 ENERGÍA FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es la conversión directa de la luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales exhiben una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico la cual causa que ellos absorban fotones de luz y liberen electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, una corriente eléctrica resulta, la cual puede ser usada como electricidad.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por primera vez por el físico francés, Edmund Bequerel, en 1839, quién encontró que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando eran expuestos a la luz.

En 1905, Albert Einstein describió la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico, en el cual la tecnología fotovoltaica está basada. El primer módulo fotovoltaico fue construido por los Laboratorios Bell en 1954.

En la década de 1960, la industria espacial realizó el primer uso serio de la tecnología para proveer potencia eléctrica a una nave espacial. A través de los programas espaciales, la tecnología avanzó, su fiabilidad fue establecida, y su costo comenzó a disminuir.

Durante la crisis de energía en la década de 1970, la tecnología fotovoltaica ganó reconocimiento como una fuente de potencia para aplicaciones en espacio reducido.

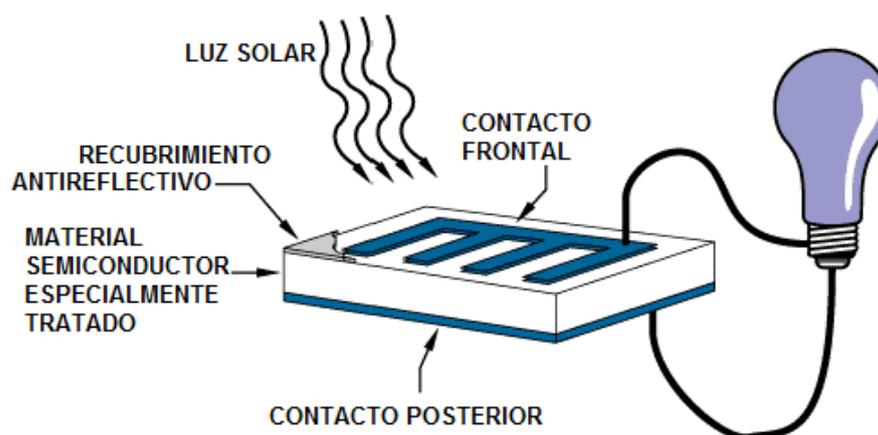


Figura 2.4 Estructura básica de una celda solar

La Figura 2.4 muestra la operación de una celda fotovoltaica básica, también llamada celda solar. Las celdas solares son hechas de materiales semiconductores, como el silicón, usado en la industria de la microelectrónica.

Para las celdas solares, una oblea semiconductor delgada es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo de un

lado y negativo del otro. Cuando la energía luminosa golpea la celda solar, los electrones son golpeados y sacados del material semiconductor. Si conductores eléctricos son colocados a los lados positivos y negativos, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de corriente eléctrica. Esta electricidad puede ser usada para alimentar una carga eléctrica.

Un grupo de celdas solares eléctricamente conectadas entre sí y montadas en una estructura es lo que se conoce como módulo fotovoltaico, PV (Figura 2.5). Los módulos son diseñados para suplir electricidad a un cierto voltaje, e.g. 12 voltios. La corriente producida depende proporcionalmente de cuanta luz impacte el módulo.

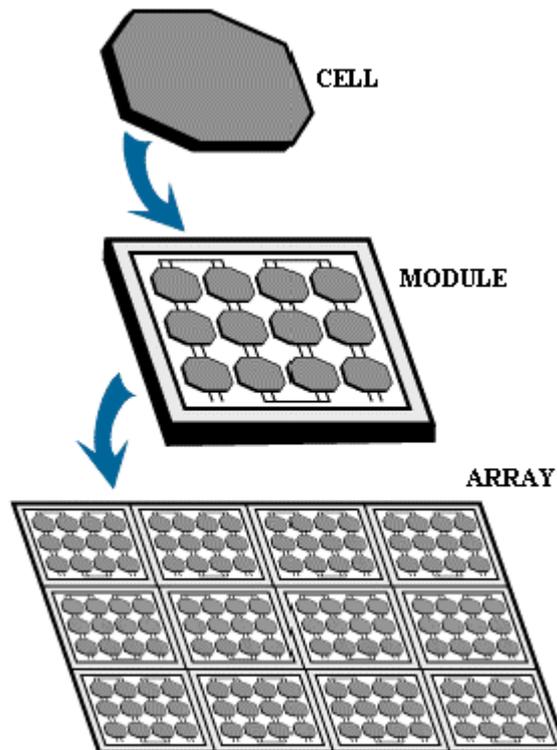


Figura 2.5 Composición Panel Solar

Múltiples módulos pueden ser interconectados para formar un arreglo. En general, mientras más grande es el área del módulo o el arreglo, mayor electricidad será producida. Los PV y los arreglos, los mismos pueden ser conectados en serie y/o paralelo para producir el voltaje y la corriente requeridos en una aplicación determinada. Una característica de los sistemas fotovoltaicos es que producen corriente directa.

Hoy en día los PV más comunes usan una juntura simple, para crear el campo eléctrico dentro del semiconductor. En una juntura simple, solo los fotones que posean una energía igual o mayor que el band gap (el band gap de un semiconductor es la energía mínima necesaria para excitar un electrón que se encuentra en un estado de reposo y llevarlo a un estado de libertad, donde éste pueda participar en la conducción) del material de la celda pueden liberar un electrón para un circuito eléctrico. En otras palabras, la respuesta fotovoltaica de una celda de juntura simple está limitada a la porción del espectro del sol que posea energía arriba del band gap del material absorbente, y los fotones de menor energía no son usados.

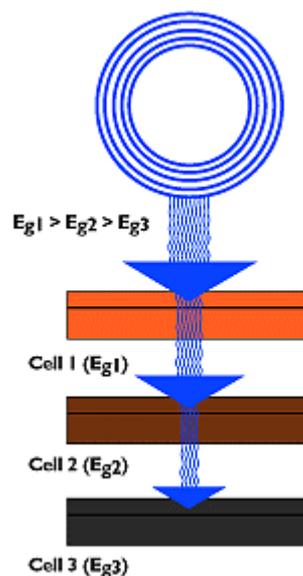


Figura 2.6 Composición de una Celda de múltiples Junturas

Una opción para superar esta limitación es usar dos o más celdas diferentes, con más de un band gap y más de una juntura, para generar un voltaje. Estas son llamadas celdas de múltiple juntura (también llamadas cascadas o celdas tandem).

Dispositivos multijunturas pueden alcanzar una alta eficiencia debido a que pueden generar electricidad en un espectro de luz más amplio. Como se muestra en la Figura 2.6, un dispositivo multijuntura es una pila de celdas de juntura simple en orden descendente de band gap (E_g). Las celdas superiores capturan los fotones de alta energía y pasa el resto de fotones para ser absorbidos por las celdas de menor band gap.

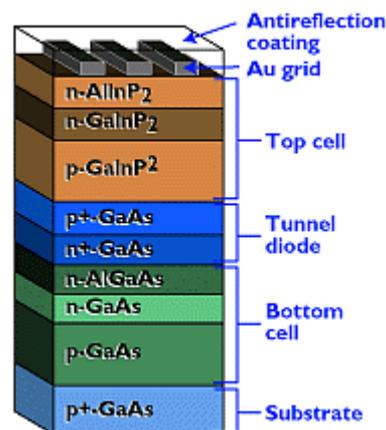


Figura 2.7 Dispositivo Multijuntura

Muchos de los estudios hoy en día se centran en las celdas multijunturas de galio arsénico como uno de los componentes de las celdas. Estas celdas han alcanzado eficiencias al rededor del 35% bajo concentraciones de luz solar. Otros materiales estudiados para los dispositivos multijunturas han sido el silicio amorfo y diseleniuro cobre indio.

Como ejemplo el dispositivo multifunción de la Figura 2.7 usa en la parte superior, una celda de fosfato indio, mientras una juntura de túnel ayuda al flujo de electrones a circular a través de las celdas hasta llegar a la celda del fondo compuesta de galio-Arsenio. [2]

2.3 BATERÍAS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

La disponibilidad de luz para producir la electricidad a través de los paneles fotovoltaicos no está siempre disponible, debido a factores atmosféricos. Balancear la energía entre la producción y el uso es imprescindible. Aunque hay muchas formas de almacenar la energía, las más usadas son baterías a base de plomo i.e. acumuladores. Otros tipos de baterías, son las de ion de litio i.e. Li-Ion que están en desarrollo y

lentamente penetran el mercado tamaños que pueden sustituir a las baterías de plomo.

El banco de baterías puede ser considerado el punto más crítico de los sistemas tipo isla i.e., sistemas que no son conectados a la red eléctrica. El banco de baterías representa un porcentaje alto de la inversión económica de un sistema PV (Anexo A) pero tienen frecuentemente la vida útil más corta de toda la instalación.

Las baterías funcionan bien durante el inicio de su vida útil, las diferencias se muestran en su expectativa de vida. Hay baterías que pueden durar más de veinte años y otros, bajo las mismas condiciones, duran menos de dos. Esto depende del tipo de batería que se seleccione, la aplicación en la cual va a ser utilizada e incluso el impacto al medio ambiente y la salud.

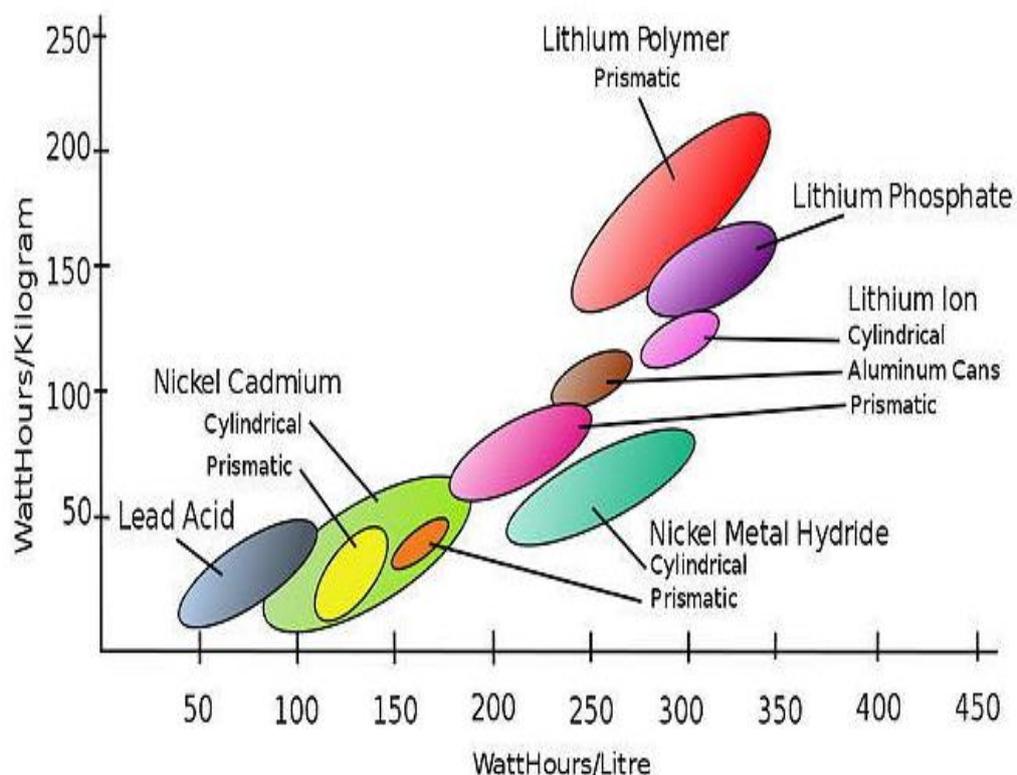


Figura 2.8 Tipos de baterías según su capacidad por volumen y peso

La Figura 2.8 muestra los distintos tipos de baterías, comparando la capacidad y masa (eje de las ordenadas) con respecto a su volumen (eje de las abscisas). Las baterías de ion de litio e.g. como las usadas en celulares y computadoras son superiores al resto. Pero son costosas y no están diseñadas para aplicaciones donde son sometidas a descargas profundas, como es el caso de los SHP.

Mientras que, para aplicaciones en sistemas fotovoltaicos y eólicos se usa en su gran mayoría baterías de plomo; por la buena relación existente de precio con respecto a la energía disponible en la batería. Este tipo de batería fue inventado en 1859 por el francés Gastón Planté.

La mayoría de las baterías de plomo usadas en sistemas solares y eólicos se parecen a los que se usan en autos y camiones, pero son optimizadas para una aplicación diferente. Es importante que en los carros exista la disponibilidad de mucha energía durante un tiempo muy corto, principalmente para arrancar el motor. Este alto flujo de amperes necesarios se logra con capas de plomo delgadas.

Por el contrario, en sistemas solares y eólicos las baterías tienen que suplir energía durante un tiempo considerablemente más largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías de ciclo profundo tienen capas de plomo más gruesas que brindan la ventaja significativa de prolongar su vida.

Son relativamente grandes y pesadas por el plomo. Están compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios.

Existen dos tipos de baterías de plomo usados ampliamente para aplicaciones solares:

2.3.1 BATERÍAS LIQUIDAS

Son las más antiguas y su simple producción permiten precios favorables. Su principal ventaja aparte del precio es su versatilidad con las sobrecargas. La desventaja es la pérdida de ácido, por ende un control del nivel del agua es necesario. Su vida útil es aproximadamente 400 ciclos de carga y descarga. La ventilación es muy importante para estos tipos de batería y temperaturas bajo cero pueden destruirlas rápidamente.

2.3.2 BATERÍAS TIPO VRLA

VRLA del inglés: Valve Regulated Lead Acid battery. Estas baterías modernas no son completamente selladas, pero contienen una tecnología que permite recombinar el oxígeno e hidrógeno que

expulsado de las placas durante la carga y así eliminar la pérdida de agua mientras no sean sobrecargadas. Las baterías funcionan en cualquiera posición. Existen dos tipos principales: de consistencia de Gel y los AGM, donde el ácido es fijado en fibra de vidrio (AGM - absorbed glass mat).

2.3.2.1 BATERÍAS DE GEL

El ácido tiene consistencia de gel. Su gran ventaja radica en la inexistencia de un líquido que se puede perder, son cerradas y funcionan en cualquier posición. La corrosión es reducida, son más resistentes a bajas temperaturas. La vida útil es mucho mayor que las baterías líquidas, son más resistentes a descargas profundas. Una desventaja es la resistencia interna más alta con respecto a los otros tipos de baterías citados previamente, lo que reduce el flujo máximo de corriente. El proceso de carga de estas baterías es más meticuloso, su precio es mayor en relación a los otros tipos. Estas baterías como la de la Figura 2.9 se usan frecuentemente en la industria y telecomunicaciones.



Figura 2.9 Batería de Gel

2.3.2.2 BATERÍAS TIPO AGM

Estas baterías fueron desarrolladas inicialmente para la aviación, mediante la fijación del ácido en fibras de vidrio. Cada vez son más comunes en sistemas solares y eólicos. Su ventaja adicional a las de las baterías de gel es una alta resistencia a los climas fríos. Su auto descarga a través del tiempo es mínima y tiene la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo i.e. hasta un 95%. Tienen una baja resistencia interna, lo que le permite operar con corrientes altas. Las principales desventaja son un precio elevado y una vulnerabilidad mayor ante descargas profundas.

Existen baterías líquidas aptas para aplicaciones solares y eólicas de una excelente calidad, con una vida útil prolongada que son usadas frecuentemente en operaciones de carga y descarga. Un ejemplo son las tubulares de Hoppecke OPzS que pueden alcanzar una vida útil de hasta 25 años, la misma se la presenta en la Figura 2.10.



Figura 2.10 Baterías Hoppecke OPzS

Para sistemas de poca exigencia que disponen de un protocolo para asegurar los cuidados necesarios de la batería, una batería líquida puede ser la mejor opción sobre todo considerando el precio. [3]

En el diseño del SHP se usará una batería tipo AGM especialmente diseñadas para aplicaciones fotovoltaicas y a un precio no tan elevado como los son las de ion-litio.

2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS DE POTENCIA

En general, un SHP puede definirse como la combinación de múltiples generadores de energía y dispositivos de almacenamiento de energía, los cuales son conectados entre sí y controlados de manera óptima para suplir una cierta demanda de energía.

Un punto importante a considerar antes de diseñar un SHP, es investigar la disponibilidad de las fuentes de energía renovables en la localización geográfica específica donde será implementado, además de comprender la demanda de potencia que será necesario abastecer.

Después de definir los componentes del SHP en función de los recursos renovables disponibles y la carga a alimentar, el siguiente paso es definir como conectarlos para obtener la mejor configuración. Los componentes

del SHP pueden ser conectados entre sí en dos configuraciones típicas: acoplamiento DC o acoplamiento AC. [4]

2.4.1 SHP CON ACOPLAMIENTO DC

Un SHP acoplado en corriente directa (DC) es un sistema cuyos componentes (almacenamiento de energía y dispositivos generadores de energía) están conectados a un bus DC. Las salidas de todas las fuentes en corriente alterna (AC) y DC son convertidas a un determinado valor DC y conectadas al bus DC principal. Si se tienen cargas AC que no se puedan convertir para trabajar en DC, en este caso se usara un inversor para obtener los niveles de tensión y frecuencia que demande la carga como se muestra en la siguiente Figura 2.11.

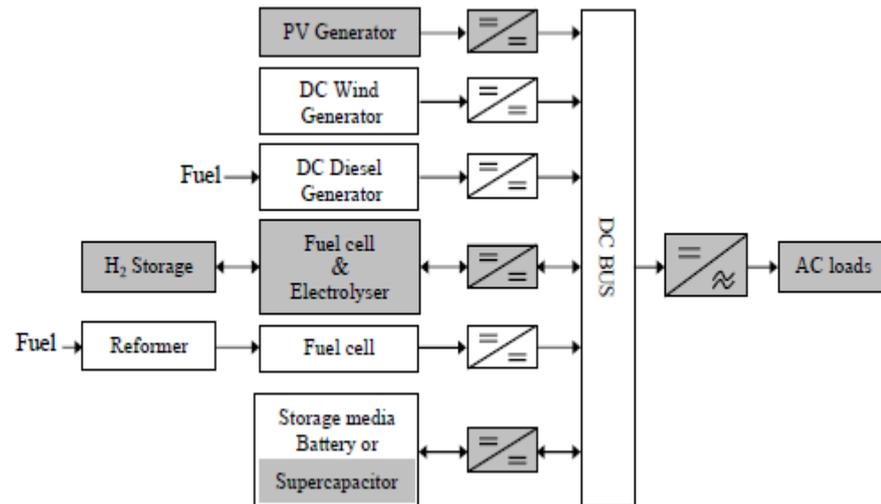


Figura 2.11 Diagrama de bloques de un SHP con acoplamiento DC

Cada uno de los generadores está conectado al bus DC a través de un convertidor DC/DC unidireccional. Mientras que los dispositivos de almacenamiento, están conectados a través de convertidores DC/DC bidireccionales, para permitir la carga y descarga de los mismos (Figura 2.11).

La ventaja de esta topología es su facilidad y simplicidad de implementación, además de suplir energía estable, incluso durante el proceso de carga de las baterías. [4]

La baja eficiencia global, debido a las pérdidas de Joule en sistemas DC, las cuales son mayores que en sistemas AC, y la limitada capacidad del inversor DC/AC, que es un cuello de botella para la expansión futura del sistema, son las principales desventajas de esta topología.

Esta es la topología que se usara para el SHP por todas las ventajas que se describieron anteriormente, además la carga a conectar es DC lo que omite la parte del inversor que era el causante de la principal desventaja de esta topología. Finalmente la distancia entre los equipos que conforman el SHP es mínima lo que vuelve a las pérdidas de Joule despreciables.

2.4.2 SHP CON ACOPLAMIENTO AC

Un SHP acoplado en AC. Figura 2.12, es un sistema cuyos componentes (almacenamiento de energía y dispositivos generadores de energía) están conectados a un bus AC.

Las salidas de los dispositivos son directamente invertidas a voltaje AC por medio de un inversor DC/AC y luego son conectadas al bus AC. Como cada inversor está diseñado y dimensionado específicamente para su generador, la eficiencia y el desarrollo global del SHP con un acoplamiento AC, es mejor que un acoplamiento DC.

Otra ventaja de esta configuración, es que cada generador puede alimentar a la carga independientemente de otro generador. Lo que dota al sistema de mayor flexibilidad frente a cambios en la demanda de la carga.

La facilidad para expandir y modificar el sistema, con la finalidad de suplir cargas que exijan una mayor demanda, es una de las fortalezas de esta topología.

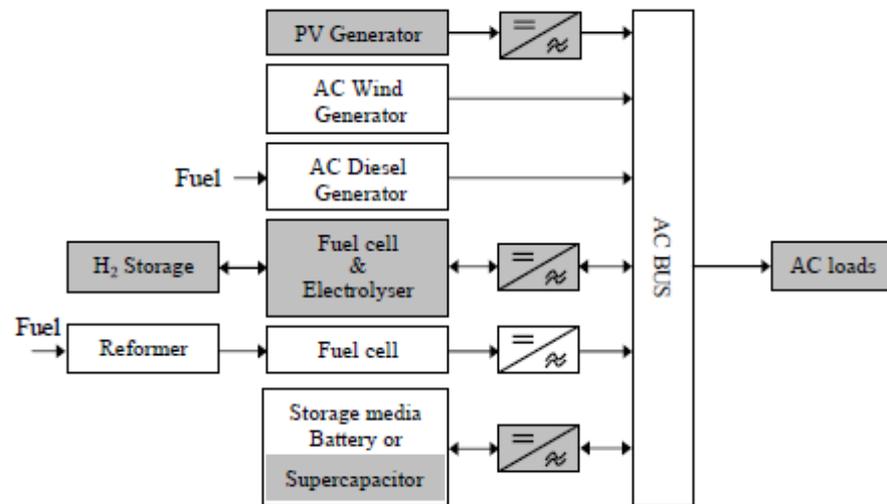


Figura 2.12 Diagrama de bloques de un SHP con acoplamiento AC

La principal desventaja de un acoplamiento AC es su complejo sistema de control, el mismo que es necesario para mantener una óptima sincronización entre los componentes generadores de energía del sistema. [5]

CAPÍTULO 3

3 ESPECIFICACIÓN DEL SISTEMA

3.1 UBICACIÓN

El SHP a implementar se encuentra ubicado en la Región Costa, zona climática lluviosa y tropical dentro de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas a 655 metros sobre el nivel del mar a una latitud y longitud aproximada de 0°15'S y 79°9'W. [6]

Esta ubicación fue seleccionada debido a que esta provincia cuenta con una de las ciudades más pobladas del país, además de ser un punto de enlace entre Quito, Guayaquil, Portoviejo, Chone, Esmeraldas, Manta, Ambato y Quevedo, lo que le convierte en un puerto terrestre de

intercambio comercial entre sierra y costa. Por ello, surge la necesidad de conocer el estado de los diversos factores climáticos presentes en la zona.

La Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas ubicada a 655 metros sobre el nivel del mar a una latitud de $0^{\circ}15'S$ y una longitud de $79^{\circ}9'W$ presenta una radiación solar promedio de 5200 Wh/m^2 por día y como mínima de 2150 Wh/m^2 . Los datos de irradiación solar se tomaron del atlas solar del Ecuador para dimensionar los paneles solares. [7]

3.2 CARÁCTERÍSTICAS DE LA CARGA

La carga a alimentar corresponde a una estación meteorológica, cuya demanda es $150W$ como máximo. Los principales sensores que se conectan a la estación meteorológica son:

- Termómetros, para la medición de la temperatura ambiente y del suelo.
- Higrómetros, para la medición de la humedad relativa del ambiente y del suelo.
- Barómetro, mide la presión atmosférica.
- Anemómetro, mide la velocidad del viento.

- Veleta, determina la dirección del viento.
- Pirómetro, mide la radiación solar.
- Pluviómetro, empleado para calcular las precipitaciones que caen en un cierto lugar durante una determinada cantidad de tiempo.
- Evaporímetro, mide la evaporación potencial, es decir, la cantidad de agua por unidad de área y de tiempo que se evapora a través de una pequeña superficie puesta al aire libre.

Algunos de estos sensores se muestran en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Sensores Típicos de una estación meteorológica

Estos dispositivos se encuentran siempre conectados, por ende tienen un consumo constante de energía, lo cual se traduce en una carga fija

sin picos de demandas para el sistema. La transmisión de la información recopilada por los sensores de la estación meteorológica, no representa un aumento significativo en la demanda de la carga por lo que el SHP está en la capacidad de tolerar estos transientes.

Debido a que los elementos conectados a la estación meteorológica consumen solo corriente directa, se puede encontrar el consumo de corriente total sin la necesidad de cálculos complejos, así tenemos:

$$P_{DC} = V \times I \quad (3.1)$$

$$I = \frac{P_{DC}}{V} \quad (3.2)$$

$$I = \frac{150}{48} = 3.125[A] \quad (3.3)$$

Donde:

P_{DC} : Potencia que consume la carga. [W]

V : Tensión en el bus DC. [V]

I : Corriente que circula a través de la carga. [A]

El sistema táctico de observación meteorológica MAWS201M ilustra una estación meteorológica, con características similares a las descritas en

esta sección. La hoja de especificaciones del fabricante de la MAWS201M se encuentra en el Anexo B.

3.3 DISEÑO DEL SHP

El suministro de energía a la estación meteorológica (aplicación estacionaria tipo isla para transmisión de datos) se basa en un sistema híbrido de energía de baja potencia, compuesto por: paneles solares, banco de baterías y celda de combustible de hidrogeno.

El sistema tiene un acoplamiento DC a 48 V, debido a la naturaleza de la carga eléctrica. Además de esto el sistema fue diseñado para tener una autonomía de dos días sin energía solar, en la cual la carga estará alimentada solo por el banco de baterías, esto quiere decir que la celda de combustible proporcionara energía a la estación meteorológica en caso de que las baterías se encuentren descargas, lo que daría una autonomía máxima al sistema de 100 horas.

La estructura en bloques del sistema híbrido de potencia, considerando la carga a alimentar se muestra en la Figura 3.2.

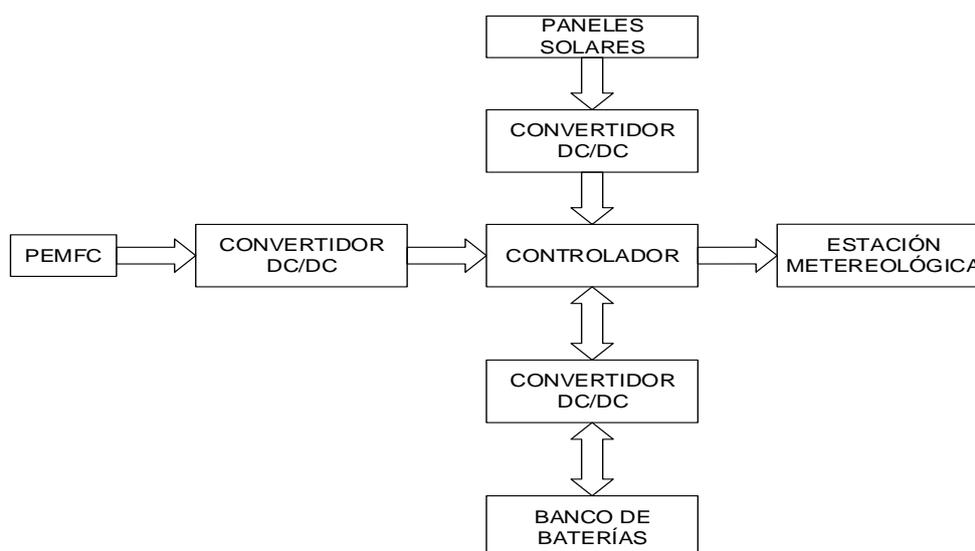


Figura 3.2 Estructura en bloques del sistema híbrido de potencia

Los convertidores DC-DC usados en el SHP propuesto estabilizan la tensión en el bus DC donde va conectada la estación meteorológica. Los elementos generadores de energía que conforman el SHP varían la tensión en sus bornes de salida debido a las siguientes razones: el voltaje generado en los paneles solares es directamente proporcional a la radiación que incide en estos; la tensión en el banco de baterías es directamente proporcional a la densidad de carga de las mismas y finalmente, la pila PEMFC presenta un voltaje generado que depende del

flujo de corriente suministrado a la carga y del hidrogeno que ingresa hacia la pila.

El controlador mantiene el flujo constante de energía hacia la carga dentro de las 100 horas de autonomía del sistema.

Definida la ubicación en la cual se va a instalar el equipo y las condiciones de operación del mismo, se procede a realizar el cálculo correspondiente para determinar el número de paneles y baterías que necesita la estación meteorológica para operar de manera estable bajo las condiciones previamente establecidas. Dichos cálculos se encuentran detallados en la sección de Anexos: el cálculo del número de paneles fotovoltaicos y dimensionamiento del banco de baterías, Anexo A y B respectivamente. Sin embargo, la Tabla 3.1 muestra la cantidad de paneles y baterías usados en el SHP.

Elemento	Modelo	Cantidad
Panel Solar	Astroenergy CHSM6612P	7
Batería	Lifeline GPL-8DA	4

Tabla 3.1 Cuantificación de paneles y baterías del SHP

El comportamiento del SHP se analiza mediante simulación en cuatro escenarios diferentes de aplicación. En tres de los cuales se mantendrá el perfil de carga eléctrica fija, pero la irradiación a la cual estará expuesto el sistema fotovoltaico variará. En el cuarto escenario se simula una carga variable representada por un motor DC, al cual se le aplicará una curva de carga para generar cambios en la potencia consumida y, además la irradiación que afecta a los paneles solares también será variable. La inclusión de un motor DC como carga se analiza detalladamente en la Sección 4.3.3.

3.4 PRICIPALES ELEMENTOS DEL SHP

Los principales elementos que componen el SHP son:

- Paneles solares: Paneles solares: proveerán la energía principal o primaria para alimentar la carga y además de cargar al banco de baterías. Ya que estos son los principales suministradores de energía eléctrica dentro del SHP.

La generación fotovoltaica es muy sensible a los cambios climáticos, necesita de un cielo despejado e incluso tener el ángulo adecuado para aprovechar al máximo el área de incidencia de los

rayos solares, en este caso el ángulo de inclinación con respecto al suelo es $0^{\circ}15'$, esto se debe a la cercanía de la ubicación con la línea equinoccial. La temperatura también afecta el rendimiento del panel fotovoltaico.

La irradiación y la temperatura son variables que son modificadas en la simulación con la finalidad de analizar la respuesta general del sistema fotovoltaico. El exceso de energía generada por los paneles solares es almacenado en un banco de baterías.

Para el dimensionamiento del número de paneles solares se tomó en consideración módulos fotovoltaicos de 310W modelo CHSM6612P [8]. Se escogieron estos paneles debido a su mayor potencia con respecto a otros módulos consultados, lo cual influye directamente en el número de unidades a utilizarse en la simulación. La Figura 3.3 muestra un panel solar propuesto para ser usado en el SHP.



Figura 3.3 Panel Solar

- El banco de baterías entregará energía eléctrica a la carga cuando los paneles solares no puedan proveer la energía suficiente debido a la ausencia de luz solar según las condiciones climáticas.

El banco de batería utilizado en la simulación es de 48 Voltios con una capacidad de 253 Ah, se seleccionó 4 baterías Lifeline 12V 255 AH Deep Cycle Sealed AGM Battery GPL-8DA como se muestra en la Figura 3.4 [9] . Este modelo de baterías se eligió por ser la de mayor capacidad A-h con el fin de reducir el número de baterías en el banco y en la implementación.



Figura 3.4 Batería AGM

- La celda de combustible de hidrogeno abastecerá de energía a la estación meteorológica en el escenario en el cual las baterías se encuentren descargadas y no exista otra fuente de energía renovable i.e. energía fotovoltaica.

Las celdas de combustible de hidrogeno son relativamente costosas y necesitan hidrógeno puro o altas concentraciones del mismo para poder operar. La celda de combustible seleccionada para la implementación es de marca Horizon H-200 Fuel Cell Stack [10] de 200W, Figura 3.5, la misma que abastecerá de energía a la estación meteorológica en circunstancia de bajo nivel de carga del banco de baterías y ausencia de irradiación solar.



Figura 3.5 PEMFC de 200W

- Para el suministro de combustible (hidrógeno) a la PEMFC se dispone de dos bombonas a presión, con volumen de 900 L cada una (Anexo G), lo que equivale a un suministro de hidrógeno por un tiempo de 11 horas y 32 minutos mínimos, tomando en consideración que la pila de combustible consume $2.6 \text{ L}/\text{min}$ a potencia nominal (200W).

Se seleccionó esta bombona debido a la elevada capacidad de almacenamiento que posee comparada con otras además del reducido espacio que ocupa.



Figura 3.6 Bombona de Hidrógeno

- El sistema de control, permitirá un correcto flujo de energía hacia la carga, además de gestionar el proceso de carga del banco de baterías cuando sea necesario.

La unidad de control será la encargada de censar, monitorear y controlar la interacción entre los dispositivos del SHP para alimentar a la carga.

El diseño del controlador para la simulación está basado en interruptores actuados de manera automática. Las conmutaciones de estos interruptores originan perturbaciones en la tensión del bus DC que alimentación a la carga. Para una implementación real, se debe considerar en el diseño del controlador, sustituir los interruptores por dispositivos más eficientes de conmutación, como por ejemplo: relés de estado sólido o dispositivos semiconductores.

En nuestra investigación se utilizó un controlador MorningStar de la serie TriStar MPPT 60 - 48 V. [11]. Este tipo de controlador está especialmente diseñado para aplicación con paneles fotovoltaicos y cumple con las características del sistema de voltaje y corriente. Este equipo es solo como referencia, porque el controlador será simulado como se estableció previamente en esta sección.

3.5 ESCENARIOS DE APLICACIÓN DEL SHP

Para nuestro estudio se consideraron varios escenarios posibles, con la finalidad de apreciar la interacción de todos los elementos que componen

el sistema (PEMFC, paneles solares, banco de baterías, controlador y estación meteorológica). Para esto se estableció un tiempo de simulación de 100 horas, durante el cual la curva de irradiación se modifica para adaptar el SHP a los distintos escenarios, cuatro en total.

Los cuatro escenarios recrearan todas las condiciones eventuales posibles en las cuales el SHP funcionará, como se describe a continuación:

- **Escenario 1:** la curva de irradiación que reciben los paneles fotovoltaicos es modelada de tal forma que se dispone de la irradiación necesaria para que la carga sea solo alimentada por los paneles durante el día y las baterías por las noches respectivamente dentro de las 100 horas totales de análisis.

- **Escenario 2:** la curva de irradiación que reciben los paneles es modelada de tal forma que se pueda apreciar la carga y descarga de las baterías, para esto se deja sin irradiación a los paneles por varias horas hasta que las baterías se descarguen y

posteriormente se recarguen con la entrada de los paneles al incrementar los valores de irradiación.

- **Escenario 3:** la curva de irradiación que reciben los paneles es modelada de tal forma que los únicos elementos que suplan energía a la carga sea la PEMFC y el banco de baterías durante el máximo tiempo que pueden soportar trabajando de modo aislado y sin la entrada de los paneles fotovoltaicos para de este modo determinar el tiempo máximo de trabajo en el que puede operar el sistema sin energía solar.

- **Escenario 4:** la curva de irradiación que reciben los paneles es modelada de tal forma que se pueda apreciar la entrada de todos los elementos del sistema en su respectivo momento pero con la leve diferencia de que la carga que se alimentara será variable. Para efectos de simulación se conectó un motor DC, al cual se le varía el torque y de esta manera se refleja los efectos de la variación de carga en el sistema.

Los diferentes escenarios y sus correspondientes simulaciones son analizados con más detalle en el capítulo 5.

CAPÍTULO 4

4 PARAMETRIZACIÓN DE SUBSISTEMAS EN MATLAB

Para la simulación del funcionamiento del SHP en los diferentes escenarios se usó Simulink de la versión 2014 de MatLab, esta versión dispone de las librerías especializadas para sistemas eléctricos de potencia como Simpower Systems y Simscape. Estas librerías presentan la ventaja de contar con los distintos elementos como: celda solar, celda de combustible y finalmente la batería para su simulación, configurando los parámetros de estos modelos con las características de los elementos comerciales usados en una implementación del SHP.

Un punto crítico a considerar es el diseño del controlador, el cual comandará los diferentes elementos del SHP para coordinar la entrada o salida al bus DC y alimentar a la carga, pudiendo observar el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios. La conmutación de los elementos al bus DC se realiza de acuerdo a las siguientes variables i.e. irradiación y voltaje del banco de baterías; las cuales deben cumplir con las condiciones establecidas en el controlador.

Este capítulo muestra la configuración de los principales bloques usados y su parametrización respectiva, además de la lógica de control con la cual se implementó el controlador.

4.1 CONTROLADOR

En el diseño del controlador se usan elementos de Simulink de la librería de Simpower Systems, la estructura lógica del controlador es sencilla de implementar puesto que no usa elementos usados en electrónica de potencia y además no es compleja puesto que depende de pocas variables.

La Figura 4.1 muestra la lógica usada para programar el controlador, la misma que gestiona la transferencia de energía hacia la carga que proviene de las distintas fuentes mediante interruptores simples, cuyo estado dependerá de variables como la irradiación y el voltaje del banco de baterías.

El comportamiento del controlador se describe a continuación:

El panel solar alimentará a la carga siempre y cuando la irradiación sea suficiente para satisfacer la demanda. Caso contrario el banco de baterías suplirá de energía a la estación meteorológica. La densidad de carga de las baterías disminuye proporcionalmente al tiempo que entrega energía, por ende no pueden alimentar la carga continuamente.

Si la carga en las baterías está por debajo del límite de voltaje establecido y existe suficiente energía fotovoltaica, entonces las celdas solares, además de alimentar la estación meteorológica, cargarán el banco de baterías almacenado el exceso de energía. Caso contrario la

PEMFC se conectará al bus DC para alimentar exclusivamente a la estación meteorológica.

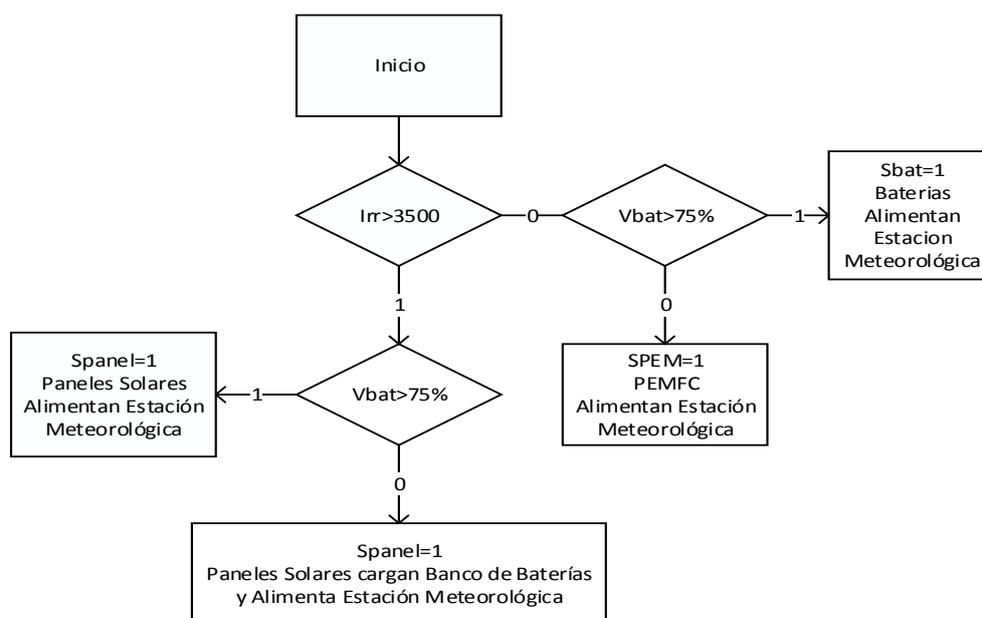


Figura 4.1 Esquema de la Lógica del Controlador

En la Figura 4.2 se observa el bloque correspondiente al controlador diseñado en Matlab con las condiciones lógicas de operación de los interruptores.

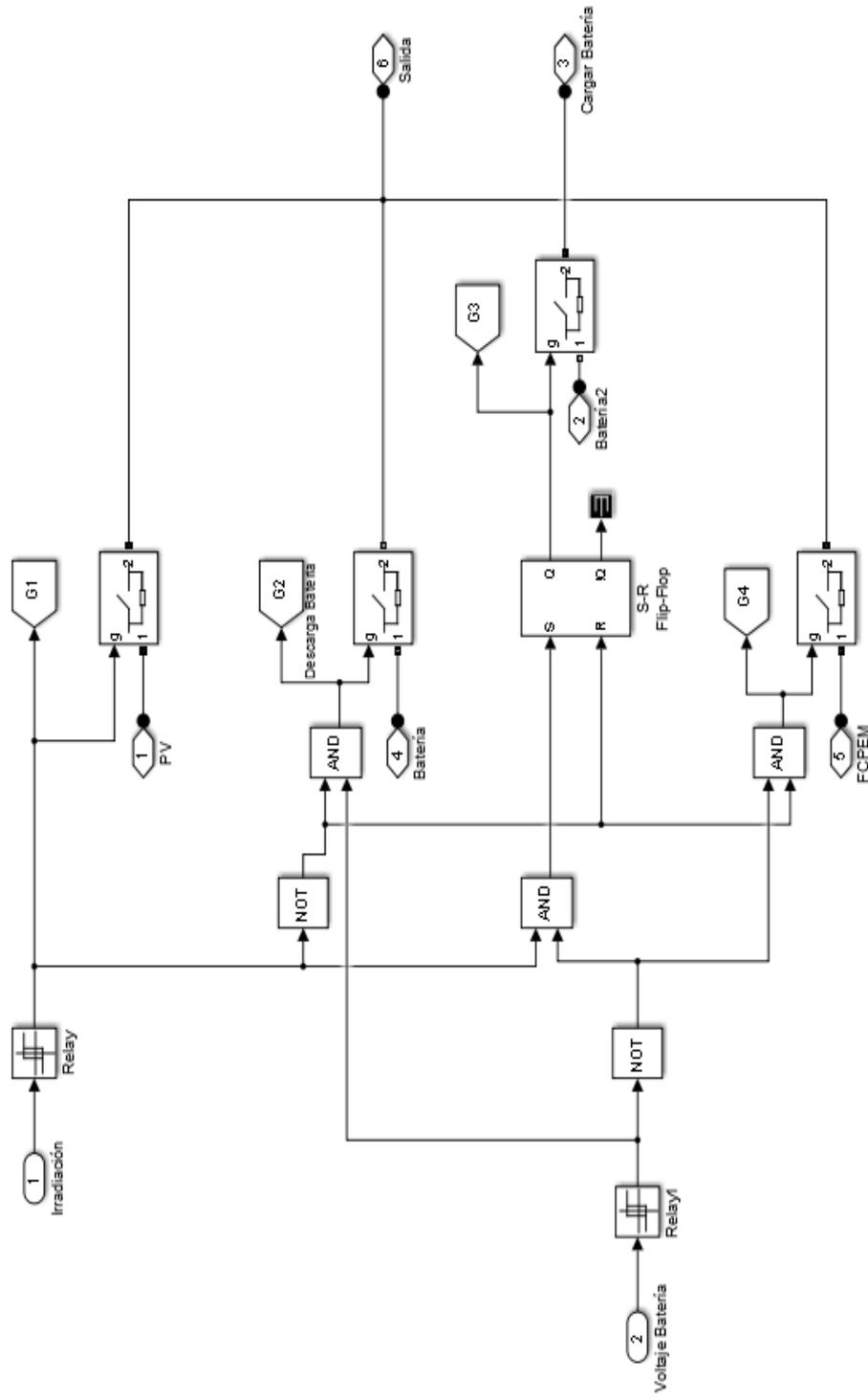


Figura 4.2 Diagrama interno del Controlador en Matlab

Los interruptores controlan el ingreso de la fuente que alimentará la carga, en el modelo se tiene tres interruptores, uno para cada fuente, es decir, uno para el panel fotovoltaico, otro para el banco de baterías y finalmente el interruptor para la PEM. Además de estos tres interruptores, se dispone de uno adicional que es el encargado de cargar el banco de baterías cuando exista una producción de energía suficiente por parte de los paneles y a su vez el nivel de carga del banco de baterías sea bajo.

Por tanto, el controlador dispone de cuatro interruptores denominados como sigue:

- Spanel: interruptor para alimentar la estación meteorológica mediante los paneles fotovoltaicos.
- Sbat: interruptor para alimentar la estación meteorológica mediante el banco de baterías.
- SPEM: interruptor para alimentar la estación meteorológica mediante la celda de combustible.
- Scarga: interruptor para cargar el banco de baterías.

El cierre o apertura de los interruptores dependerá de la irradiación y el voltaje del banco de baterías como se explicó anteriormente, estas variables se describen a continuación:

- Irr: valor de la irradiación incidente sobre los paneles solares.
- Vbat: voltaje del banco de baterías, para determinar el estado del mismo, ya sea este cargado o descargado.

Los elementos individuales se parametrizaron según las especificaciones técnicas de los fabricantes, antes de simular los elementos conjuntamente en el sistema SHP, se procedió a verificar cada modelo con las curvas establecidas en las hojas características de los mismos.

4.2 PANELES SOLARES

El panel solar con su curva característica de P-V (Potencia-Voltaje) presente en la Figura 4.3, muestran el comportamiento eléctrico del panel bajo diferentes valores de irradiación y temperatura, variables que tienen un efecto directo en la capacidad de generación de energía eléctrica del dispositivo.

Para obtener las curvas características del panel solar es necesario disponer de la información de las hojas de datos de los fabricantes, ello permite configurar los diferentes valores del modelo matemático y obtener sus correspondientes gráficas.

De las gráficas de la Figura 4.3 se puede observar el rendimiento del panel a distintos valores de irradiación y temperatura para según esto poder decidir si es el adecuado o no para nuestro sistema, en este caso no se presentaron problemas debido a la cantidad de paneles usados y el tamaño de la carga que se iba a alimentar. La selección se basó en los cálculos del dimensionamiento de paneles solares presentes en la sección de Anexos por lo que se buscaron los paneles comerciales de mayor potencia disponible para de este modo reducir la cantidad que necesitaríamos en nuestro sistema.

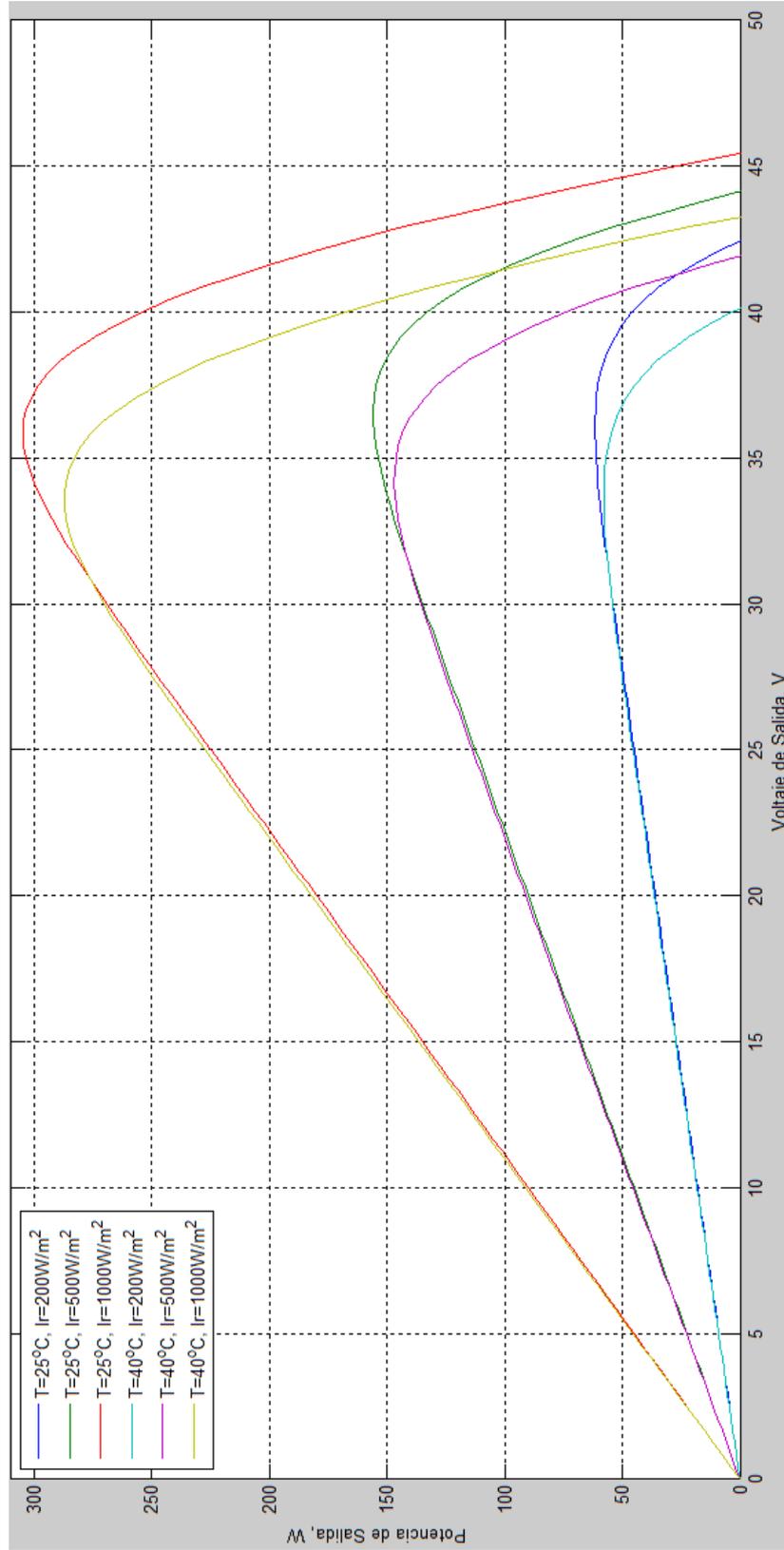


Figura 4.3 Curva P-V del panel solar CHSM6612P Series

Para la parametrización del panel fotovoltaico se utiliza el modelo de 5 parámetros, el modelo que permite configurar el panel solar usando datos básicos del fabricante y que son de fácil adquisición para configurarlos en Matlab puesto que no necesitan de algún tipo de cálculo como los demás modelos.

Característica de la Celda	Parámetros
Parametrizado por:	Modelo de 5 Parámetros
Corriente de Cortocircuito, ISC	8.99 A
Voltaje de Circuito Abierto, VOC	0.6308 V
Irradiación usada para medición, Ir0	1000 W/m ²
Factor de Calidad, N	1
Resistencia Serie, Rs	0.0068814 Ω
Numero de Celdas en Serie	72

Tabla 4.1 Características de la Celda

Los parámetros que se observan en la Tabla 4.1 como: Isc es la corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico, Voc es el cociente entre el voltaje de circuito abierto del módulo (45.42 [V]) y el número de celdas del mismo (72). Estos parámetros fueron editados con la ayuda del bloque (Home-> Help-> Solar cell model).

El número de celdas en serie que se configura en el bloque del panel solar para poder modelar el mismo se muestra en la Tabla 4.1. Este número de celdas fue tomado de la respectiva hoja del fabricante (Anexo A).

Dependencia de la Temperatura	Parámetros
TIPH1	0.000805 [1/K]
Energy Gap, EG	1.14 eV
TXIS1	3.38
TRS1	0
Temperatura Medida	25
Temperatura de Simulación	25

Tabla 4.2 Dependencia de la temperatura en el panel solar

La Tabla 4.2 muestra la dependencia de los paneles según la temperatura, esta dependencia se puede apreciar claramente en la figura 4.3 en la que se nota una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la carga máxima que puede proporcionar los paneles.

4.3 PEMFC

Nos referimos a la hoja del fabricante para obtener los datos necesarios y poder establecer los parámetros que requiere el modelo matemático. Una vez configurado los parámetros del modelo de la PEMFC en simulink, se procede a la simulación para verificar la respuesta eléctrica de la PEMFC de acuerdo al fabricante.

En la simulación se debe de considerar la carga a la cual se realizara la simulación, debido a que la eficiencia que se pueda obtener de la PEMFC varía, ya que la carga juega un papel importante.

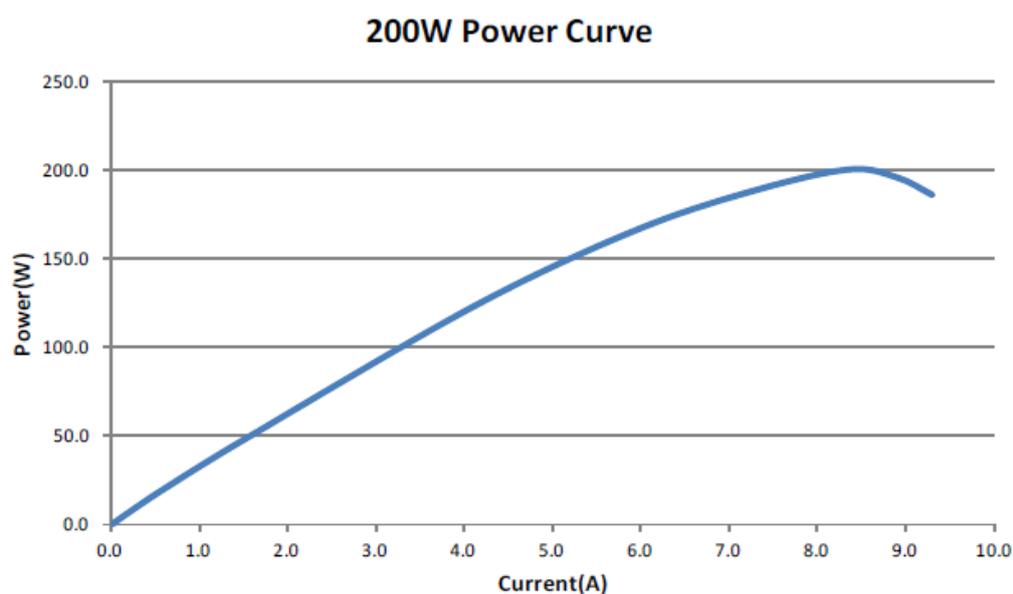


Figura 4.4 Curva Característica de la PEMFC Horizon H-200 Fuel

Según la Figura 4.4 se toman dos valores de curva para el análisis de la respuesta de la PEMFC, el primer punto corresponde cuando la PEMFC opera a potencia nominal, i.e. 200W; mientras que el segundo punto de operación corresponde con la PEMFC suministrando la potencia máxima consumida por la carga, esto es, 150 W. Con las simulaciones obtenidas en estos dos puntos de operación de la PEMFC se podrá analizar cómo afecta al comportamiento eléctrico de la PEMFC la variación de la carga.

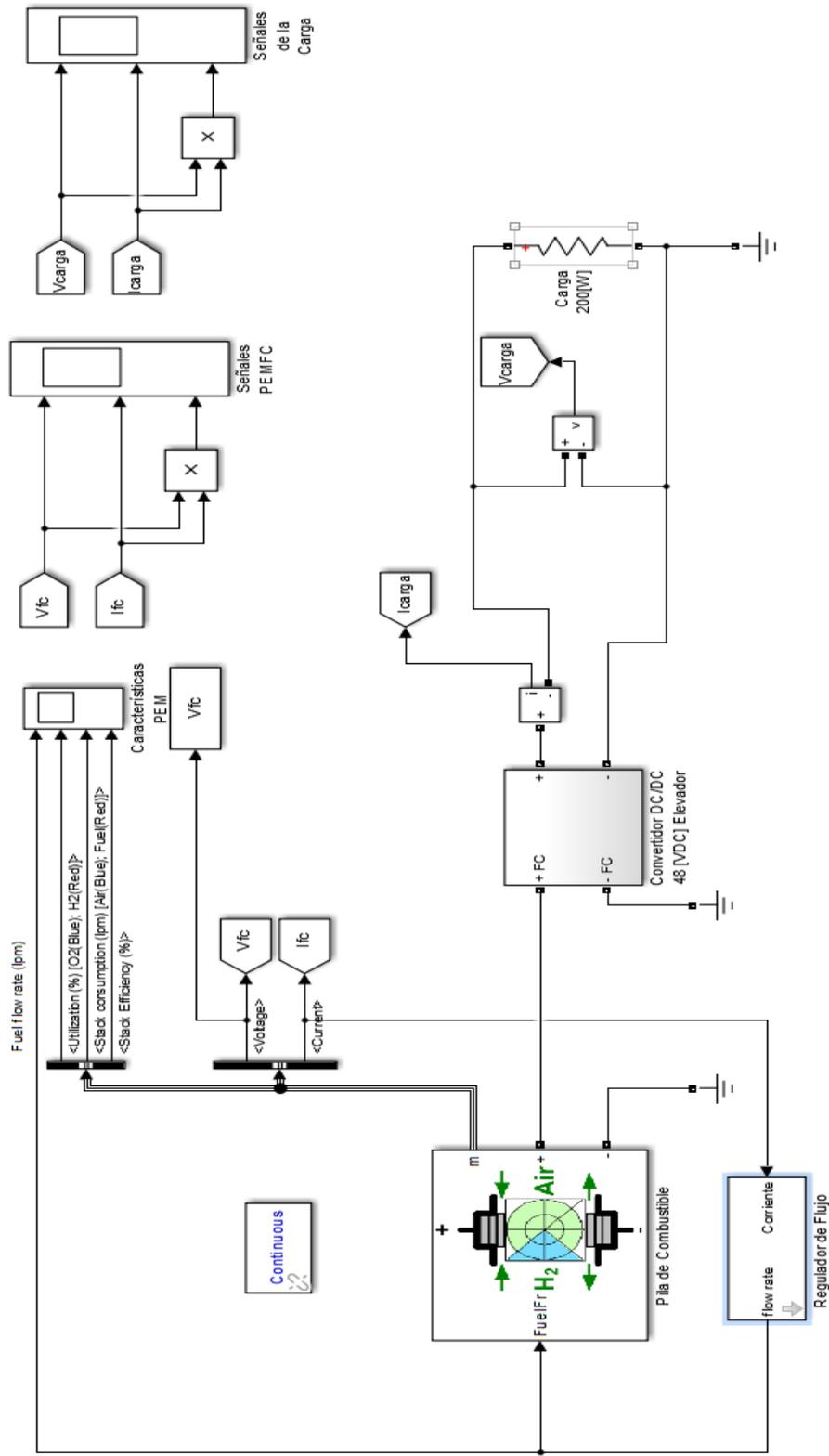


Figura 4.5 Simulación de la PEMFC con una carga de 200[W]

Los parámetros se los obtiene de la hoja de datos del fabricante (Anexo F), se usó el modelo detallado del mismo como se muestran en la Figura 4.5 y la ayuda del bloque en Matlab (Home-> Help-> Fuel Cell Stack) para realizar la configuración correcta del modelo.

PARÁMETRO	VALOR
Voltaje a 0a y 1a [$v_0(v)$, $v_1(v)$]	[38 34]
Punto nominal de operación [$I_{nom}(a)$, $V_{nom}(v)$]	[8.3 24]
Punto máximo de operación [$I_{end}(a)$, $V_{end}(v)$]	[12 20]
Número de celdas	40
Potencia nominal de la pila (%)	40
Temperatura de operación (Celsius)	55
Flujo nominal de aire (lpm)	2400
Presión de alimentación nominal [Combustible(bar), Aire(bar)]	[0.5 1]
Composición nominal (%) [H2 O2 H2O(Aire)]	[99.995 21 1]

Tabla 4.3 Parámetros configurados en la PEMFC

Los siguientes parámetros se autogeneran en una ventana llamada “Fuel Cell parameters” una vez configurados los parámetros de la Tabla 4.3:

Parámetros nominales de la celda de combustible:

Potencia de la pila:

- Nominal = 199.2W
- Máxima = 240W

Resistencia de la celda de combustible = 0.92965 ohms

Voltaje de Nerst de una celda [En] = 1.1681 V

Utilización nominal:

- Hidrógeno (H₂)= 83.55%
- Oxidante (O₂)= 66.15%

Consumo nominal:

- Combustible = 2.313 slpm
- Aire = 5.506 slpm

Corriente de intercambio [i₀] = 0.13229 A

Coefficiente de intercambio [alpha] = 0.37245

Parámetros de la señal de perturbación de la celda de combustible:

Composición del combustible [x_{H2}] = 100%

Composición del oxidante [y_{O2}] = 21%

Flujo nominal [FuelFr] a utilización nominal de Hidrógeno:

- Nominal = 6.651 lpm
- Máximo = 9.617 lpm

Flujo de aire [AirFr] a utilización nominal de oxidante:

- Nominal = 10 lpm
- Máximo = 14.46 lpm

Temperatura del sistema [T] = 328 Kelvin

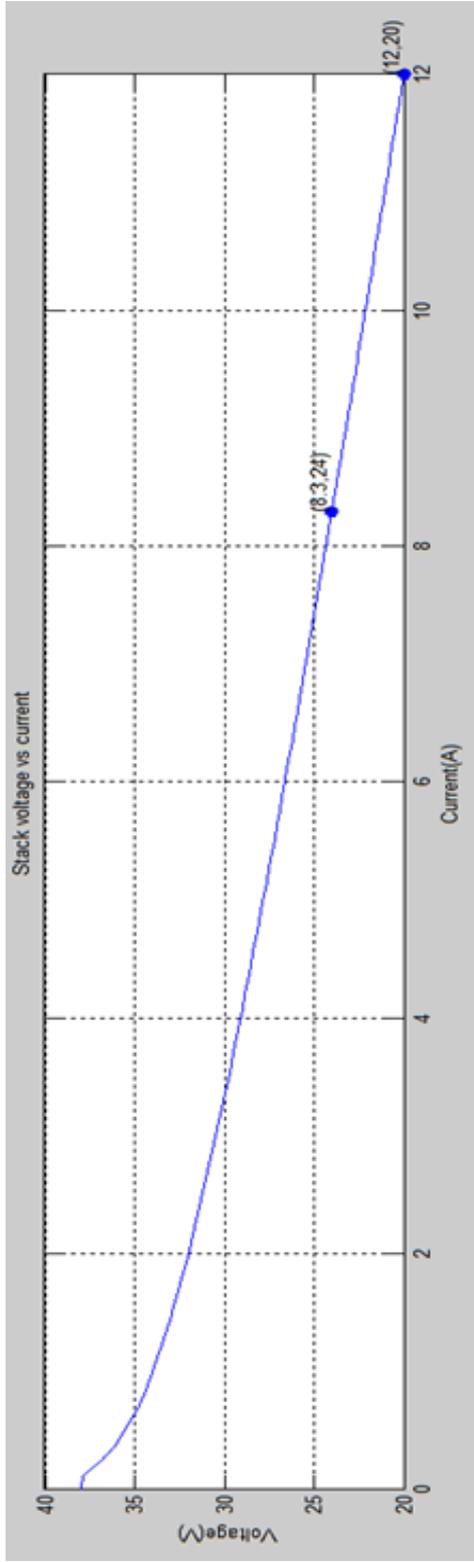
Presión de alimentación del combustible [Pfuel] = 0.5 bar

Presión de alimentación de aire [PAir] = 1 bar

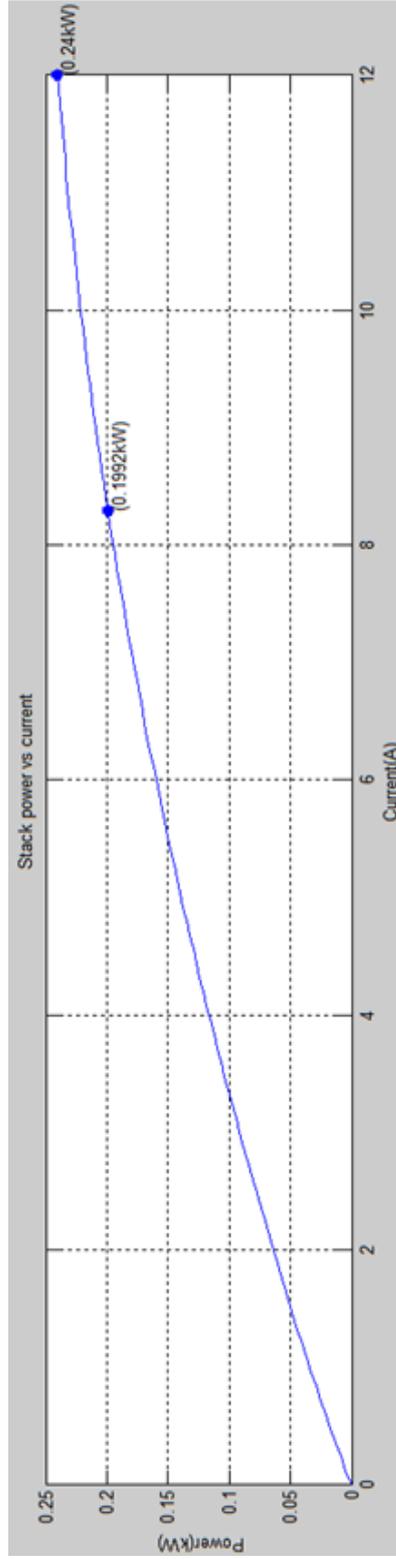
Para que la PEM genere electricidad, necesita ser alimentada con hidrógeno, la eficiencia de la PEM depende del grado de aprovechamiento del combustible (hidrógeno), por ello, el caudal de hidrógeno debe ser controlado en las proporciones adecuadas, demasiado caudal causa pérdidas innecesarias durante el proceso electroquímico, por el contrario, caudales bajos generan baja potencia lo que implica un bajo suministro de energía a la carga. Por las razones descritas se utiliza un bloque regular de flujo, cuyos parámetros configurados se encuentran en la Tabla 4.4, estos valores son proporcionados en la ventana "Fuel Cell parameters", los cuales fueron citados previamente.

PARÁMETRO	VALOR
Número de celdas	40
Utilización nominal de Hidrógeno (%)	83.55
Temperatura de operación (Celsius)	55
Presión del combustible (bar)	0.5
Composición de H2 (%)	99.995

Tabla 4.4 Parámetros configurados en el regulador de flujo



(a)



(b)

Figura 4.6 (a) Curva característica V-I y (b) Curva característica P-I de la PEMFC

En la Figura 4.6 (a) se puede observar la curva característica voltaje vs corriente de la celda de combustible, en la misma se aprecia dos puntos: el de operación nominal del equipo (8.3, 24) y el punto máximo de operación (12, 20), los datos de este último fueron obtenidos a partir de la interpolación de la curva proporcionada por la hoja de datos del fabricante (Anexo F).

La curva característica P-I de la PEMFC se muestra en la Figura 4.6 (b), existen dos puntos resaltados en la curva: el primero corresponde a la potencia que entrega la PEMFC a corriente nominal (8.3 [A]), el segunda la máxima potencia a una corriente de 12[A], éste último punto de la curva es solo ilustrativo ya que nunca se llega a trabajar con estos valores. Solo se graficó este punto extrapolando pues es importante para la parametrización de la PEMFC

4.3.1 COMPORTAMIENTO DE LA PEMFC ALIMENTANDO CARGAS DE 150 Y 200 W

La PEMFC debe alimentar a una carga de 150 W que corresponde a la potencia que consume la estación meteorológica, sin embargo la potencia nominal de diseño de la celda de combustible está establecida

para cargas de 200 W. Esto se realiza puesto que la PEMFC esta dimensionada a un valor mayor al que necesita nuestra carga y en caso de querer adicionar más equipos, esta responde de manera adecuada a la nueva demanda de potencia.

La Tabla 4.5 compara los diversos parámetros característicos de la PEMFC cuando alimenta tanto a la carga de 150W como a la de 200 W.

Parámetros		200 W	150 W
Características de la PEMFC	Flujo de combustible (L/min)	7	4.2
	Porcentaje de Utilización Oxigeno (%)	68	68
	Hidrogeno (%)	86	83
	Eficiencia (%)	40	46
Señales Eléctricas de la PEMFC	Voltaje (V)	24	26
	Corriente (A)	8.2	5.6
	Potencia (W)	200	150
Señales Eléctricas de la Carga	Voltaje (V)	48	48
	Corriente (A)	4.2	3.1
	Potencia (W)	200	150

Tabla 4.5 Comparación entre parámetros de la PEMFC

Observando la Tabla 4.5 podemos sacar varias conclusiones con respecto a la PEMFC trabajando a potencia nominal (200W) y a la potencia que consume la carga (150W). Entre estas tenemos que:

- El consumo de combustible que requiere la PEMFC es directamente proporcional a la potencia que requiera la carga lo que implica que el tiempo de operación de la PEMFC disminuye si los tanques son de la misma capacidad.
- Para cualquiera de las potencias de trabajo, el voltaje en el bus DC que alimenta a la carga permanece invariable, puesto que el convertidor DC-DC mantiene esta tensión regulada.
- Mientras menor es la carga, menor es la corriente que debe suministrar la PEMFC puesto que el voltaje permanece casi invariable.
- El aumento de la eficiencia de la pila de combustible con una carga menor se debe a que la corriente eléctrica con una intensidad más baja ocasiona menos pérdidas en la PEMFC que una corriente más elevada.

Debe recordarse que la carga a alimentar no es de 200 W y que la simulación aquí realizada de la PEM es solo para analizar las características de la misma operando a su carga nominal, lo cual difiere cuando se trabaje con el sistema completo alimentando a la carga establecida de 150 W.

4.3.2 COMPORTAMIENTO DE LA PEMFC ALIMENTANDO A UNA CARGA INDUCTIVA VARIABLE

Para simular este escenario se introdujo una carga inductiva variable, que será representada por un motor DC, cuyo torque de carga es variado como se observa en la Figura 4.7, para obtener valores de potencia que oscilen dentro del rango de operación normal de la PEM. Logrando con esto apreciar los efectos de la variación de la carga y la adición del componente inductivo para nuestro sistema híbrido de potencia.

De esta forma se aprecia claramente la capacidad del sistema híbrido de potencia de alimentar cualquier tipo de carga desde una estación meteorológica con una despreciable carga inductiva hasta un motor DC

con una fuerte incidencia debido a sus picos de arranque y su carga inductiva predominante.

En la gráfica de la Figura 4.8 observamos que el torque se mantiene prácticamente constante con pequeñas variaciones hasta aproximadamente la hora 72, hora desde la cual notamos pendientes pronunciadas tanto de forma ascendente como descendente. El efecto de estas variaciones de torque se visualiza claramente a partir de la Figura 4.9 hasta la Figura 4.11

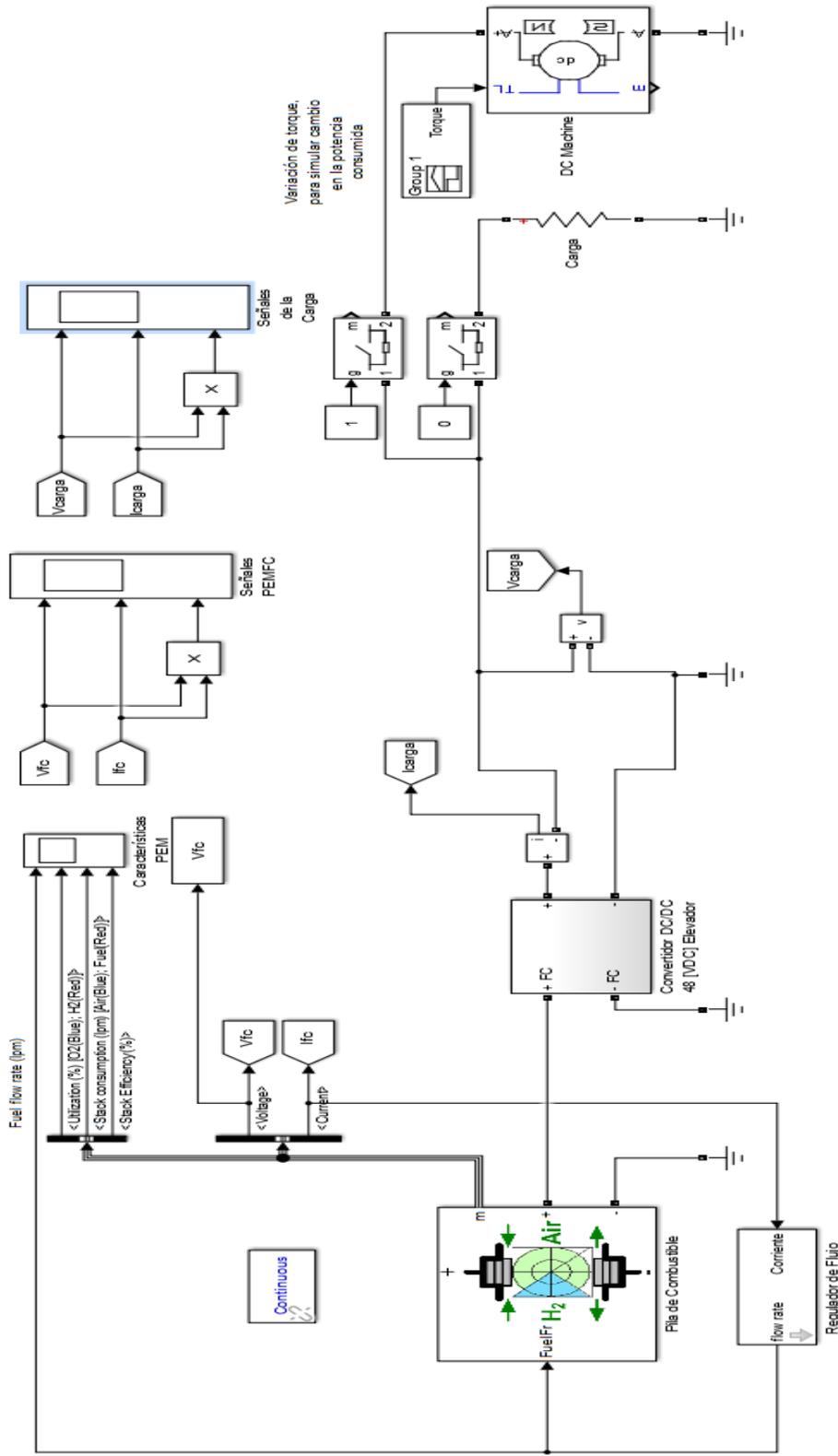


Figura 4.7 PEMFC con carga inductiva variable

Estos picos de torque en el motor y la corriente que demanda pueden interpretarse de forma análoga a la transmisión simultánea de todos los equipos en un momento al azar con lo cual se crearan incrementos significativos y muy cortos de potencia a la salida que fácilmente será soportada por el sistema.

La Figura 4.8 muestra el torque aplicado el cual se graficó de manera arbitraria solo para efectos de simulación y poder observar cómo responde el sistema frente a una carga variable. Se varió el torque hasta obtener a la salida del sistema potencias dentro del rango de acción del sistema, es decir potencias inferiores a 200 W procediendo posteriormente a modelar la curva de torque.

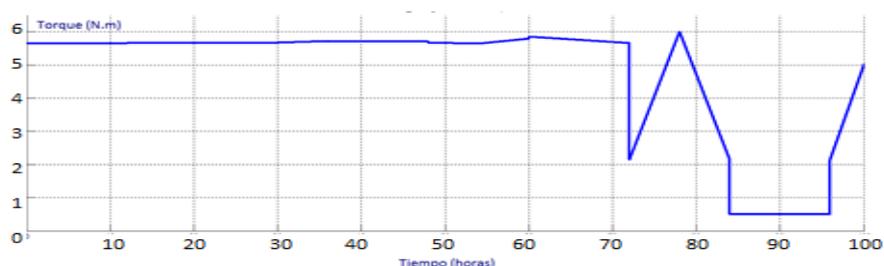
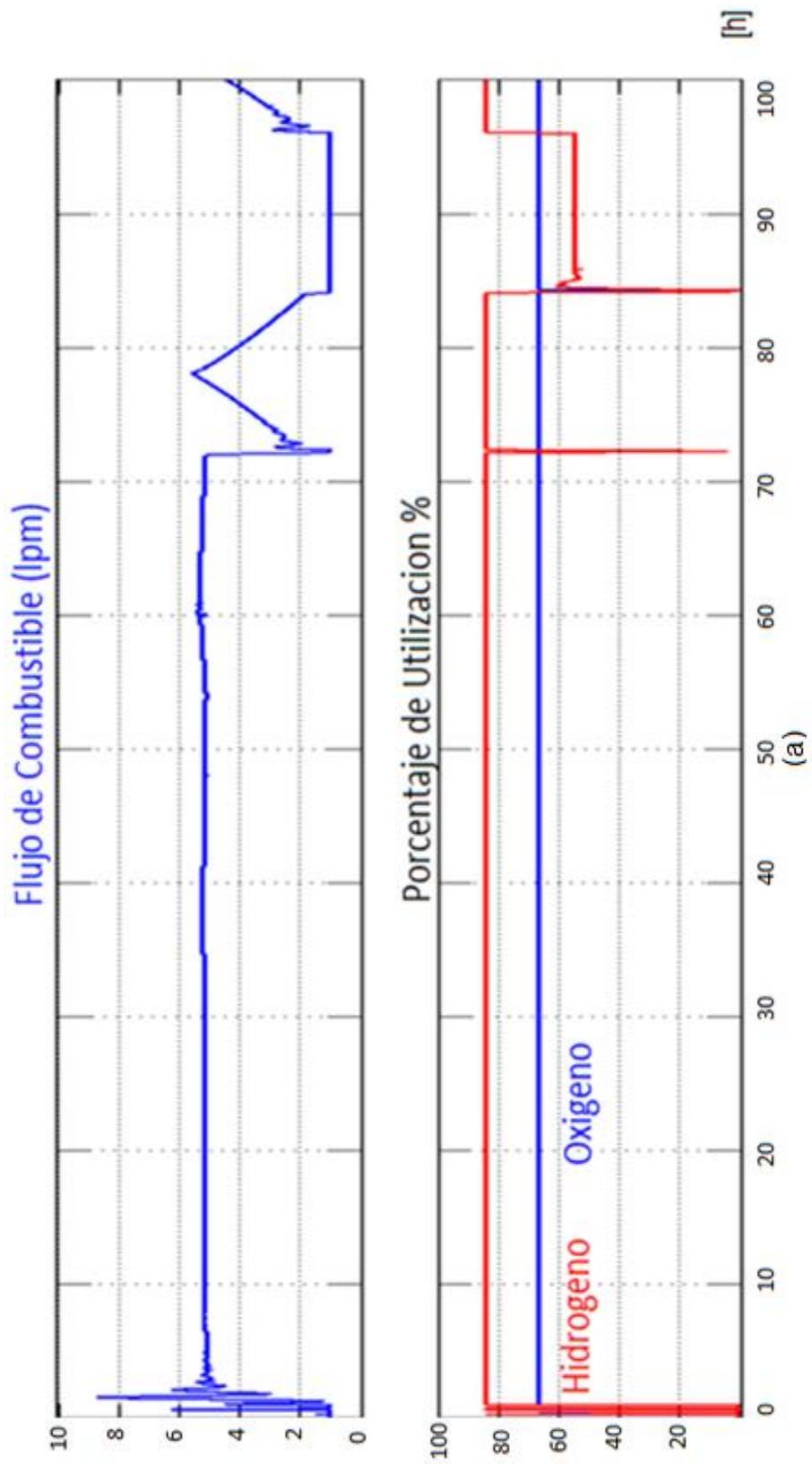


Figura 4.8 Torque aplicado al motor



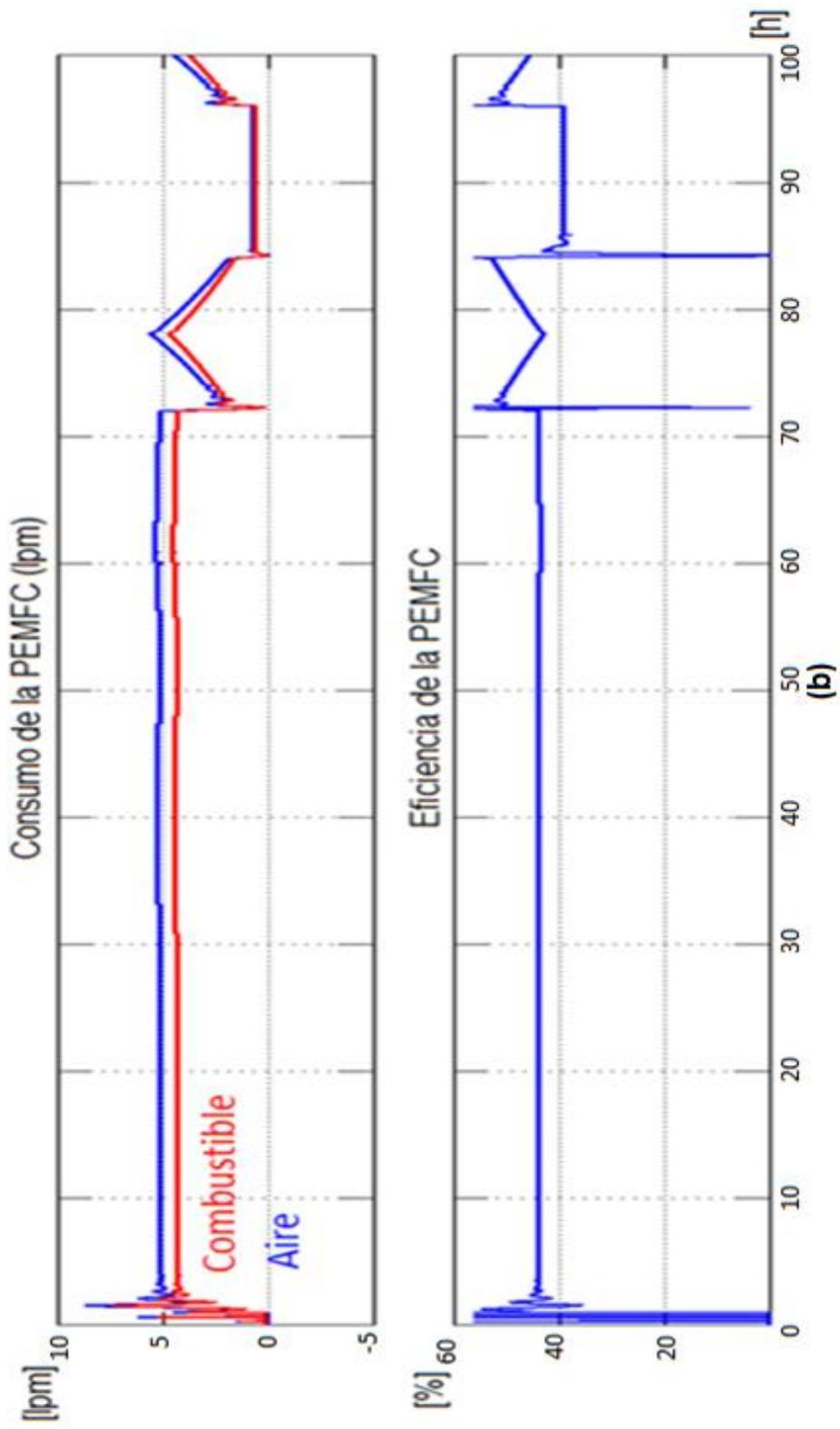


Figura 4.9 Respuesta de la PEMFC ante una carga variable

En la Figura 4.9 podemos apreciar cómo se regula el caudal de flujo a través de la PEMFC de manera directamente proporcional al torque aplicado para poder suplir la potencia necesaria a la carga. Por otro lado apreciamos claramente como la eficiencia de la PEMFC tiende a disminuir mientras se eleva el torque y por ende la potencia de la carga que debe de alimentar ya que el consumo de hidrogeno para la producción de energía eléctrica se eleva y esto hace que aumenten las perdidas debido a que parte de la energía que produce la PEMFC se convierte en calor elevando su temperatura.

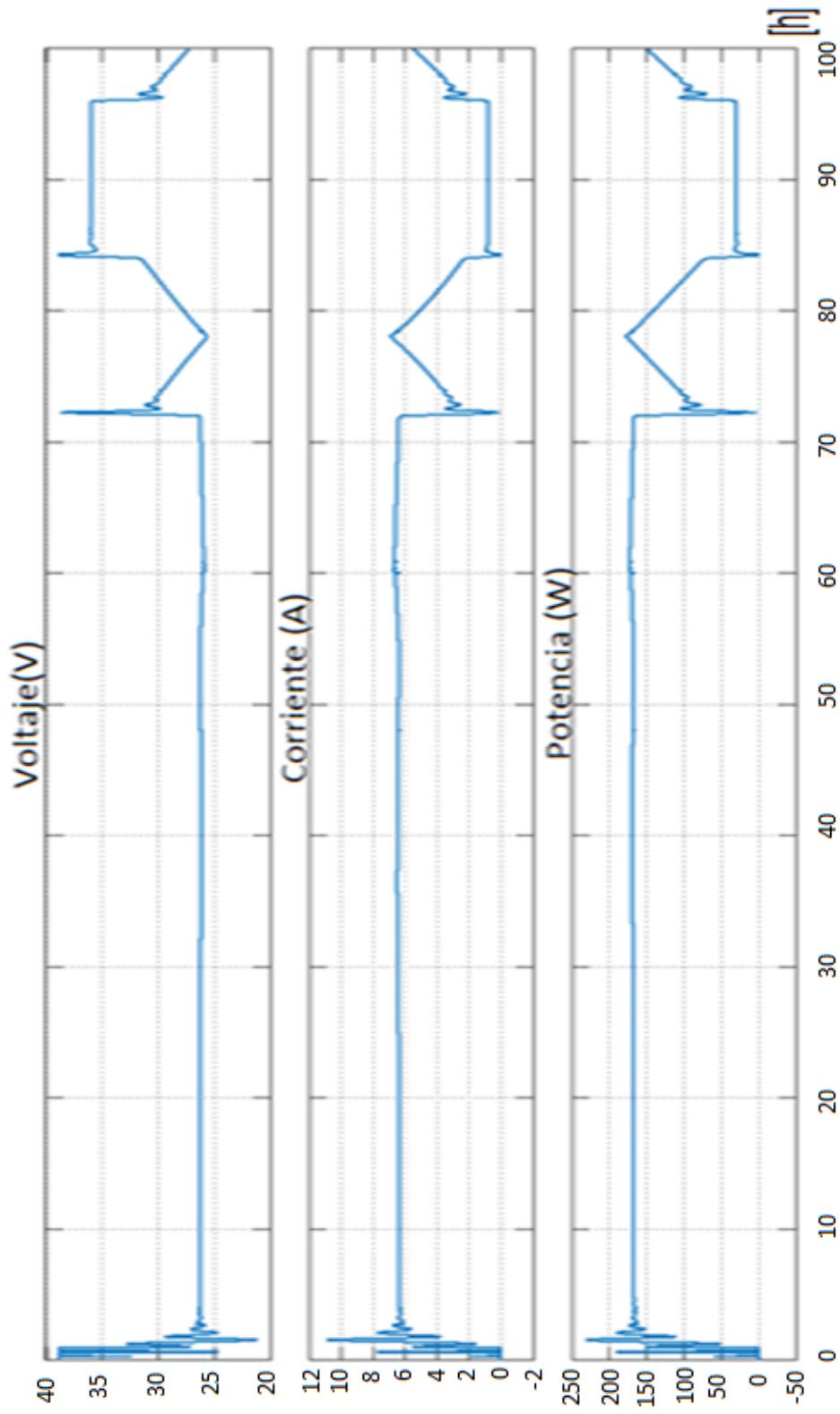


Figura 4.10 Señales generadas por la PEMFC

En la figura 4.10 se observa la evolución temporal de las variables eléctricas de la PEM como son: voltaje, corriente y potencia, claramente se nota la relación inversa que existe entre el voltaje y la corriente, lo cual es de esperarse debido a la curva característica voltaje – intensidad que presenta este tipo de tecnologías.

A medida que la potencia requerida por la carga en cada instante de tiempo aumenta, también lo hace la corriente entregada por la PEM de forma directamente proporcional. No ocurre lo mismo con la tensión, que muestra un comportamiento inverso.

Este comportamiento del voltaje de la PEMFC se debe, a que la misma modula su voltaje, porque la carga demanda una corriente inferior a la que puede suplir la pila, por ende la PEMFC varía el voltaje hasta un máximo aproximado de 48V i.e. voltaje de circuito abierto de la pila.

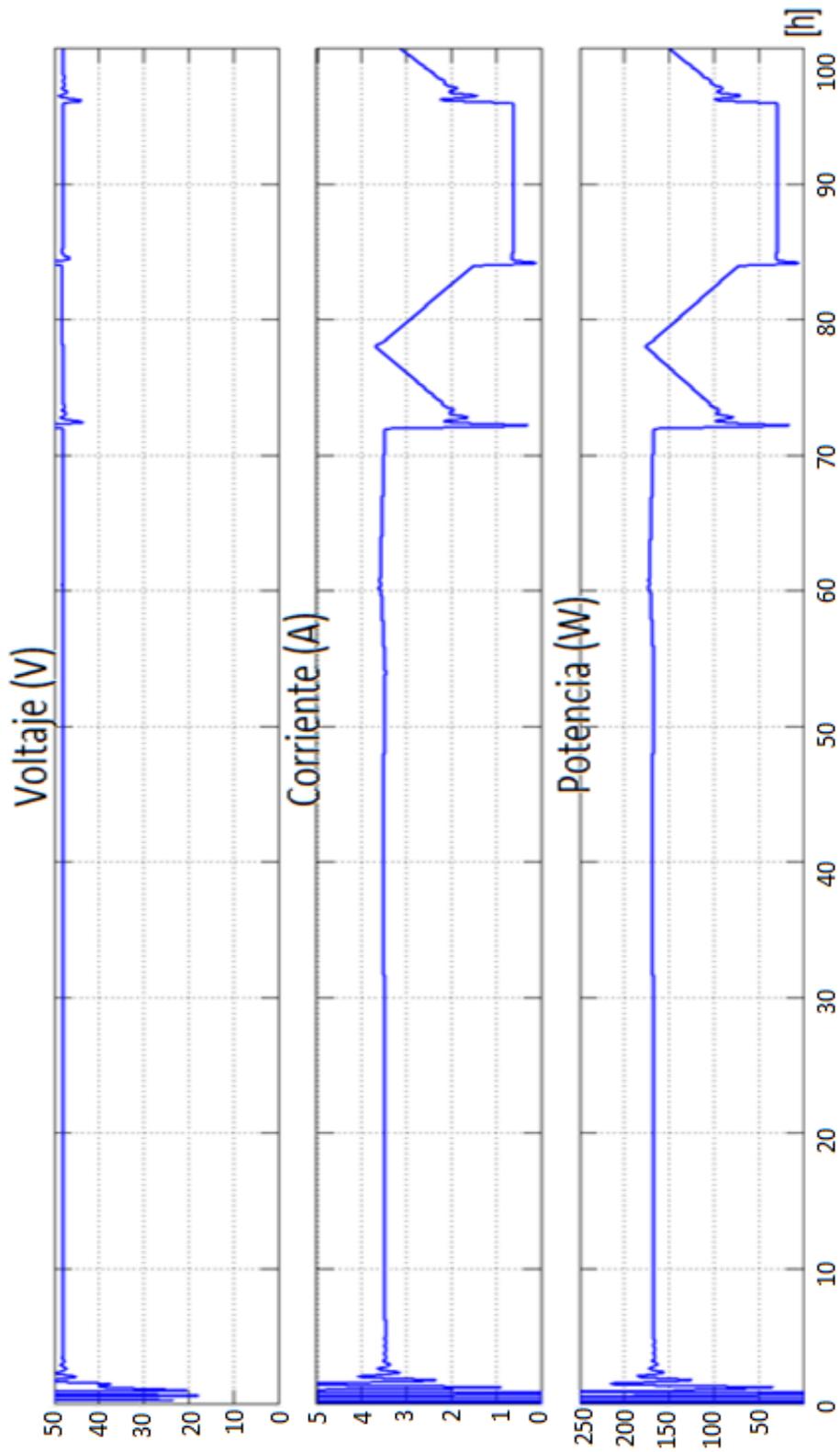


Figura 4.11 Señales de la Carga

En la Figura 4.11 tenemos las señales medidas a la salida del regulador de voltaje, observamos como el voltaje se mantiene constante sin importar las variaciones en el torque, pero no ocurre lo mismo para las señales de corriente y potencia que son proporcionales al torque aplicado al motor DC.

4.4 BANCO DE BATERÍAS

Los parámetros configurados en el modelo de la batería en Matlab, son presentados en la Tabla 4.6, estos parámetros han sido obtenidos de la hoja de datos del fabricante [9]. El sistema SHP diseñado para la aplicación consta de un banco de baterías compuesto por cuatro baterías similares, por lo que los mismos parámetros fueron editados en las cuatro baterías.

PARÁMETRO	VALOR
Tipo de batería	Lead-Acid
Voltaje nominal (V)	12
Capacidad nominal (Ah)	255
Estado inicial de carga (%)	100

Tabla 4.6 Parámetros configurados en las baterías

Con la finalidad de corroborar las características proporcionadas por el fabricante de las baterías, se procede a simular la curva de descarga de la batería. La Figura 4.7 muestra la evolución temporal de la respuesta eléctrica (voltaje) de la batería al alimentar una carga que demande la corriente nominal de la batería, esto es 255 A.

Se observa que la batería queda totalmente descargada, a un tiempo aproximadamente mayor de 50 minutos, lo que teóricamente debería corresponder a los 60 minutos. La caída brusca del voltaje durante alrededor del primer minuto, se debe al voltaje de circuito abierto, el cual es mayor que la tensión cuando la batería entrega energía.

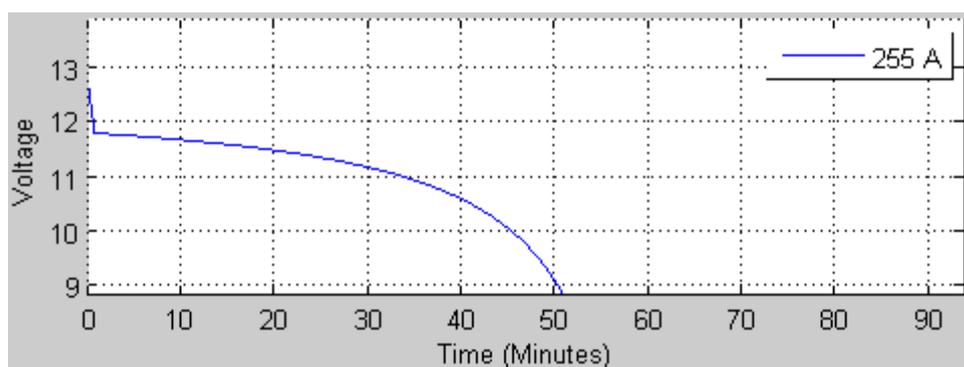


Figura 4.12 Característica de descarga de la batería

CAPÍTULO 5

5 SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL SHP

Para evaluar el correcto desempeño del SHP propuesto, primeramente se procede a definir la irradiación disponible en el lugar de ubicación de la estación meteorológica, concretamente Santo Domingo de los Tsáchilas, se establecen cuatro escenarios para la simulación que ya fueron establecidos en la Sección 3.5 de este documento y que se explicaran con mayor detalle más adelante en este Capítulo.

Para la simulación del sistema SHP se considera un tiempo máximo de alrededor de cuatro días, tiempo suficiente para evaluar el comportamiento del SHP realizando cambios en la irradiación y en la carga a alimentar. El

comportamiento eléctrico del SHP en los cuatro días se corresponde a un tiempo de simulación de 100s.

Los valores de irradiación que se usan en todos los escenarios oscilan entre 2000 y 6000 Wh/m² durante las 100 horas de simulación. En el siguiente apartado se describen los distintos escenarios considerados para la evaluación. Estos son:

5.1 ESCENARIO 1

La primera curva (Figura 5.1) de irradiación trata de simular cuatro días con condiciones normales de irradiación basadas en la zona donde se ubica el sistema. Los resultados obtenidos son los esperados ya que la estación meteorológica es alimentada por los paneles solares durante el día porque los mismos tienen la suficiente potencia para abastecer la carga debido a los valores óptimos de irradiación y durante la noche las baterías alimentan la carga, como se estableció en el diseño el SHP tiene una autonomía de dos días la cual se ve reflejada en el número de segundos que la batería alimenta a la carga.

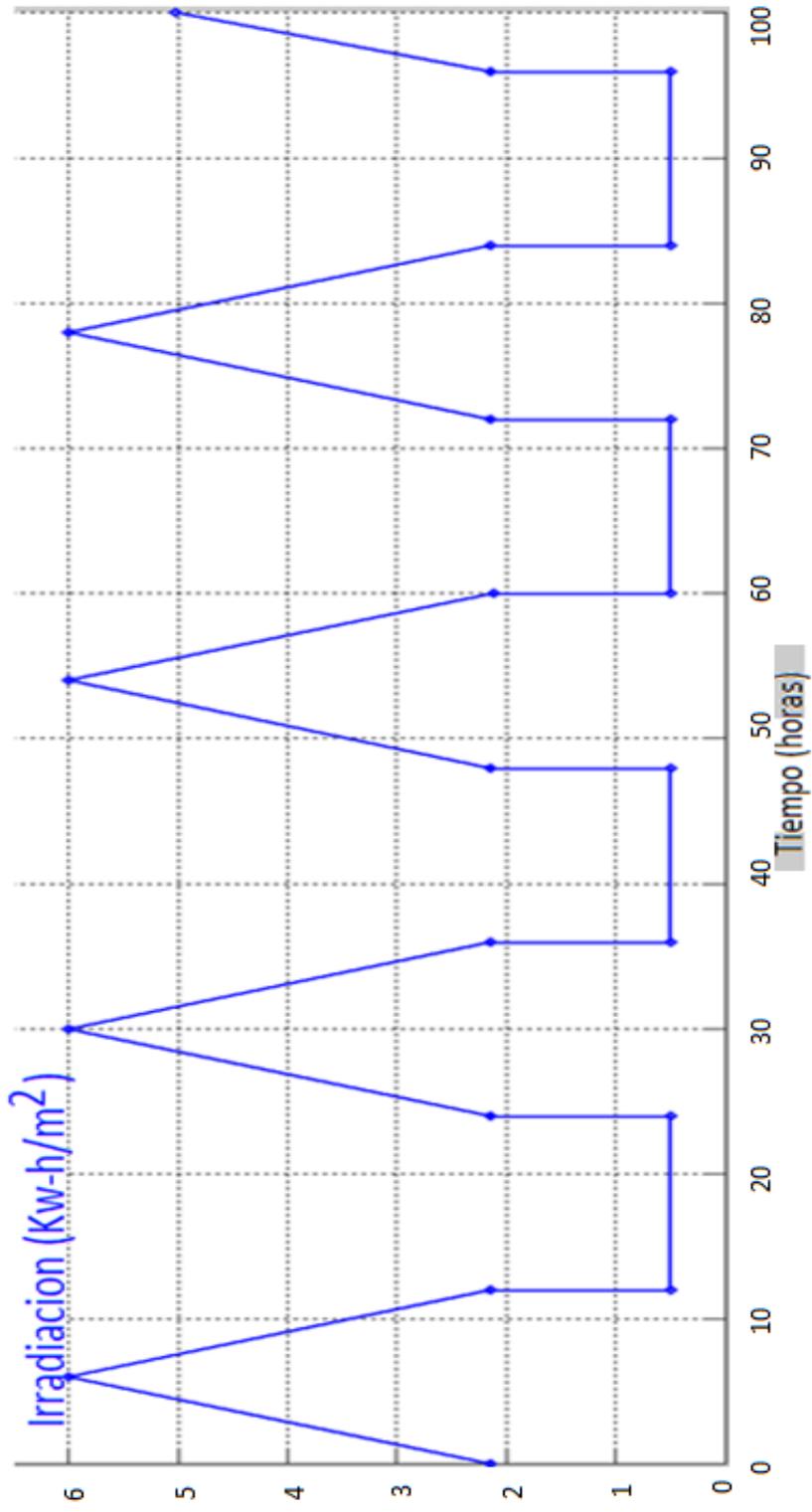


Figura 5.1 Escenario 1: Irradiación aplicada a los paneles solares (KW-h/m²)

La Figura 5.1 muestra la irradiación incidente sobre los paneles solares durante doce horas diarias por 4 días y 4 horas, mediante esta curva lo que se quiere modelar de forma sencilla, es el comportamiento de la irradiación durante un día soleado. Es decir, la irradiación empieza a aumentar hasta un punto máximo durante el día y luego disminuye conforme llega la noche; durante la noche se mantiene en un valor bajo hasta la mañana del segundo día, donde empieza nuevamente el ciclo.

A partir de la Figura 5.2 hasta la Figura 5.4 se muestran los resultados obtenidos de la simulación para este caso; las mismas muestran el comportamiento del SHP con respecto a la curva de irradiación aplicada. Se presenta el caso ideal establecido en el capítulo anterior, es decir que durante las 100 h de simulación además de los paneles fotovoltaicos conectados al bus DC durante el día solamente se conectará el banco de baterías por las noches para alimentar a la carga como se muestra en la Figura 5.3.

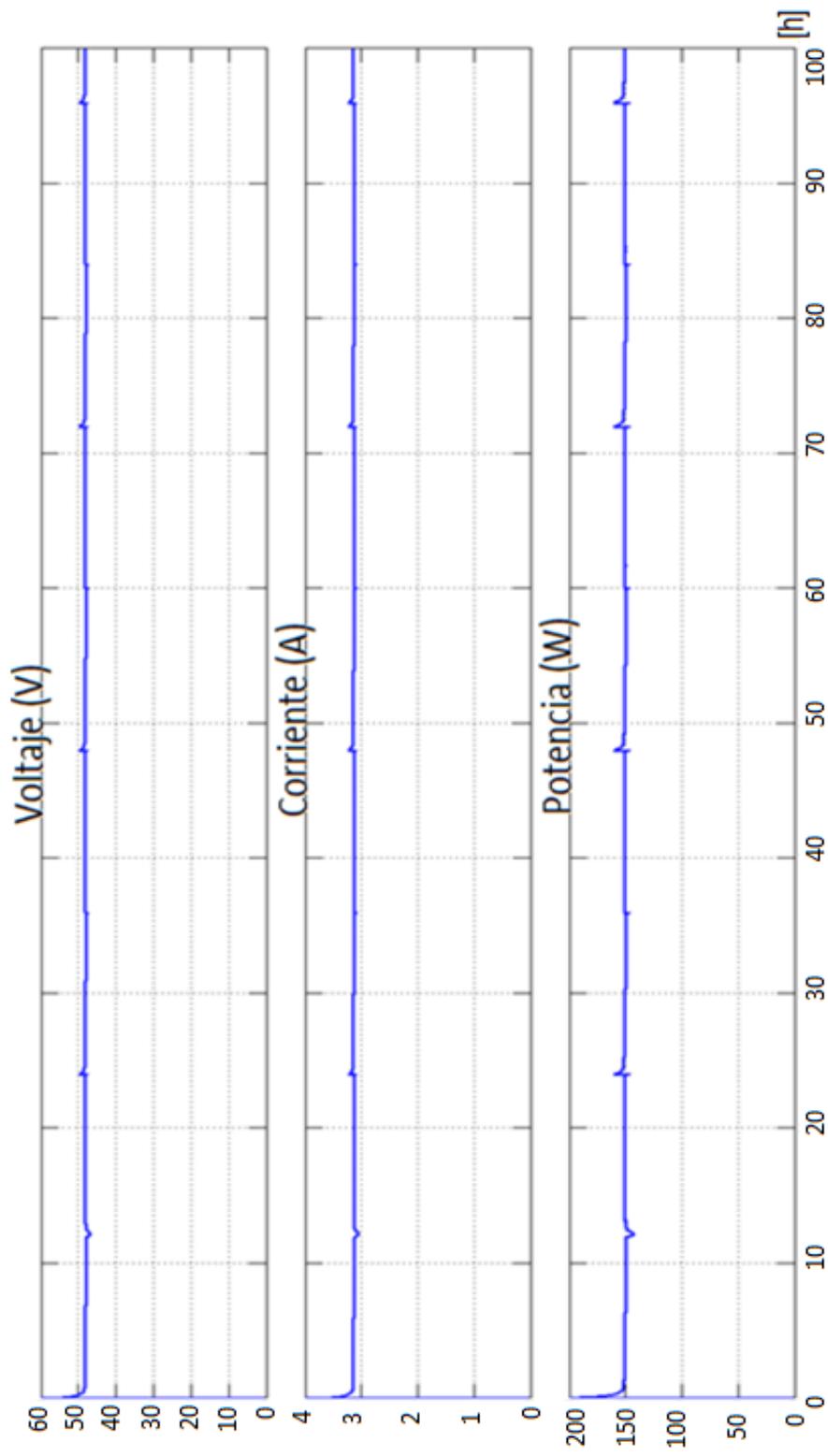


Figura 5.2 Señales eléctricas en la carga

En la Figura 5.2 observamos claramente que el controlador mantiene la potencia eléctrica relativamente constante en la carga de no ser por pequeños picos de voltaje y/o corriente que se distinguen en tiempos como 12, 24, 36, 48 y 72 horas entre otras. Estos picos se deben a la conmutación brusca del Interruptor del Panel Fotovoltaico y el Interruptor del Banco de Baterías (Figura 5.3).

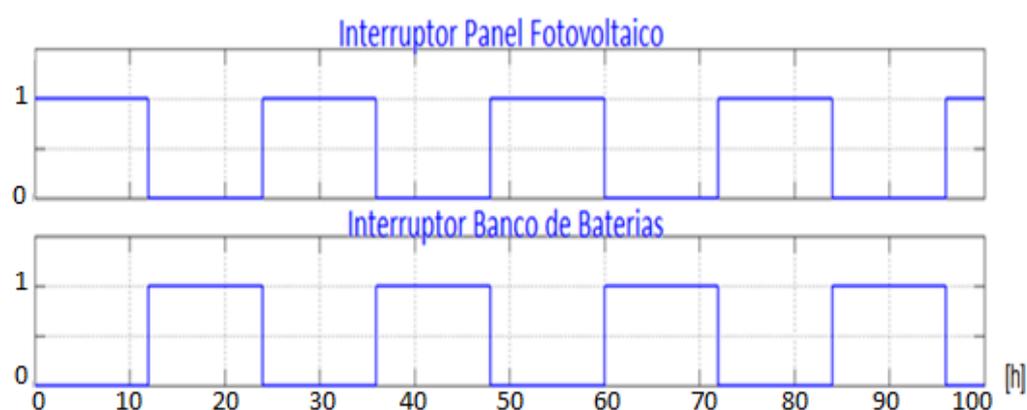
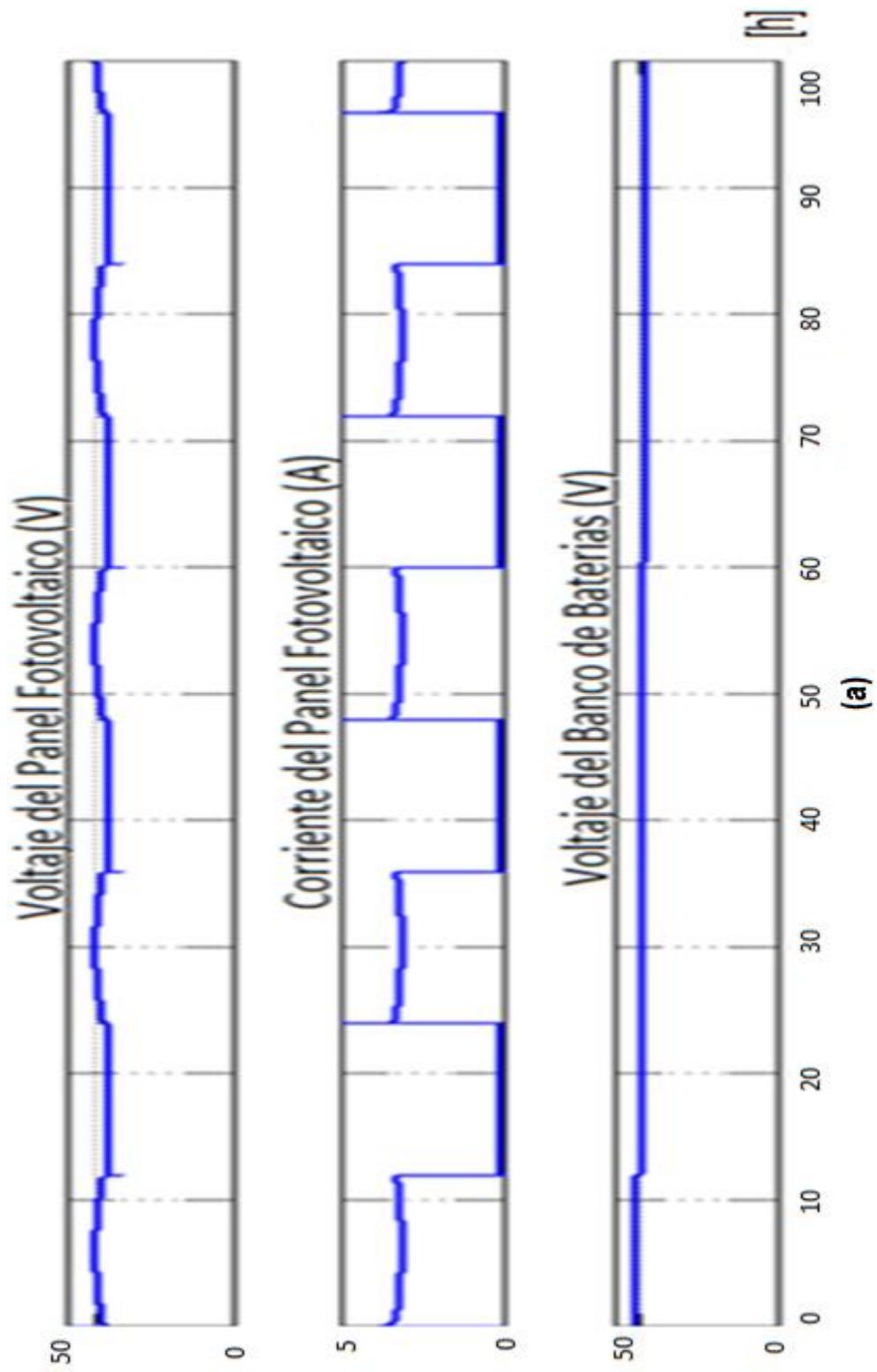


Figura 5.3 Disparos en las compuertas de los Interruptores

La Figura 5.3 muestra claramente que los únicos elementos que interactúan son los paneles solares durante el día y el banco de batería durante la noche como estaba establecido. Además cabe destacar que la PEM nunca entra en operación, porque durante las 100h de simulación no existe disparo en la compuerta del Interruptor de la Celda de Combustible PEM puesto que los paneles producen la energía necesaria que demanda la carga.



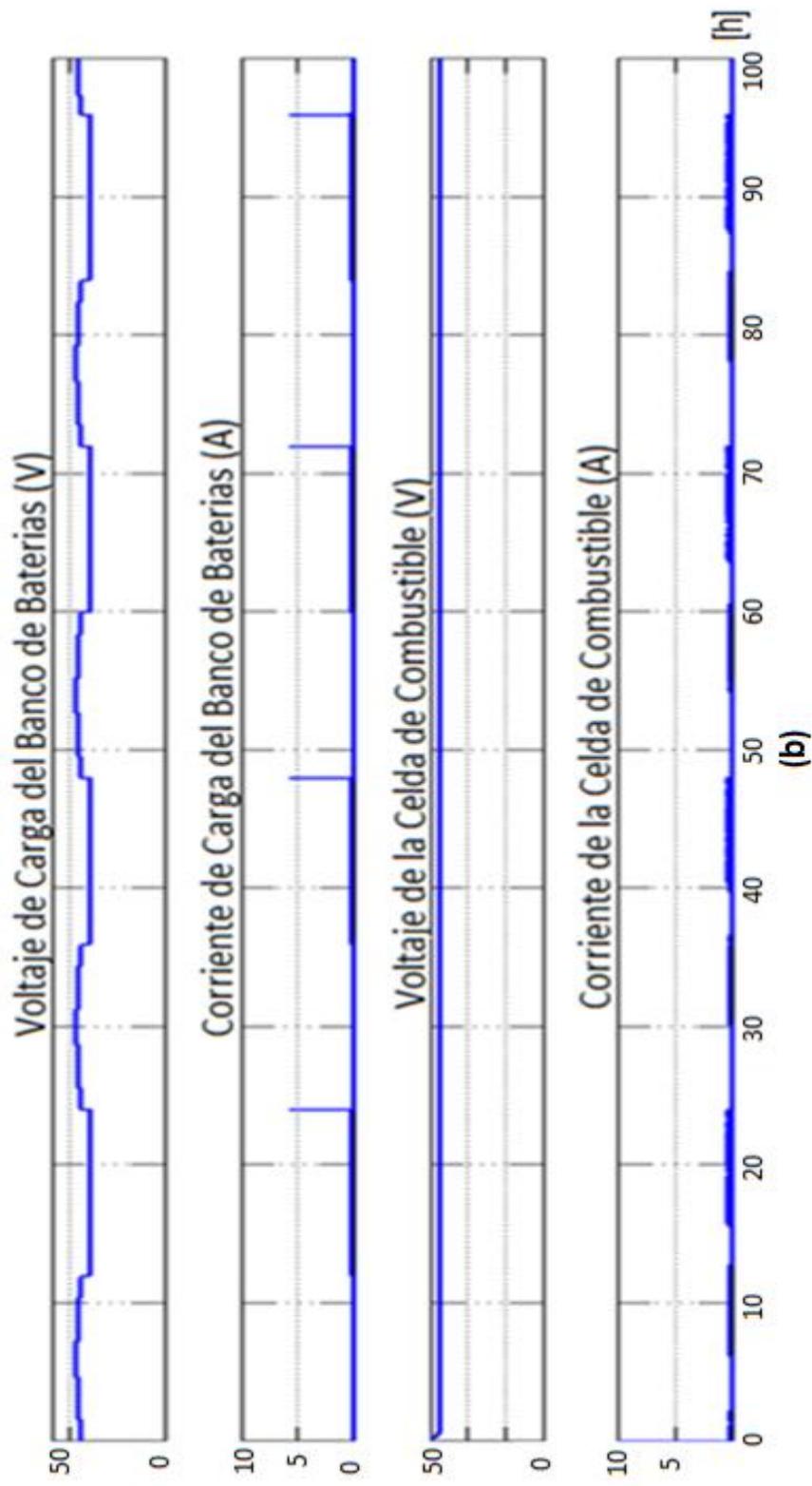


Figura 5.4 Evolución Temporal de las señales eléctricas en los principales elementos del sistema

En la Figura 5.4 se corrobora que los únicos elementos que alimentan a la estación meteorológica son los paneles fotovoltaicos y el banco de batería ya que la corriente respectiva de cada elemento es $3.125[A]$ cuando el dispositivo indicado alimenta la carga.

5.2 ESCENARIO 2

Para el escenario completo se considera el caso intermedio, esto es, de los cuatro días de autonomía del sistema SHP, los dos primeros días se consideran nublados (ausencia de irradiación solar), esto se puede apreciar claramente en la Figura 5.5.

En este caso el banco de baterías entregaría más energía durante ese tiempo hasta que se descargue, y producto de esto la PEMFC se vea obligado a suplir la demanda de energía requerida por la carga.

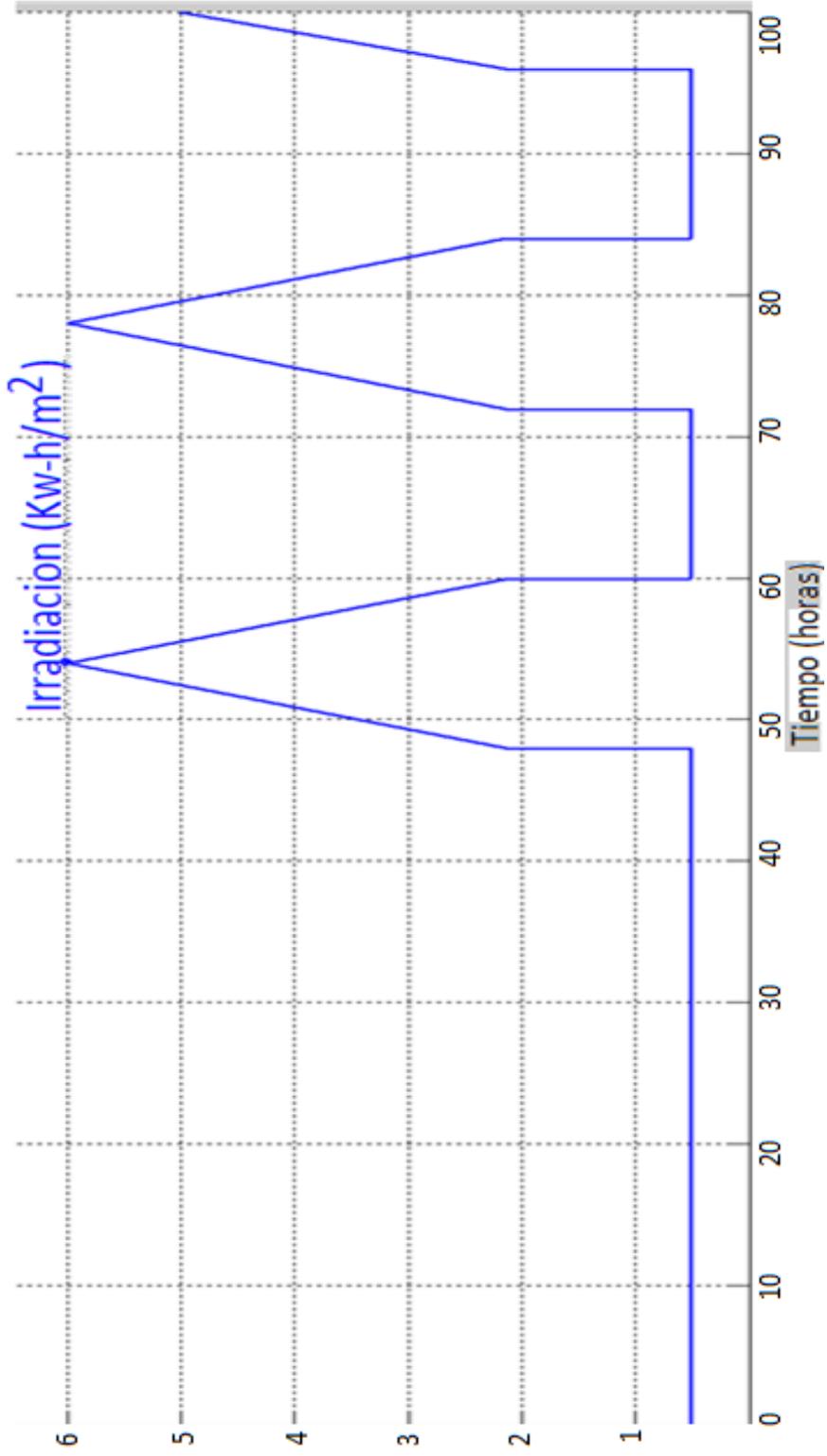


Figura 5.5 Escenario Completo: Irradiación aplicada a los paneles solares (KW-h/m^2)

La ausencia de irradiación solar durante 48 horas y luego 52 horas con días soleados se aprecia en la Figura 5.5, con esta curva de irradiación conseguimos que el banco de baterías se descargue.

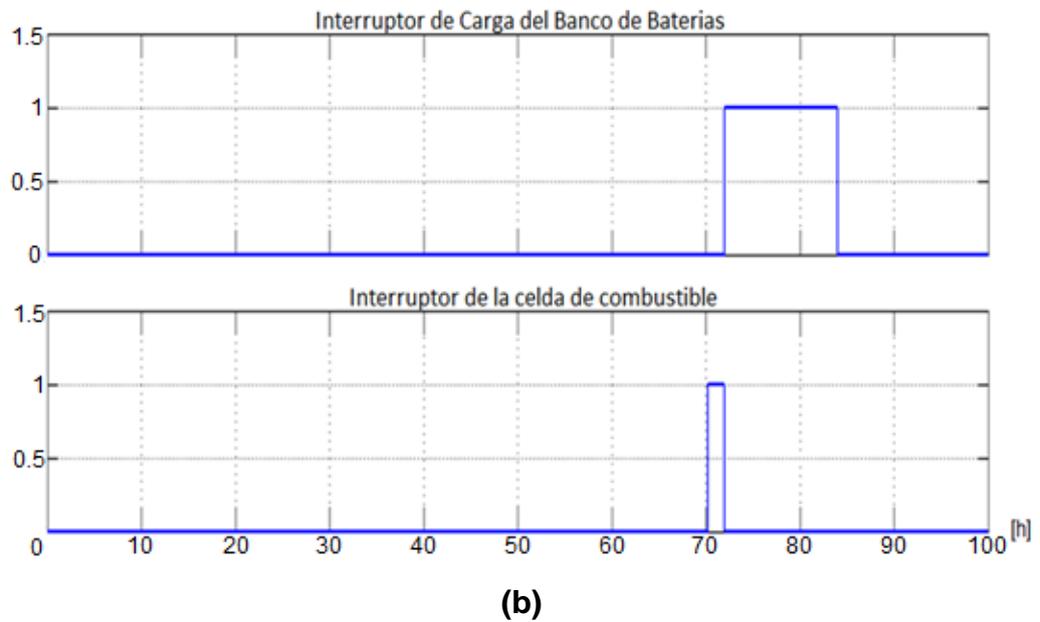
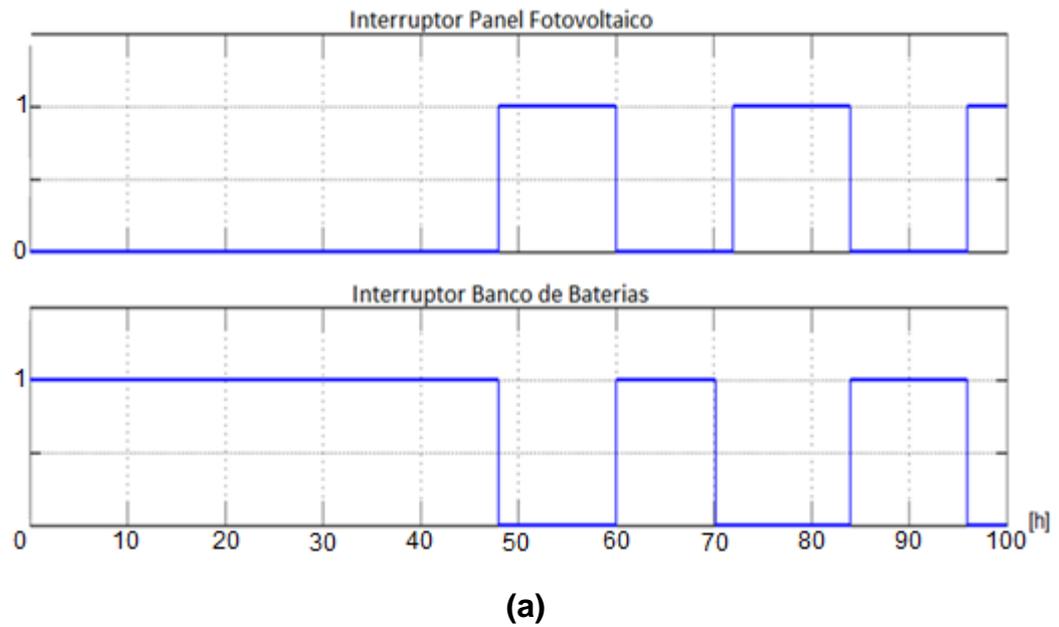


Figura 5.6 Disparos en las compuertas de los Interruptores

En este escenario se asegura la descarga del banco de baterías debido a la prolongada ausencia de irradiación solar, y que de esta manera sea la PEMFC la que alimente al bus DC y este a su vez a la estación meteorológica. El instante en el que ocurren estas transiciones se aprecia claramente en la Figura 5.6.

El banco de baterías alimenta a la estación meteorológica durante 58 horas, por el valor del disparo en la compuerta del Interruptor del Banco de Baterías, luego de ese tiempo el banco se descarga. En ausencia de luz solar la PEM es conmutada a la barra DC (disparo en la compuerta del Interruptor de la Celda de Combustible PEM).

Al detectar el controlador que existe irradiación suficiente los paneles solares suplen de energía a la estación meteorológica y además cargan las baterías (intervalo entre 72 y 84 horas).

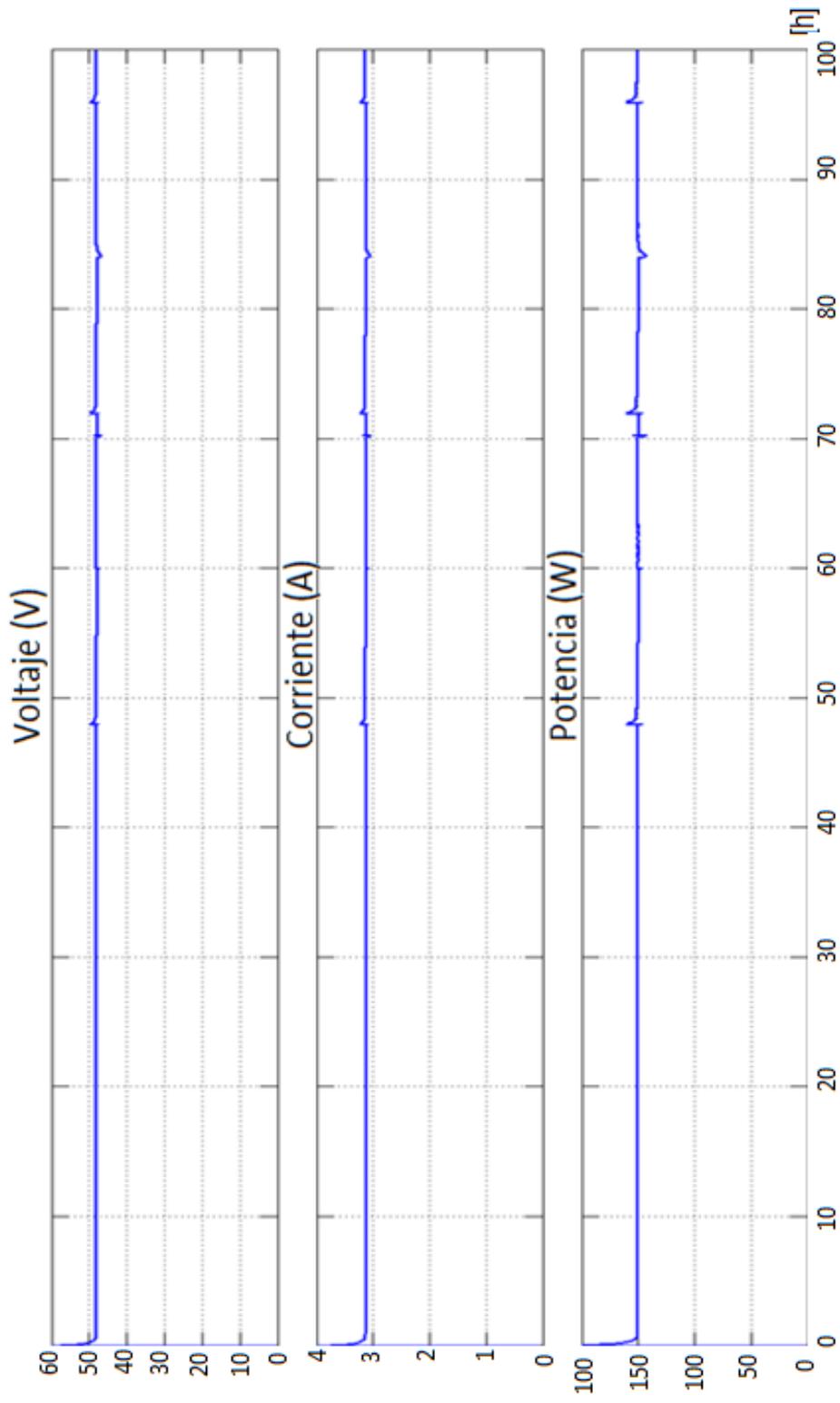
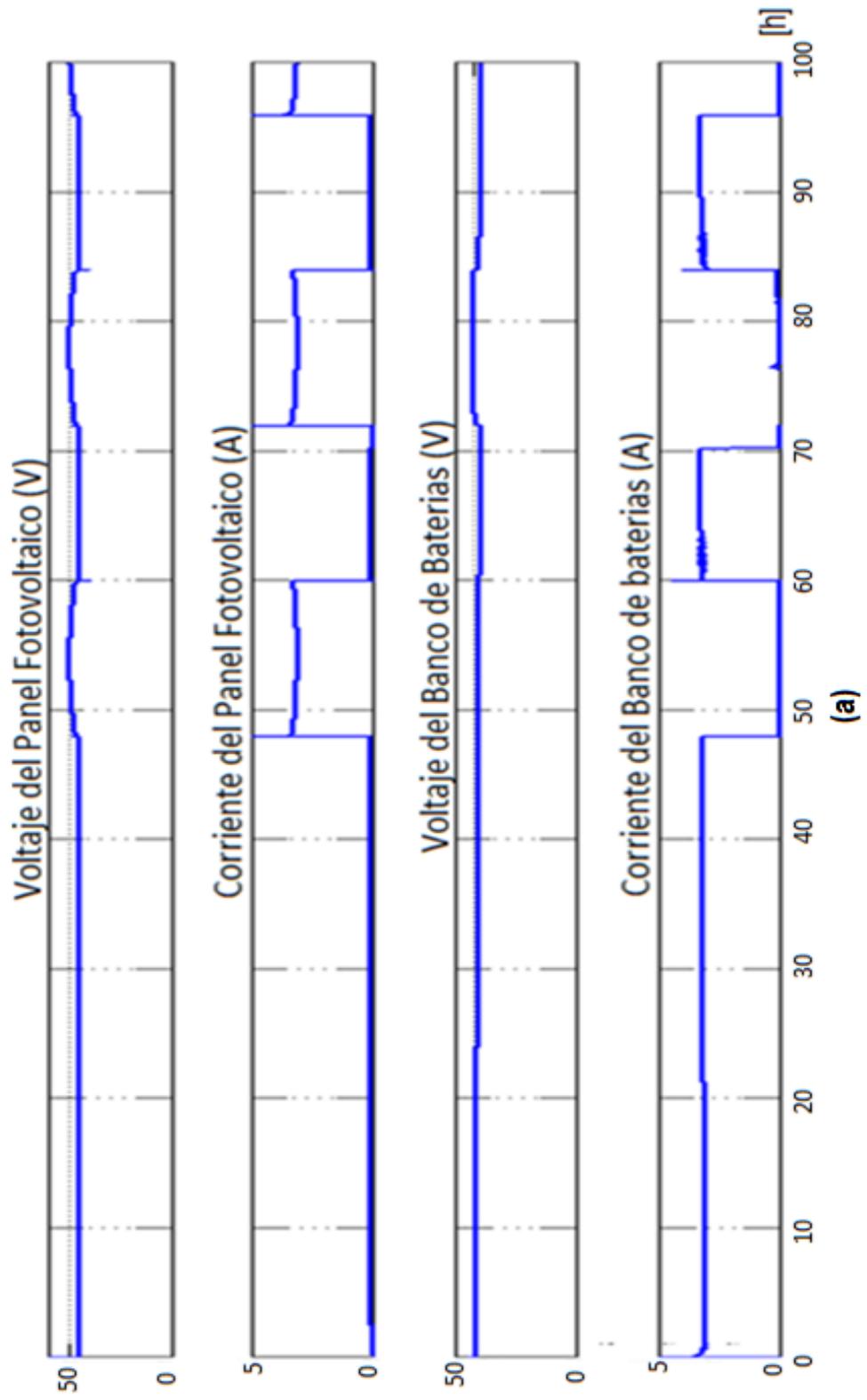


Figura 5.7 Señales eléctricas en la carga Voltaje, Corriente y Potencia

Las características eléctricas presentes en la Figura 5.7 confirman la función que realiza el controlador al mantener la potencia eléctrica relativamente constante en la carga de no ser por pequeños picos de voltaje y/o corriente que se distinguen en tiempos como 48, 72, 84 y 96 horas. Dichos picos se deben a la conmutación brusca del Interruptor del Banco de Baterías, Interruptor de la Celda de Combustible PEM y el Interruptor del Panel Fotovoltaico (Figura 5.6).

En la Figura 5.7 se observa que el banco de baterías, los paneles solares y la PEM alimentan a la estación meteorológica en los intervalos de tiempo respectivos, porque en las curvas correspondientes a cada elemento la corriente es de 3.125[A] en dichos intervalos. A excepción de la corriente de carga del banco de baterías, cuya forma obedece a la naturaleza de la corriente de una batería en proceso de carga.



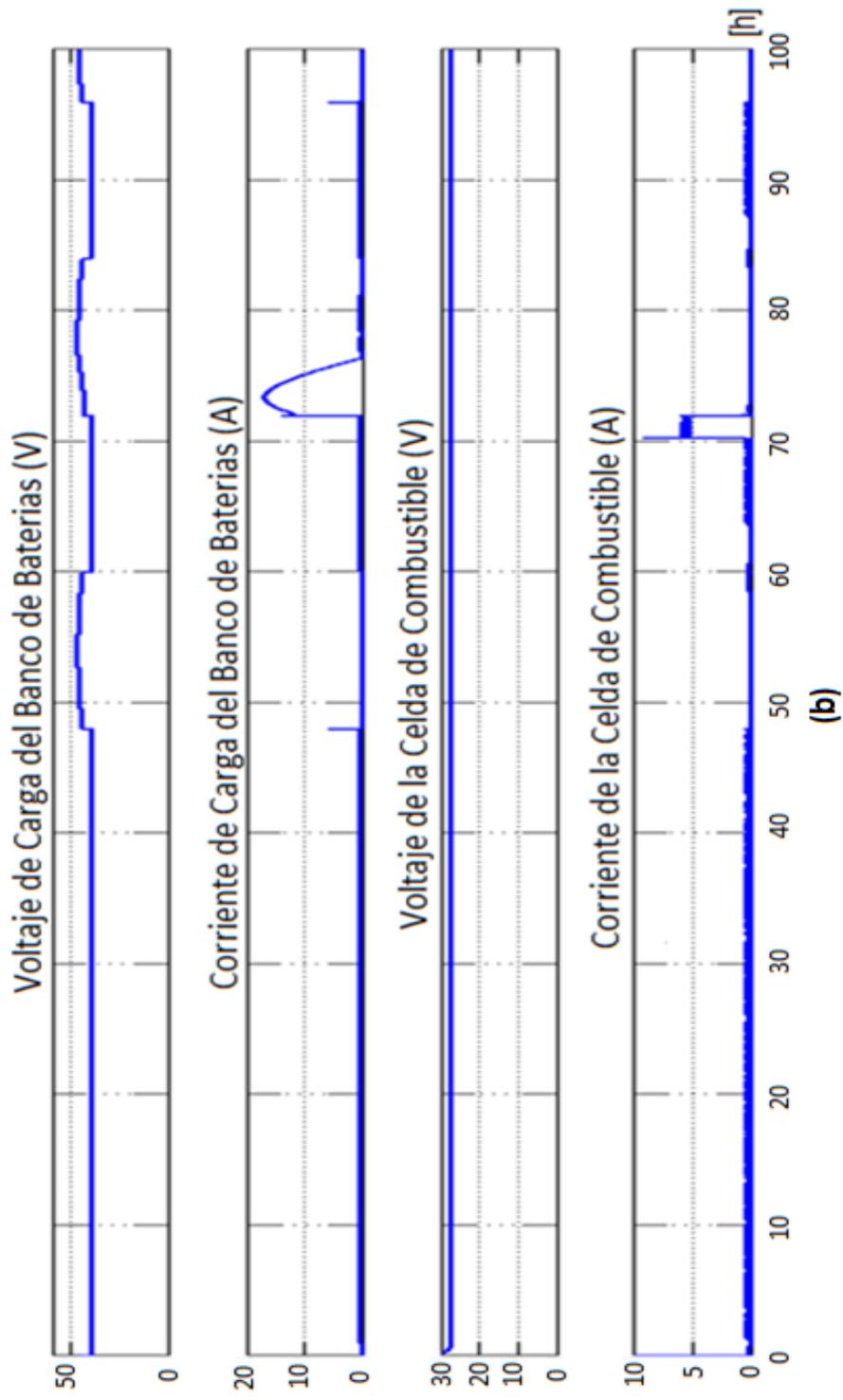


Figura 5.8 Señales eléctricas en los principales elementos del sistema

5.3 ESCENARIO 3

La irradiación que reciben los paneles es nula durante las 100 horas de simulación, la carga es solo alimentada por el banco de baterías durante 58 horas hasta que se descarga y sea la PEMFC la que se encargue de alimentar la carga consumiendo el hidrógeno que se encuentra almacenado en las bombonas. El hidrógeno se encuentra almacenado en dos bombonas, las cuales tienen una capacidad de 900 litros estándar.

El consumo de energía debido a la carga se mantiene constante, salvo una pequeña variación en las señales eléctricas de voltaje, corriente y potencia presentes en la Figura 5.9 a las 58 horas como resultado de la conmutación del Interruptor del Banco de Baterías y del Interruptor de la celda de combustible PEM.

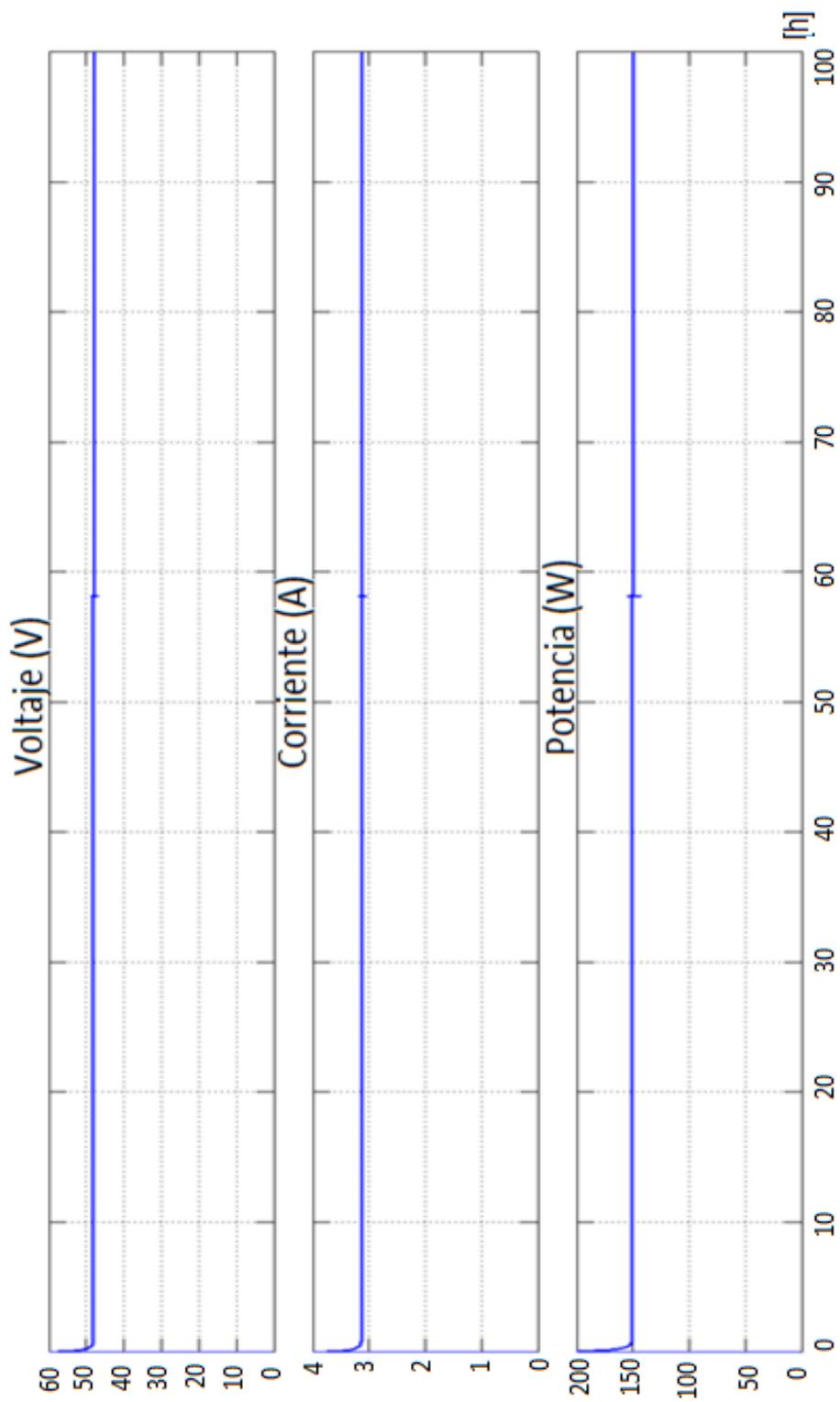


Figura 5.9 Señales eléctricas en la carga

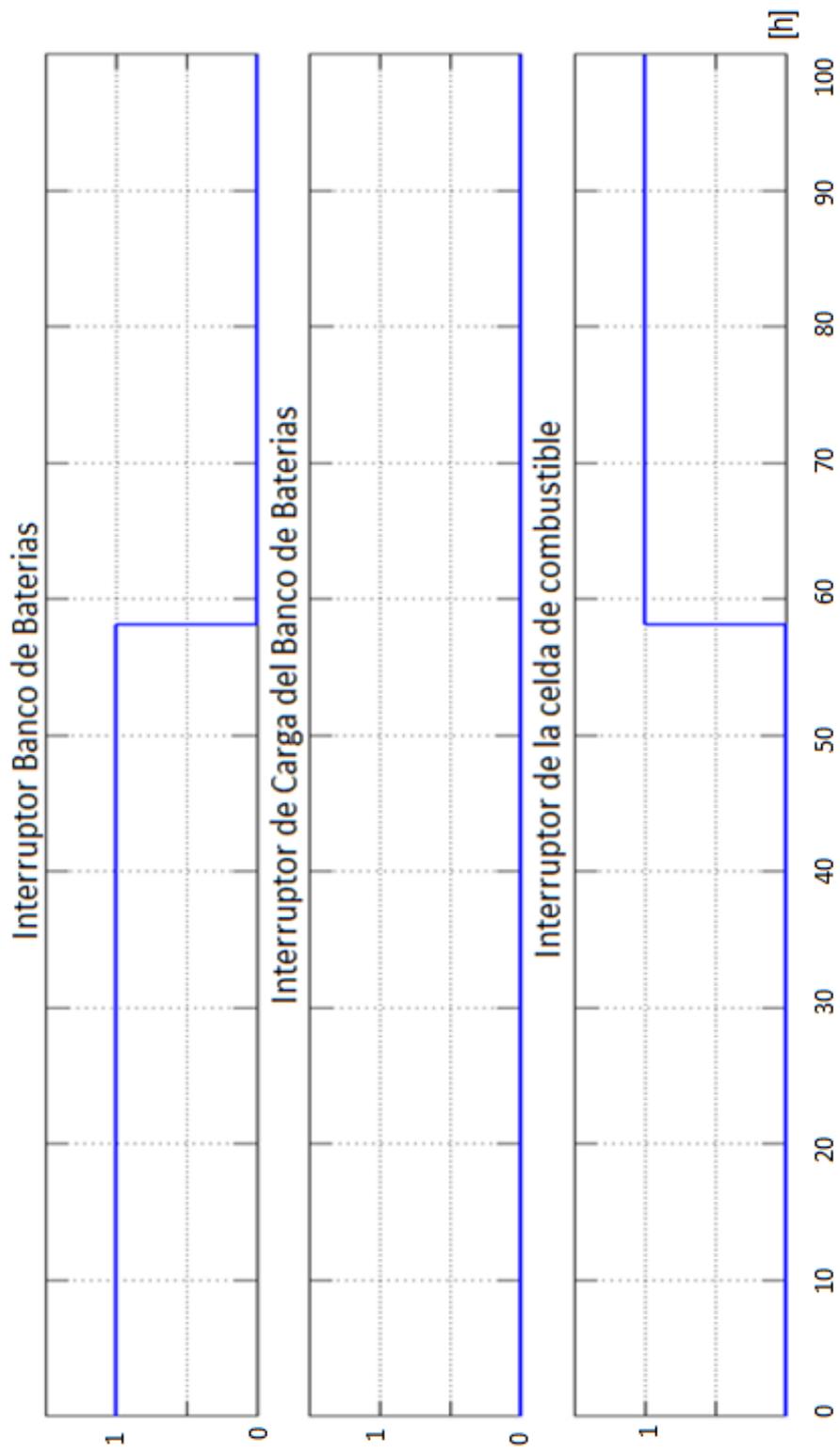


Figura 5.10 Disparos en las compuertas de los Interruptores

Los paneles solares no alimentan, en ningún instante a la estación meteorológica, ya que la irradiación es escasa y toda la demanda deberá ser suministrada por el banco de baterías hasta que se descargue por completo (58 horas) y con esto darle condiciones a la PEMFC para que esta pueda suministra energía a la carga mientras tenga hidrogeno en las bombonas i.e. 11horas y 32 minutos mínimos, tomando en consideración que la pila de combustible consume $2.6 \text{ L}/\text{min}$ a potencia nominal (200W), pero en este caso la estación meteorológica tiene una demanda de 150W, por consiguiente el SHP tendrá una autonomía relativamente mayor.

Se corrobora que los únicos elementos que alimentan a la estación meteorológica son el banco de batería y la PEMFC ya que son los únicos elementos que muestran un flujo de corriente en algún instante de tiempo y sin interrupción alguna como muestra la figura 5.11. Esto quiere decir que la estación meteorológica está siendo alimentada ya sea a través de la PEMFC o bien el banco de baterías, pero nunca por los paneles solares.



Figura 5.11 Señales eléctricas en los principales elementos del sistema

5.4 ESCENARIO 4

Simulamos el esquema completo con carga variable (Figura 5.12) para analizar el comportamiento del sistema frente a variaciones o perturbaciones en la carga y la respuesta ante una carga inductiva. Para esto se simula el sistema usando un motor DC, así mediante la variación del torque se puede alterar la potencia requerida para operar.

Esto se realiza para determinar la factibilidad de usar este sistema para otro tipo de aplicaciones. Además la simulación de un motor es una buena herramienta de estudio debido a los transientes elevados de tensión que suelen ocurrir al momento del arranque de un motor con lo cual resulta útil al simular un aumento de la demanda por transmisión simultánea de datos en una estación meteorológica.

El bosquejo general y las conexiones del sistema se muestran en la Figura 5.7 mientras que la curva de irradiación y torque se representan en la Figura 5.8 y 5.9 respectivamente.

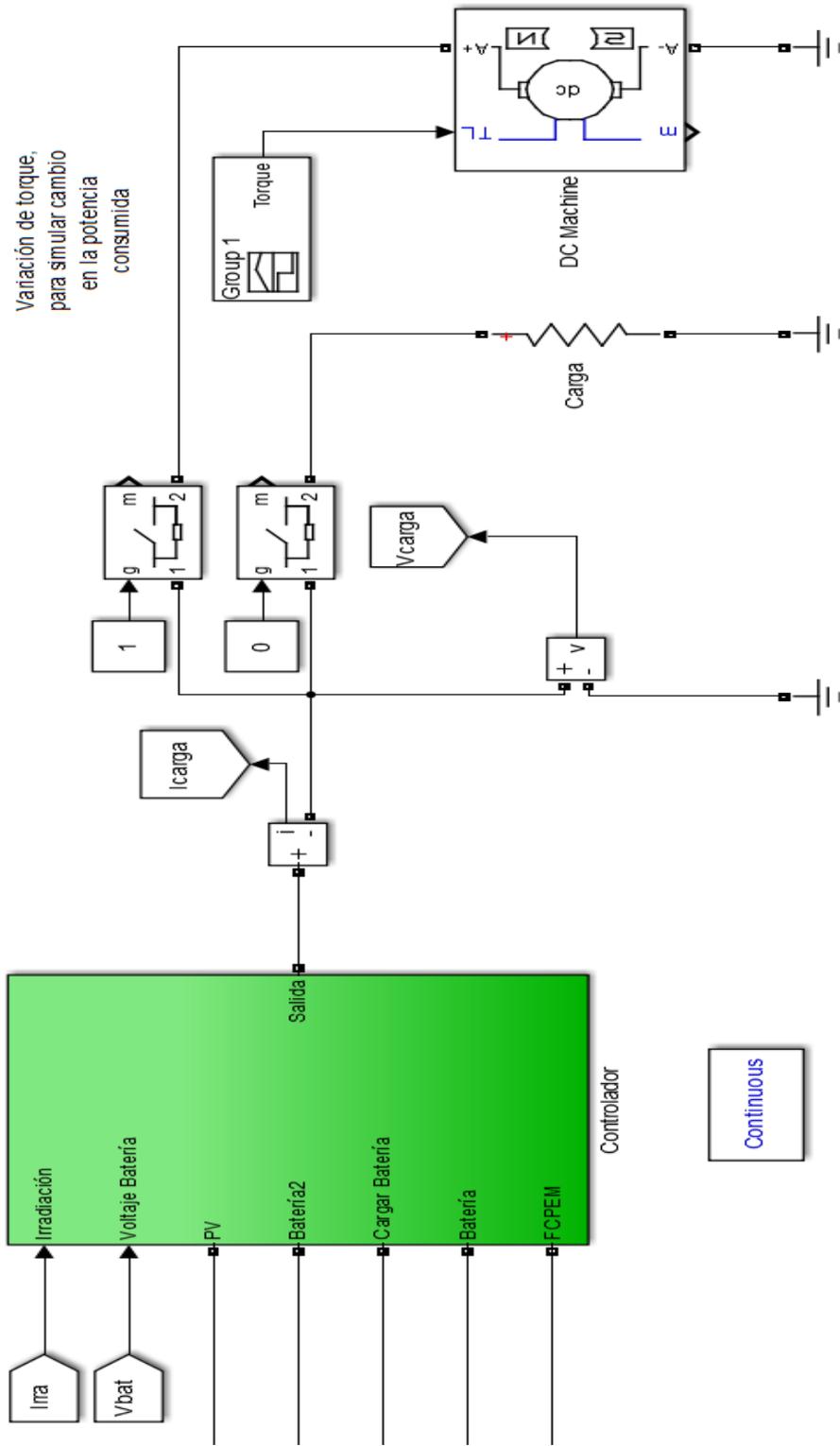


Figura 5.12 Diagrama de Conexiones con carga variable

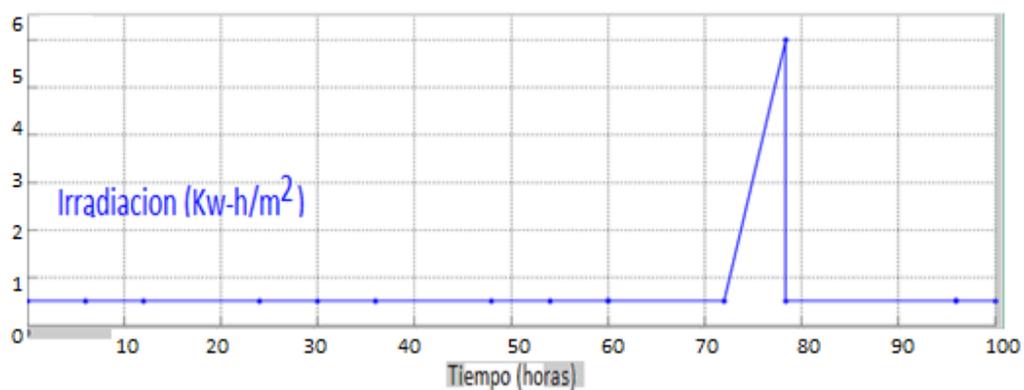


Figura 5.13 Señal de irradiación que incide sobre los Paneles Fotovoltaicos

Para este escenario se requiere que todos los elementos del SHP (Paneles Solares, Baterías y PEMFC) operen en algún instante de tiempo dentro de la simulación para que así puedan interactuar con la carga, en este caso el motor DC para lo cual se usó la curva de irradiación representada en la Figura 5.13

Se genera durante un largo periodo una irradiación baja para que las baterías puedan alimentar a la carga hasta que se descarguen por completo y posteriormente la PEMFC sea conectada al bus DC. Luego de esto la irradiación aumenta para que los paneles fotovoltaicos ingresen a alimentar a carga.

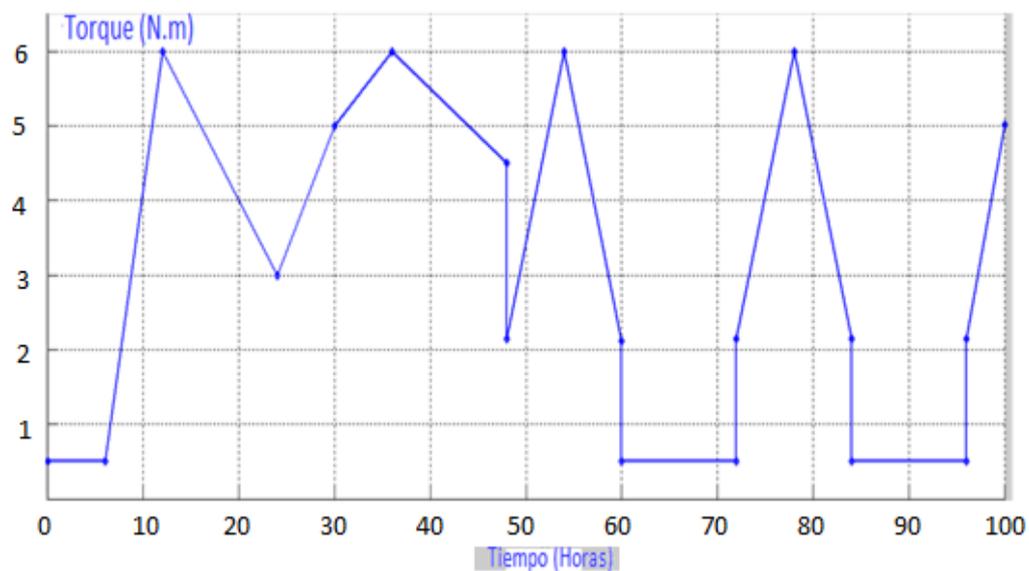


Figura 5.14 Curva de torque aplicada al motor DC

En la Figura 5.15 se puede apreciar con más detalle el momento en el cual cada elemento del sistema híbrido de potencia es conectado al bus DC dependiendo de la curva de irradiación generada anteriormente de la Figura 5.13.

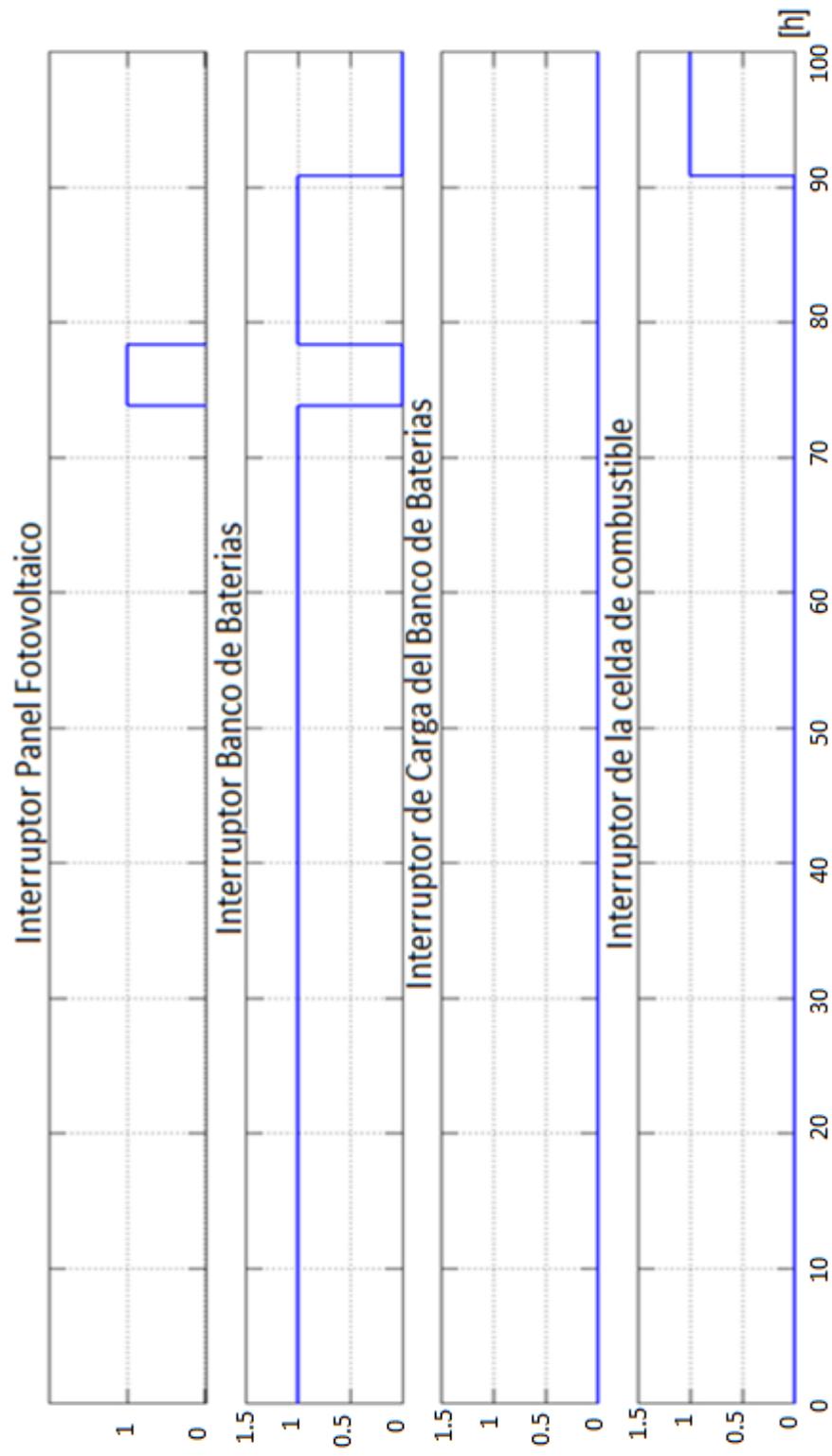
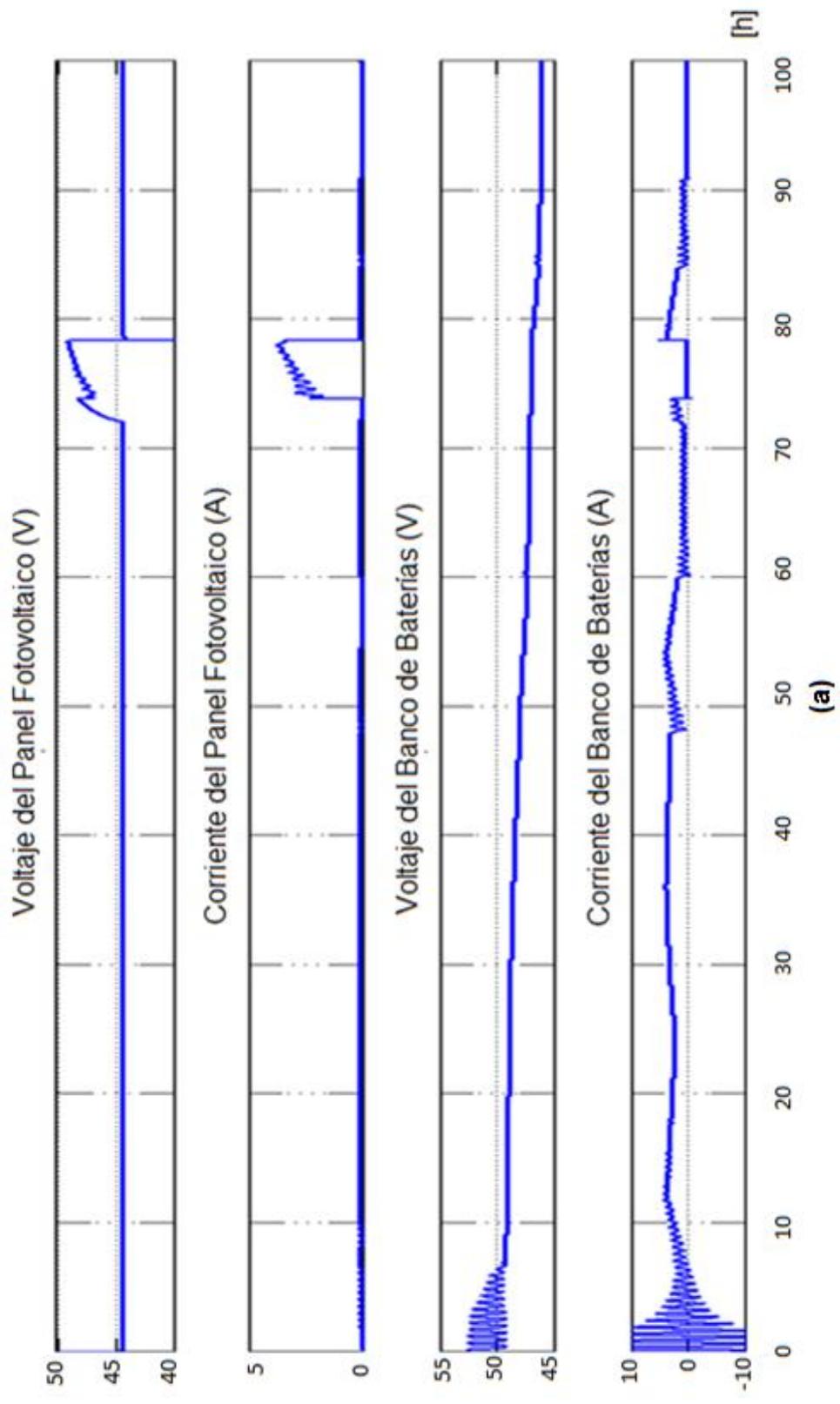


Figura 5.15 Señales de disparo de los interruptores



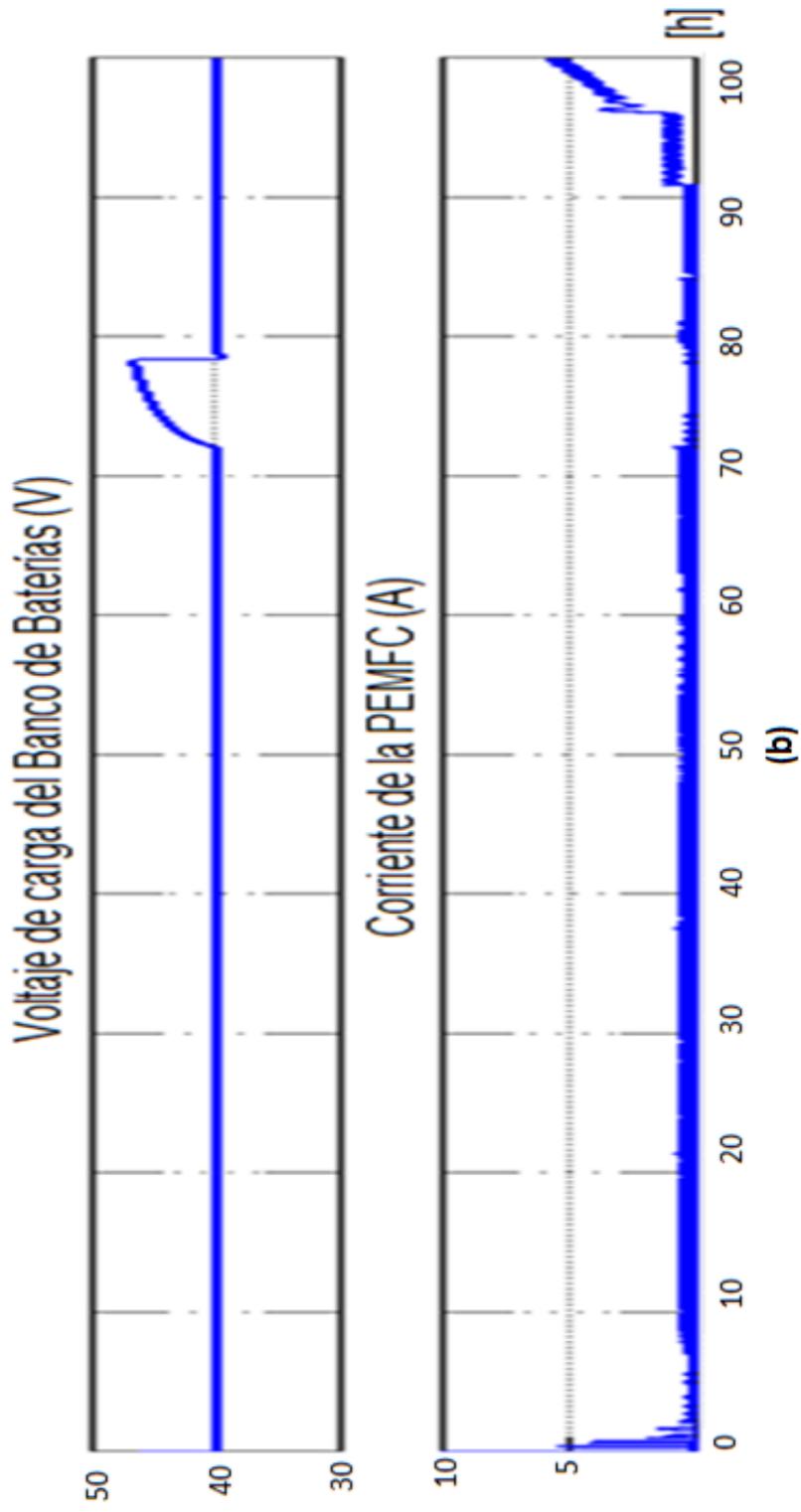


Figura 5.16 Señales de voltaje y corriente para los distintos elementos

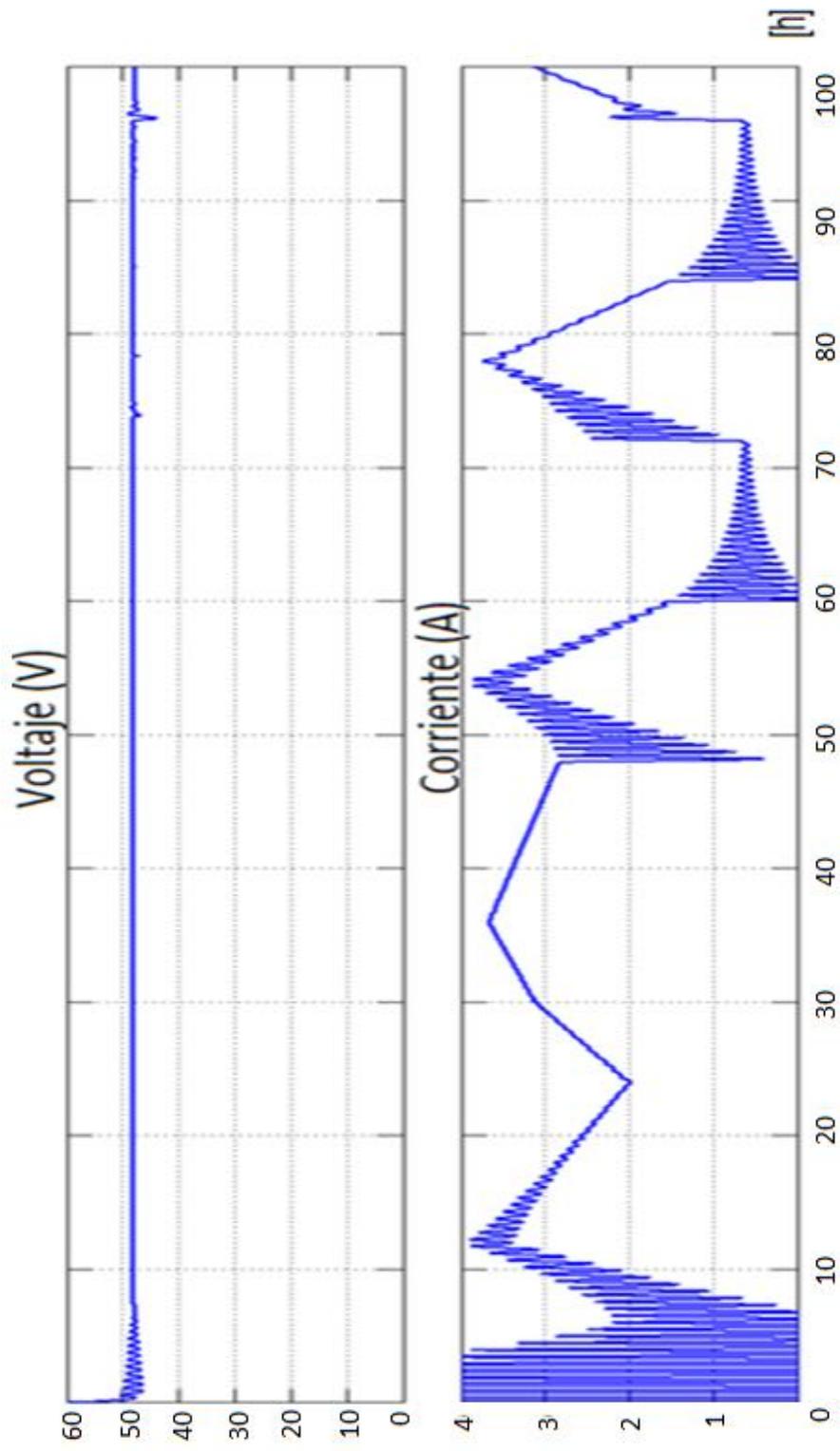


Figura 5.17 Señales en la carga

Las oscilaciones observadas en la corriente y por ende en la potencia de la Figura 5.17 se deben a la combinación de la variación brusca en las curvas de torque (Figura 5.14) e irradiación (Figura 5.13) aplicadas a los elementos respectivos del SHP, además del efecto de la inductancia del motor en el sistema.

5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SHP

Con la información obtenida de las simulaciones, la misma que corrobora el número de los elementos que conforman el SHP, su comportamiento frente a distintas variables, sus fortalezas y debilidades. Se analizará los costos que implicaría una implementación del sistema.

El precio de los elementos utilizados para dotar a la estación meteorológica de una autonomía de operación de 58 horas y 32 minutos mínimo, se encuentra en la Tabla 5.1. La implementación del sistema está alrededor de los 10585 dólares, sin considerar el soporte técnico respectivo del personal capacitado para su instalación.

El costo de los elementos se los obtuvo de la página de los fabricantes, por lo que hay que tomar en cuenta los aranceles de importación respectivos de ser necesarios. Una fortaleza de este sistema es el bajo mantenimiento a los equipos, ya que todos son elementos que no contienen partes móviles.

Elemento	Marca	Modelo	Característica	Cantidad	Costo U	Costo
Panel Solar	Astroenergy	CHSM6612P	Celda Policristalina 310W	7	\$ 303	\$2121
PEM FC	Horizon	FCS-C200	PEM 200 W	1	\$1559	\$1559
Batería	Lifeline	GPL-8DA	12 V / 255 Ah	4	\$ 645	\$2580
Tanque de H2	Ovonic	85G250B-NPT	900 litros estándares	2	\$1700	\$3400
Soporte paneles	ISOFIX	Standart	Soporte para paneles fotovoltaicos	1	\$310	\$310
Controlador Solar	MorningStar	TriStar MPPT 60	Controlador Sistema Solar 48 V	1	\$615	\$615
						\$10585

Tabla 5.1 Costo de los elementos

El área que ocupa un panel fotovoltaico es de 1.944m^2 , por ende el área necesaria para los siete paneles fotovoltaicos es 13.609m^2 .

Cada batería ocupa una superficie de 0.022m^2 , entonces las cuatro baterías ocuparían un área de 0.09m^2 .

El área total ocupada por los paneles solares, las baterías, la PEMFC y las bombonas es de aproximadamente 14m^2 como máximo. Esta superficie total se obtuvo mediante las dimensiones proporcionadas por los fabricantes de cada uno de los dispositivos, las hojas de especificaciones se encuentran en la sección de anexos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El SHP provee energía a la carga por lo menos 100 horas ininterrumpidas en ausencia de irradiación adecuada, de todo este tiempo, aproximadamente 50 horas son abastecidas por el banco de baterías y 30 horas alimentados por la PEMFC. La producción de energía de la PEMFC depende directamente del depósito de combustible (Hidrogeno) que posea el sistema, mientras mayor sea la capacidad del depósito mayor será el tiempo durante el cual la pila entregue energía.

2. Las curvas características de los paneles solares, la PEMFC y las baterías resultado de las simulaciones respectivas fueron muy similares a las proporcionadas por los fabricantes. Lo que indica que en una

implementación del sistema, el comportamiento del mismo será conocido, por la información obtenida de las simulaciones.

3. El uso de una PEM en los sistemas híbridos, para el caso específico de una estación meteorológica, tiene un costo muy elevado con respecto al sistema tradicional PV - baterías. Pero dota al sistema de mayor fiabilidad, manteniendo la necesidad de realizar mantenimiento al sistema en un porcentaje bajo, además de seguir produciendo energía limpia sin ningún tipo de emisiones contaminantes.

4. El sistema híbrido de potencia analizado mediante simulación en este trabajo, tiene la capacidad de alimentar cargas eléctricas resistivas e inductivas, lo cual se corroboró cuando se aplicó al SHP un motor DC como carga. Esto es un indicativo de la fortaleza de la PEMFC en diversas aplicaciones y sistemas, para el caso de este trabajo fue una estación meteorológica, pero se puede extender su aplicación en otras áreas y a cargas que demanden mayor potencia.

5. El desarrollo de este trabajo deja abierta la posibilidad de implementación del SHP, porque los elementos generados de energía como los paneles solares, las baterías, la PEMFC y las bombonas de almacenamiento de Hidrógeno pueden adquirirse. El controlador que gestione el correcto flujo de energía entre los elementos del sistema, es el que debe ser desarrollado por medio de dispositivos lógicos programables, tomando en consideración todas las señales necesarias para el monitorio del estado de los elementos que conforman el sistema.

6. Se recomienda usar otro tipo de software más especializado para la simulación del comportamiento de sistemas híbridos, debido a que Matlab presenta dificultades con la simulación en periodos de tiempo extensos, el software TRNSYS sería una opción.

ANEXOS

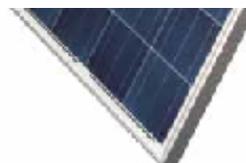
ANEXO A: Hoja de Datos - Panel Solar



Datasheet

Crystalline PV Module

NMC CHSM6612P Series



* NMC: Cell made in Non-Mainland China

285 290 295 300 305 310

EN

ELECTRICAL SPECIFICATIONS						
	285 Wp	290 Wp	295 Wp	300 Wp	305 Wp	310 Wp
STC rated output (P_{MPP})*	285 Wp	290 Wp	295 Wp	300 Wp	305 Wp	310 Wp
PTC rated output (P_{MPP} **)	256.5 Wp	261.1 Wp	265.7 Wp	270.3 Wp	275 Wp	279.6 Wp
Standard sorted output	0/+5 Wp					
Warranted power output STC ($P_{MPP, min}$)	285 Wp	290 Wp	295 Wp	300 Wp	305 Wp	310 Wp
Rated voltage (V_{MPP}) at STC	35.66 V	35.68 V	35.72 V	35.74 V	35.77 V	35.80 V
Rated current (I_{MPP}) at STC	8.04 A	8.15 A	8.30 A	8.40 A	8.53 A	8.68 A
Open circuit voltage (V_{OC}) at STC	44.77 V	44.90 V	45.03 V	45.16 V	45.29 V	45.42 V
Short circuit current (I_{SC}) at STC	8.80 A	8.84 A	8.87 A	8.91 A	8.95 A	8.99 A
Module efficiency	14.7%	14.9%	15.2%	15.4%	15.7%	15.9%
Rated output (P_{MPP}) at NOCT	199.0 Wp	202.5 Wp	206.0 Wp	209.5 Wp	213.0 Wp	216.5 Wp
Rated voltage (V_{MPP}) at NOCT	32.39 V	32.51 V	32.47 V	32.63 V	32.67 V	32.70 V
Rated current (I_{MPP}) at NOCT	6.14 A	6.23 A	6.34 A	6.42 A	6.52 A	6.62 A
Open circuit voltage (V_{OC}) at NOCT	41.08 V	41.20 V	41.32 V	41.44 V	41.56 V	41.68 V
Short circuit current (I_{SC}) at NOCT	6.80 A	6.83 A	6.86 A	6.89 A	6.92 A	6.95 A
Temperature coefficient (P_{MPP})	-0.45%/K	Maximum system voltage UL		1000 V _{oc}		
Temperature coefficient (I_{SC})	+0.087%/K	Number of diodes		6 (or 3)		
Temperature coefficient (I_{MPP})	+0.007%/K	Maximum series fuse rating		15 A		
Temperature coefficient (V_{MPP})	-0.445%/K					
Temperature coefficient (V_{OC})	-0.332%/K					
Normal operating cell temperature (NOCT)	46±2°C					

* Measurement tolerance: ±1-3%
** Estimated



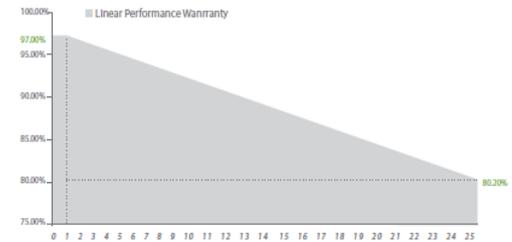
A CHINT COMPANY



RELATED PARAMETERS	
Cell type	polycrystalline
Number of cells / cell arrangement	72 / 6 x 12
Cells dimension	6"
Packing unit	20 modules
Weight of packing unit	528 kg / 1162 lbs

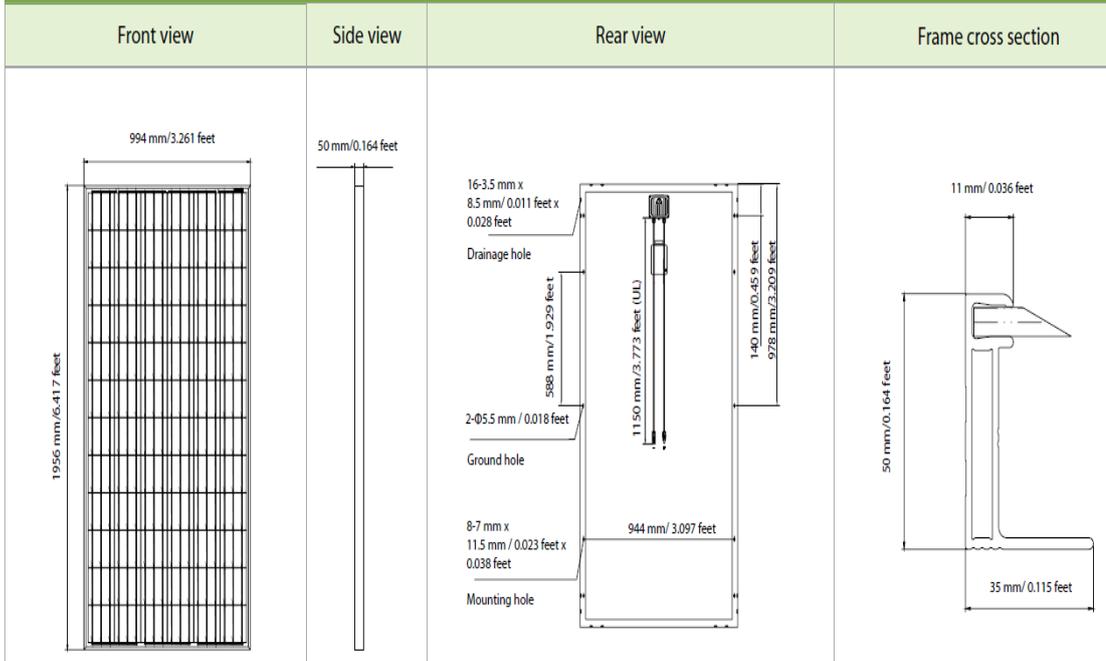
MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Outer dimensions (L x W x H)	1956 x 994 x 50 mm 77.01 x 39.13 x 1.97 in
Frame technology	Aluminum, silver anodized
Module composition	Glass / EVA / Backsheet (white)
Weight (module only)	23.5 kg / 51.7 lbs
Front glass thickness	3.2 mm / 0.13 in
Junction box IP rating	IP 65 (above)
*Cable length (UL)	1150 mm / 45.28 in
Cable diameter (UL)	12 AWG
Maximum load capacity	5400 Pa
Fire class	C
Connector type (UL)	MC type 4 compatible

QUALIFICATION AND LINEAR WARRANTIES	
Product standard	UL 1703
Extended product warranty	10 years
Output decline 3%/year performance P _{mpp} (STC)	1 st year
Output decline 0.7%/year performance P _{mpp} (STC)	2 nd -25 th years



ARTICLE NUMBER (per panel) - (NMC) CHSM6612P Series	
Model	Article No. (UL)
(NMC) CHSM6612P-285	200154
(NMC) CHSM6612P-290	200155
(NMC) CHSM6612P-295	200156
(NMC) CHSM6612P-300	200157
(NMC) CHSM6612P-305	200275
(NMC) CHSM6612P-310	200276

MODULE DIMENSION DETAILS



ANEXO B: Hoja de Datos - Estación Meteorológica

Vaisala TacMet® Tactical Meteorological Observation System MAWS201M



Compact and Lightweight Basic System

The Vaisala TacMet® MAWS201M is a portable weather station that offers high performance in a very compact package. The MAWS201M measures, processes and reports data from wind speed and direction, air temperature, relative humidity (dewpoint), pressure and precipitation. The system is powered either by mains (AC) power or by an integrated solar panel. Back-up batteries are available, providing a minimum of 7 days of operation without recharging.

Full Aviation Support with Enhanced Systems

The MAWS201M is easily enhanced with the needed support for aviation. Enhancement 1 includes cloud height and coverage, visibility, present weather and lightning. Enhancement 2 has freezing rain, additional wind sites and additional digital displays. The MAWS201M includes also a PocketPC handheld display for viewing measured and calculated parameters and system alarms, as well as for setting station-specific parameters.

Maximum Portability and Ease of Use

Mechanical parts of the system are lightweight but robust, and all cables are fitted with quick-release color-coded connectors. The carrying cases are light, yet providing excellent cushioning during transport.

Versatile Reports Automatically

The MAWS201M is delivered with advanced software, which displays numerical and graphical data and codes automatically. It also issues METAR reports and based on user defined weather events, and SPECI reports. Remarks can easily be included with reports. The software also does the archiving and transmitting for further processing.

Features

- Cost-effective quickly deployable portable automatic weather station
- For defense operations using small landing strips, drop zones, test ranges, UAV systems and uncategorized airports
- The most compact lightweight system with full aviation support
- Reliability and precision gained through built-in diagnostics and high quality sensor technology
- Robust design for harshest environment
- Enhanced freezing rain detection
- Accurate 2nd wind measurement site to assist approach
- Ready configured digital displays to distribute data to command center

Reliability and Highest Precision

The MAWS201M processes statistical calculations, performs data quality control, and formats data for output. Built-in quality control software validates sensor data against user-set limits and step changes between successive measurements. In case of unlikely malfunction, the MAWS201M automatically detects failures and the sensor can be replaced quickly on site.

General

Data Collection Platform	Vaisala Data Logger QML201
Temperature	
Operating *	-50 ... +60 °C (-58 ... 140 °F)
Storage	-50... +70 °C (-58 ... 158 °F)
Humidity	0 ... 100 %RH
IP rating	IP66
MTBF	>12,500 h (MIL-HNDB217F)
Mast	
	Tripod mast adjustable from 1.8 to 3.6 m (6 to 12 ft)
	Optional telescope mast 10 m (30 ft)
Maximum wind speed	35 m/s (70 kts)
Weight	
Basic System	In two carry cases, total 42 kgs
Enhanced System 1	In two carry cases, total 71 kgs
Enhanced System 2	in two carry cases, total 61 kgs
Set-up time	
Basic System	Less than 15 min.
Enhanced System 1	30 min.
Enhanced System 2	30 min.**
Powering	
AC (Mains) power	85 - 264 VAC, 47 - 63 Hz, max. 200 VA
Solar panel	11W
Internal battery	
Basic System (continuous operation w/o AC power)	7 Ah / 12 V
Enhanced System 1 (min. 24 h operation w/o AC power)	48Ah / 12V
Enhanced System 2 (min. 24 h operation w/o AC power)	24Ah / 12V
Battery regulator for Enhanced Systems	Charge/recharge control
	Temperature compensation
	Deep discharge protection
	Simultaneous inputs from solar and AC power allowed
Electromagnetic compatibility	IEC/EN 61326-1

Data Validation, Calculations and Reports

Data quality control	Upper / lower climatological limits
	Step change validation
	Sensor status indication
Statistical calculations	Averaging over user set periods
	Minimum / maximum values
	Standard deviation
	Cumulative values
Other calculations	Dew point
	QNH, QFE, QFF, PA, DA,
	pressure tendency, pressure trend
	Gust, Peak, Squall
	Modified discomfort index
Weather data reports	METAR
	SPECI

Sensor Options per System Type

	Basic	Enhanced	Enhanced
		1	2
Wind speed (WMS302M)	√	√	√
Atmospheric pressure (BARO-1)	√	√	√
Temperature, relative humidity (HMP155)	√	√	√
Rain / precipitation (QMR101M)	√	√	√
Cloud height & coverage (CL31M)		√	√
Visibility & present weather (PWD22M)		√	√
Lightning (SA20M)		√	√
Freezing rain (LID330IP)			√
Additional wind sensor (WMT700)			√

Standard Communication Options ***

Wireless communication	UHF, VHF
Landline communication	RS232

* for further extended range, please contact Vaisala

** total set-up time depends on location and distance of additional wind sites and displays

*** for other communication options, please contact Vaisala

ANEXO C: Cálculo del Número de Paneles Solares

Para el cálculo y dimensionado de las instalaciones fotovoltaicas existen diferentes métodos, para este documento se ha empleado el método del peor mes o el mes más desfavorable.

El primer paso es la determinación de la energía eléctrica diaria que necesitara la instalación receptora. Dependiendo de la instalación pueden existir cargas en DC o AC y por lo tanto se determinara la energía de ambos por separado. En nuestro caso solamente dispones de cargas DC proveniente de los distintos sensores de la estación meteorológica y cuyo valor fue definido a 150 W. Entonces tenemos que:

$$E_{DC} = P_{DC} \cdot H = 150 \cdot 24 = 3600 \text{ W-h}$$

Donde

E_{DC} : energía que consume el sistema expresado en W-h

H: horas de funcionamiento diario

P_{DC} : potencia del sistema expresado en W

De igual forma se calcula la energía requerida por las cargas AC, pero nuestro sistema al no tener este tipo de cargas, tenemos que $E_{AC} = 0$

Obtenidos estos valores de energía en AC como DC se debe considerar el factor de seguridad que considera posibles pérdidas en las conexiones, aumentos imprevistos de consumo, etc. En este sistema se adopta un factor de seguridad del 15%.

Para el caso de los consumos de CA, se considera adicionalmente la eficiencia del inversor ya que estos elementos no son ideales y presentan pérdidas. En ausencia de información sobre la eficiencia se puede considerar un valor $\eta_{inv}=85\%$.

Para esto usamos las siguientes formulas:

$$E'_{DC} = (1+F_S) \cdot E_{DC}$$

$$E'_{AC} = (1+F_S) \cdot \frac{E_{AC}}{\eta_{inversor}}$$

$$E_{elec} = E'_{DC} + E'_{AC}$$

Donde:

$E'_{DC, AC}$: energía considerando el factor de seguridad expresado en W-h/día

$E_{DC, AC}$: energía demandada por las cargas tanto en AC como DC

F_s : factor de servicio del 15%

$\eta_{inversor}$: eficiencia del inversor

E_{elec} : consumo total diario

Aplicando las ecuaciones obtenemos:

$$E'_{DC} = (1 + F_s) \cdot E_{DC}$$

$$E'_{DC} = (1 + 0.15) \cdot 3600$$

$$E'_{DC} = 4140 \text{ W-h/día}$$

$$E'_{AC} = (1 + F_s) \cdot \frac{E_{AC}}{\eta_{inversor}}$$

$$E'_{AC} = (1 + 0.15) \cdot \frac{0}{\eta_{inversor}}$$

$$E'_{AC} = 0 \text{ W-h/día}$$

$$E_{\text{elec}} = E'_{\text{DC}} + E'_{\text{AC}}$$

$$E_{\text{elec}} = 4140 + 0$$

$$E_{\text{elec}} = 4140 \text{ W-h/día}$$

Ahora se determina el valor de irradiación del peor mes, para esto usamos los datos proporcionados por el atlas solar del ecuador y obtenemos que el valor más bajo de irradiación es de 2150 W-h/m² al día en todo el año.

Para calcular el número de paneles es necesario tener seleccionado el tipo de panel a utilizar, para este documento se usaron paneles de 310 Wp.

Para calcular la energía total producida por un panel en un día:

$$E_{\text{panel}} = H_{\text{irr}} \cdot P_{\text{mod}}$$

Donde:

E_{panel} : Energía total producida por un panel

H_{irr} : Irradiación mínima anual expresada en kWh / m².día

P_{mod} : Potencia pico del panel expresada en Wp

Aplicando esta fórmula obtenemos:

$$E_{\text{panel}} = H_{\text{irr}} \cdot P_{\text{mod}}$$

$$E_{\text{panel}} = (2,150 \text{ Kw-h /m}^2 \text{ dia}) \cdot 310 \text{ Wp}$$

$$E_{\text{panel}} = 666.5 \text{ W-h / dia}$$

Finalmente calculamos la cantidad de paneles a utilizar usando la fórmula:

$$N_{\text{modulos}} = 1.1 \left(\frac{E_{\text{elec}}}{E_{\text{panel}}} \right)$$

$$N_{\text{modulos}} = 1.1 \left(\frac{4140 \text{ Wh/dia}}{666.5 \text{ Wh/dia}} \right)$$

$$N_{\text{modulos}} = 6.8$$

Para nuestro sistema necesitamos 7 paneles solares de 310 Wp cada uno.

ANEXO D: Cálculo del banco de baterías

Para la selección del banco de baterías adecuado que necesita el sistema y brindarle la capacidad de proveer con la energía necesaria para los dos días de autonomía que se especificaron es:

P_{Dmax}: Profundidad máxima de descarga expresada en tanto por uno en las baterías de plomo ácido suele estar entre 0,6 y 0,8 i en las de Ni/Cd es igual a la unidad.

La energía que debería almacenar en las baterías E_{acu} tras añadir un factor de corrección es:

$$E_{acu} = \frac{1.1 N (E_{elec})}{P_{Dmax}}$$

Donde:

E_{acu} : La energía que debería almacenar las baterías (Wh)

E_{elec} : Consumo total diario expresado en W-h/ día

N: Número de días de autonomía

P_{Dmax} : Profundidad de descarga

Reemplazando valores obtenemos que:

$$E_{acu} = \frac{1.1 N (E_{elec})}{P_{Dmax}}$$

$$E_{acu} = \frac{1.1 (2 \text{ días}) (4140 \text{ Wh/ día})}{0.75}$$

$$E_{acu} = 12144 \text{ Wh}$$

Ahora para la selección de la capacidad de las baterías basta con dividir el valor de energía obtenido para la tensión de la barra DC obteniendo como resultado:

$$C_{bat} = \frac{E_{acu}}{V_{Barra DC}}$$

$$C_{bat} = \frac{12144 \text{ Wh}}{48 \text{ V}}$$

$$C_{bat} = 253 \text{ Ah}$$

Al final se necesitan 4 baterías de 12 V conectadas en serie con una capacidad de 255 A-h.

ANEXO E: Hoja de datos – Bombona de Hidrogeno

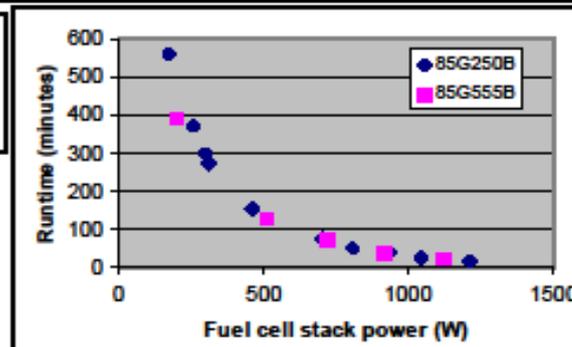
Ovonic® Solid Hydrogen Storage Canister Model 85G250B-NPT / 85G555B-NPT



Shown with optional quick-connect coupling.
Actual appearance may vary.

Technical Specifications		
	Standard high-capacity model 85G250B-NPT	International "air-shippable" model 85G555B-NPT
Hydrogen storage capacity, nominal	80 grams / 900 std. liters (condition dependent)	68 grams / 760 std. liters (condition dependent)
Diameter	3.5 in. / 89 mm	
Length	15.1 in. / 384 mm (16.5 in. / 419 mm w/ coupling)	
Weight	14 lbs. / 6.5 kg	
Rated discharge	6 slpm / 600 watts	
Re-filling	Charges in approximately 8 hours at 250psig in flowing ambient air.	
Operating temperature	32-167°F / 0-75°C	
Storage temperature	-20-130°F / -29-54°C	
		*for air shipment, all hydrogen must be desorbed. Cargo aircraft only.

Typical desorption performance in RT air flowing at 6 m/sec



Ovonic Hydrogen Systems LLC

A Subsidiary of Energy Conversion Devices, Inc.

2983 Waterview Drive, Rochester Hills, MI 48309

Tel: (248) 293-8772 Fax: (248) 299-4520

www.ovonic-hydrogen.com

03/08

ANEXO F: Hoja de datos - PEMFC



Controller

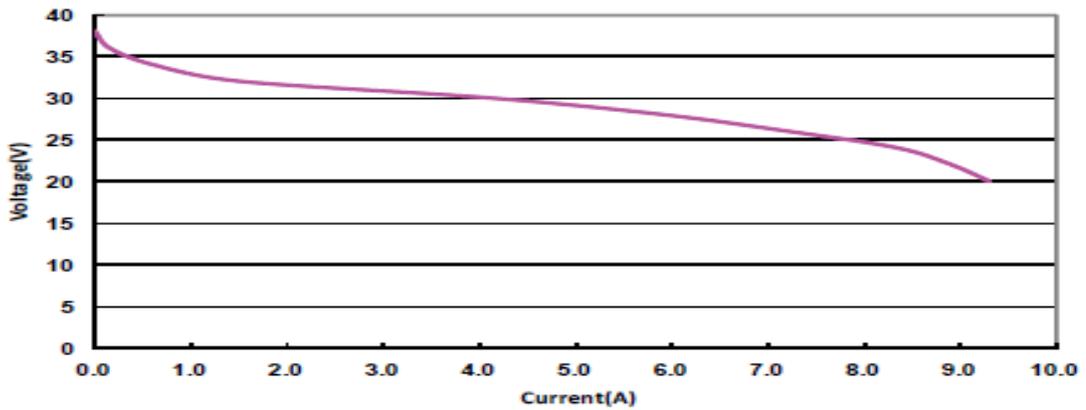
Semi-integrated 200W fuel cell system

- Includes:
- Connections/Tubing
 - Electronic valves
 - Electronic control box
 - 200W stack with blower
 - Fuel cell ON/OFF switch
 - SCU ON/OFF switch

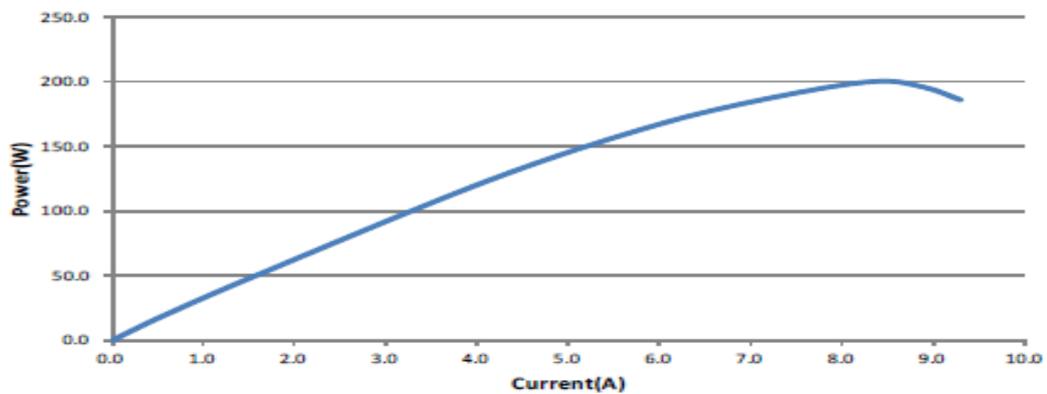
H-200 FCS-C200 200W

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	40
Rated power	200W
Rated Performance	24V@8.3A
Hydrogen supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient temperature	5-30°C(41-86°F)
Max stack temperature	65°C(149°F)
Hydrogen pressure	0.45-0.55Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Stack weight (with fan & casing)	2230g(±50g)
Controller weight	400g(±30g)
Stack size	118x183x94mm
Flow rate at max output	2.6L/min
Hydrogen purity	≥99.995% dry H2
Start up time	≤30s (ambient temperature)
Efficiency of system	40% @24V
Low voltage protection	20V
Over current protection	12A
Over temperature protection	65°C
External power supply	13V(±1V), 5A

200W U-I Curve



200W Power Curve



BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Larminie y A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Jonh Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [2] «National Aeronautics and Sapce Administration,» [En línea]. Available: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>. [Último acceso: Octubre 2014].
- [3] D. SAC, «DeltaVolt,» 2010. [En línea]. Available: <http://deltavolt.pe/energia-renovable/baterias>. [Último acceso: 26 12 2014].
- [4] A. Aseeri, *Modelling and Simulation of Fuel Cell/Photovoltaic Hybrid Power System*, Cranfield University, 2012.
- [5] A. E.-M. M. M. A. A. El-Aal, *Modelling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System*, Germany, Kassel, 2005.

- [6] «Mapas del Mundo,» [En línea]. Available: <http://espanol.mapsofworld.com/continentes/sur-america/ecuador/latitud-y-longitud-de-ecuador.html>.
- [7] C. p. I. I. Energetica, «Atlas Solar Ecuador y Diseño Sistemas Fotovoltaicos,» Agosto 2008. [En línea]. Available: www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf.
- [8] W. Solar, «Wholesale Solar,» [En línea]. Available: <http://www.wholesalesolar.com/products.folder/module-folder/Astronergy/CHSM6612P-310.html>.
- [9] batterystuff, «Solar Photovoltaic (PV) Batteries for Solar Off-Grid Home and Backup Systems,» [En línea]. Available: <http://www.batterystuff.com/batteries/rv-marine/agm/111-and-up-amp-hour/gpl-8da.html>.
- [10] Horizon, «Horizon Fuel Cell Technologies,» [En línea]. Available: <http://www.horizonfuelcell.com/#!h-series-stacks/c52t>. [Último acceso: 12 2014].
- [11] MorningStar, «morningstarcorp,» [En línea]. Available: <http://www.morningstarcorp.com/wp->

content/uploads/2014/02/TSMPT_SPA_R3_9_10web.pdf. [Último acceso: 2014 12 18].

- [12] W. K. a. J. Sachau, Components for Modular Expandable and Adaptable PV Systems, Amsterdam, The Netherlands: EPVSEC, 1994, pp. 1711-1713.