



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“SUMINISTRO HIBRIDO DE ENERGÍA (PV-FC-H2) DE BAJA  
POTENCIA PARA APLICACIÓN EN HOGARES SIN CONEXIÓN  
A RED”.**

**TESINA DE SEMINARIO**

Previa a la obtención del título de:

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

Presentada por:

**ARTURO OSWALDO LUPERA ALVARIO**

**RONNARD LEONEL CAMPOVERDE HIDALGO**

Guayaquil – Ecuador

2015

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia y a mi novia que siempre me dieron apoyo para concluir con mis estudios.

Arturo Oswaldo Lupera Alvario.

Primero agradezco a Dios por darme la oportunidad e iluminarme para poder lograr esta meta, a mis padres por su apoyo día a día para cumplir mis sueños y a toda mi familia por estar siempre conmigo ayudándome en todas mis necesidades.

Ronnald Leonel Campoverde Hidalgo.

## DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado a mi familia.

Arturo Oswaldo Lupera Alvario

Dedico este proyecto a mi familia y en especial a mi hijo.

Ronnald Leonel Campoverde Hidalgo

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

---

Ph.D. WILTON AGILA  
PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

---

ING. FERNANDO VACA  
PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

La responsabilidad del contenido de esta Tesina, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(REGLAMENTO DE GRADUACIÓN DE LA ESPOL)

---

ARTURO OSWALDO LUPERA ALVARIO

C.I.: 120577021-5

---

RONNARD LEONEL CAMPOVERDE HIDALGO

C.I.: 110430852-1

## RESUMEN

Se entiende por suministro de energía híbrida, a la combinación de dos o más tipos de fuentes de energía, en el presente trabajo se propone un sistema híbrido de energía conformado por paneles solares fotovoltaicos, celda de hidrogeno y un banco de baterías como solución para el suministro de energía a una vivienda de bajo consumo energético sin conexión a la red eléctrica convencional. Se presenta las partes y funcionamiento del panel solar, celda de hidrógeno y el tipo de batería más adecuado para la aplicación en vivienda.

El dimensionamiento de los componentes que integran el sistema híbrido de suministro de energía y su respectiva simulación permite analizar diferentes configuraciones y estrategias de activación de uno u otro elemento generador, representa uno de los objetivos de este trabajo.

Además de las simulaciones de los generadores de energía, se presenta el desarrollo del controlador del sistema híbrido de suministro de energía, el cual evalúa las condiciones climáticas (radiación solar) y la demanda de

potencia eléctrica de la carga (según los elementos considerados en un hogar) para direccionar el correcto flujo de energía hacia la misma a través del disparo de los dispositivos semiconductores de los reguladores de tensión.

Las simulaciones realizadas en MatLab facilitan el análisis de independencia de la red eléctrica convencional del sistema de suministro híbrido de energía, por medio de la radiación solar que reciben los paneles solares y la energía eléctrica generada por este será controlada por el controlador para proteger la batería de sobrecargas y suministrar la suficiente energía a la vivienda para su demanda diaria. Por otro lado, la celda de hidrogeno entra en funcionamiento cuando no existe presencia de radiación solar.

Finalmente, el análisis temporal de las respuestas eléctricas del sistema híbrido de energía permite validar la mejor estrategia de control teniendo en consideración el constante flujo de energía hacia la carga.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	I
DEDICATORIA .....	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
SIMBOLOGÍAS .....	XVI
<b>CAPÍTULO 1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3

1.3	OBJETIVOS.....	4
1.3.1	OBJETIVO GENERAL. ....	4
1.3.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	4
1.4	RESULTADOS ESPERADOS.....	5
<b>CAPÍTULO 2.FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>		<b>6</b>
2.1	SISTEMA FOLTOVOLTAICO. ....	6
2.1.1	PANEL FOTOVOLTAICO (PANEL SOLAR). ....	9
2.1.2	TIPOS DE PANELES SOLARES. ....	9
2.1.3	FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO. ....	10
2.1.4	SOLAR CELL. ....	10
2.2	BATERIA.....	11
2.2.1	FUNCIONAMIENTO.....	12
2.2.2	TIPOS DE BATERIAS.....	12
2.2.3	BATTERY.....	13
2.3	EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.....	20

2.3.1	PILA DE COMBUSTIBLE.....	21
2.3.2	ELECTRÓLISIS DEL AGUA.....	23
2.3.3	FUEL CELL STACK.....	24
2.4	CONVERTIDOR DC/DC.....	26
2.4.1	CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL DC-DC DAB.....	26
2.4.2	CONVERTIDOR DC/AC (INVERSOR).....	29
2.4.3	FILTRO LC.....	30
<b>CAPÍTULO 3.DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.....</b>		<b>31</b>
3.1	MODULO FOTOVOLTAICO (PANEL SOLAR).....	32
3.1.1	RADIACION SOLAR GLOBAL.....	33
3.1.2	DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO.....	33
3.2	BANCO DE BATERIAS.....	36
3.3	CELDA DE HIDROGENO.....	38
3.4	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	39

<b>CAPÍTULO 4.DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	41
4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA TOPOLOGIA .....	41
4.2 ETAPA MÓDULO INVERSOR.....	42
4.2.1 DIMENSIONAMIENTO FILTRO LC PARA EL CONVERTIDOR DC/AC.....	42
4.3 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) PANEL SOLAR.....	50
4.4 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) BATTERY .....	54
4.5 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) CELDA DE HIDRÓGENO.....	58
<b>CAPÍTULO 5.PRUEBAS Y EVALUACIÓN</b> .....	63
5.1 PRIMER CASO: CARGA VARIABLE.....	64
5.2 SEGUNDO CASO: CARGA FIJA.....	65
5.3 TERCER CASO: BATERIA AL 100% .....	67
5.4 CUARTO CASO: BATERIA 0% .....	69
5.5 CARGA UTILIZADA EN EL SISTEMA HIBRIDO .....	70

CONCLUSIONES.....	73
RECOMENDACIONES.....	74
ANEXOS.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CON ACUMULADORES (BATERÍAS). FUENTE: [3]. ...	7
FIG. 2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CON ACUMULADORES MEDIANTE HIDRÓGENO. FUENTE: [2]. .....	8
FIG. 2.3 BLOQUE SOLAR CELL DE MATLAB. FUENTE: [6]. .....	11
FIG. 2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE BATTERY DE MATLAB. FUENTE: [5]. .....	13
FIG. 2.5 CURVA CARACTERÍSTICA VOLTAJE VS CAPACIDAD. FUENTE: [5]. .....	14
FIG. 2.6 CURVA TÍPICA DE CARGA DE LAS BATERÍAS. FUENTE: [5]. .....	15
FIG. 2.7 CURVAS DE CARGA Y DESCARGA VOLTAJE VS SOC. FUENTE: [5]. .....	16
FIG. 2.8 ESPECIFICACIONES TÍPICAS DE DESCARGA DE LA BATERÍA. FUENTE: [5]. ...	16
FIG. 2.9 PARÁMETROS PARA LA BATERÍA EN MATLAB. FUENTE: [5]. .....	18
FIG. 2.10 PROCESO DE LA GENERACION DE ELECTRICIDAD CELDA DE COMBUSTIBLE [12]. .....	21
FIG. 2.11 TIPOS DE COMBUSTIBLE [12]. .....	22
FIG. 2.12 MODELO SIMPLIFICADO DE FUEL CELL STACK EN MATLAB. FUENTE: [7]. ...	24
FIG. 2.13 GRAFICA VOLTAJE VS CORRIENTE DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: [7]. .....	25
FIG. 2.14 CURVA DE VOLTAJE VS POTENCIA. FUENTE: [7]. .....	26
FIG. 2.15 BLOQUE DAB. ....	27
FIG. 2.16 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONVERTIDOR DC/AC. ....	29
FIG. 2.17 CIRCUITO FILTRO LC. ....	30
FIG. 3.1 PANEL FOTOVOLTAICO A USARSE EN EL PROYECTO. FUENTE: [11]. .....	34
FIG. 3.2 BATERIA A USARSE EN EL PROYECTO. FUENTES: [11]. .....	37
FIG. 3.3 CELDA DE COMBUSTIBLE A USARSE EN EL PROYECTO. FUENTE: [14]. .....	39
FIG. 4.1 SISTEMA HIBRIDO DE ENERGÍA (PV-FC-H2). ....	42
FIG. 4.2 MODULO INVERSOR FILTRO LC. ....	43

FIG. 4.3 VOLTAJE DE ENLACE DC.....	44
FIG. 4.4 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE $I_L$ .....	45
FIG. 4.5 SEÑAL DE VOLTAJE $V_L$ CON SU INTEGRAL .....	46
FIG. 4.7 CIRCUITO CALCULO DEL CAPACITOR DEL ENLACE. ....	47
FIG. 4.6 CIRCUITO DE COMPROBACIÓN DE SEÑALES DE VOLTAJE Y RIZO DE .....	47
FIG. 4.8 GRAFICAS DE LAS CORRIENTES DEL CAPACITOR PROMEDIO. ....	48
FIG. 4.9 ÁREA POSITIVA DE $I_C$ A INTEGRAR.....	49
FIG. 4.10 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) PANEL SOLAR.....	51
FIG. 4.11 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC PANEL SOLAR.....	51
FIG. 4.12 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE $I_{Cpv}$ .....	53
FIG. 4.13 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) BATTERY.....	55
FIG. 4.14 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC BATTERY.....	55
FIG. 4.15 GRAFICA PARA DISEÑAR EL CAPACITOR $C_{BAT}$ .....	57
FIG. 4.16 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE $I_{bat}$ .....	57
FIG. 4.17 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) CELDA DE HIDRÓGENO. ....	59
FIG. 4.18 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC CELDA DE HIDRÓGENO .....	59
FIG. 4.19 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE $I_{ceh}$ .....	61
FIG. 5.1 GRAFICADOR DE LA CARGA VARIABLE. ....	64
FIG. 5.2 GRAFICAS CON LA CARGA VARIABLE.....	64
FIG. 5.3 GRAFICADOR DE LA CARGA FIJA. ....	65
FIG. 5.4 GRAFICAS CON LA CARGA FIJA.....	66
FIG. 5.5 GRAFICADOR DE VOLTAJES.....	67
FIG. 5.6 GRAFICAS DE LOS VOLTAJES [V] VS EL TIEMPO [SEG] CON LA BATERÍA AL 100%. ....	67
FIG. 5.7 GRAFICAS DE LOS VOLTAJES [V] VS EL TIEMPO [SEG] CON LA BATERÍA AL 0%. ....	69
FIG. 5.8 ESTADO DE LA CARGA VOLTAJE - CORRIENTE – POTENCIA.....	70

FIG. 5.9 PULSO HECHO MEDIANTE EL GENERADOR E PULSO PARA VARIAR LA CARGA.....	71
FIG. 5.10 CIRCUITO DE LA CARGA VARIABLE DE LA VIVIENDA.....	71
FIG.5.11 POTENCIA DE SALIDA.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA. 1 DIFERENCIAS ENTRE LOS PANELES SEGÚN LA TECNOLOGÍA DE LA FABRICACIÓN. FUENTE:[3].....	9
TABLA. 2 TIPOS DE BATERÍAS CON SUS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS. FUENTE: [3].....	13
TABLA. 3 PARÁMETROS DE LA BATTERY DE MATLAB FUENTE:[5]. .....	14
TABLA. 4 TÍPICAS DE DESCARGA DE LA BATERÍA. FUENTE: [5]. .....	17
TABLA. 5 PROPIEDADES DE TERMODINÁMICAS, FUENTE: [19]. .....	23
TABLA. 6 CONSUMO EN [WH/DÍA] DE LAS CARGAS EN LA VIVIENDA.....	32
TABLA. 7 RADIACION SOLAR GLOBAL PROVINCIA DE LOS RIOS. ....	33
TABLA. 8 CARACTERÍSTICAS DE MODULO FOTOVOLTAICO [11]. .....	34
TABLA. 9 CARACTERISTICAS DE LA BATERIA USADA [11]. .....	36
TABLA. 10 CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE A USARSE[14]. ....	39
TABLA. 11 COSTO DE EQUIPOS DEL SISTEMA HIBRIDO (PV-FC-H2).....	40

## SIMBOLOGÍAS

W VATIO / WATTS

DC CORRIENTE DIRECTA

AC CORRIENTE ALTERNA

HZ HERTZ

H/DIA HORA POR DIA

WH/DIA VATIO HORA POR DIA

$Q_{crT}$  CARGA CRITICA TOTAL

SFD SISTEMA FOTOVOLTAICO DOMICILIARIO

FV FOTOVOLTAICO

VTP VOLTAJE TOTAL DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

VNP VOLTAJE NOMINAL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

$N_p$  CANTIDAD DE MODULOS EN PARALELO

$N_T$  CANTIDAD DE MODULOS TOTAL

$N_s$  CANTIDAD DE MODULOS EN SERIE

$P_{MPP}$  POTENCIA PICO DEL MODULO

$HPS_{cr}$  HORAS DE SOL DEL MES

PR FACTOR GLOBAL DE FUNCIONAMIENTO

$Q_{nB}$  CAPACIDAD NOMINAL DE LA BATERÍA

$B_s$  BATERIA SERIE

$V_{nB}$  VOLTAJE NOMINAL DE LA BATERIA

$B_p$  BATERIAS PARALELO

$V_{nS}$	VOLTAJE NOMINAL DEL SISTEMA
$Q_{TB}$	CARGA TOTAL DE LAS BATERIAS

# **CAPÍTULO 1**

## **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema de la red convencional es la caída de voltaje que existe en las horas pico, porque esta es distribuida para varios sectores, generando a su vez inconformidad por parte de los usuarios ya que se ven afectados por la deficiencia del servicio eléctrico, lo que conlleva a daños de electrodomésticos, incluso afectando a los negocios que producen ingresos por medio del uso de la electricidad.

Sin dejar atrás algo muy importante que es el tema ambiental, debido a que el consumo de energía cada día va en constante aumento y por ende los recursos naturales que son empleados para la generación de energía van

disminuyendo notablemente.

Con este Suministro Híbrido de Energía nos ayuda notablemente a mejorar en el aspecto económico llamado también como sistema de autoconsumo sistema que nos ayuda para generar electricidad para la demanda de una vivienda sin utilizar la red eléctrica.

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La energía eléctrica es indispensable en un hogar para que sus habitantes puedan tener todas las comodidades existentes en la actualidad, ya sea para la iluminación, comunicación, seguridad, etc. Y, esta energía se obtiene ya sea mediante la red eléctrica convencional o fuentes alternativas de energía, preferentemente las energías renovables que al combinarlas se obtiene la energía híbrida (eólica, solar, hidrogeno, etc.) que es más limpia que las convencionales y ayudan a la conservación del ambiente porque estas no emanan gases contaminantes como las energías convencionales (petróleo, gas, carbono etc.) Sin embargo, en Ecuador no se da la respectiva importancia debido al desconocimiento del uso de estos elementos o por miedo al riesgo a la innovación en estas fuentes alternativas.

La energía híbrida es una combinación de dos o más fuentes diferentes para suministrar potencia eléctrica estable a una determinada carga que se encuentra sin conexión a la red ya sea porque esta se encuentra lejos del alcance o porque el usuario busca independencia de la Empresa Eléctrica.

En este contexto, el presente proyecto emplea las siguientes fuentes de generación de energía eléctrica: panel fotovoltaico, celda de combustible que mediante la utilización de estos y la ayuda de un banco de baterías se pueda dotar de energía eléctrica a una vivienda sin conexión a la red eléctrica, durante el día con el panel fotovoltaico y en la noche o cuando haya ausencia de luz solar con pila de combustible y/o el banco de baterías.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Las energía renovables son obtenidas de los recursos naturales que se consideran inagotables tales como son el sol, el viento, el agua, recursos que son obtenidos del planeta y disponibles para ser utilizados de manera apropiada, siendo estas unas de las alternativas para obtener energía eléctrica, muy al contrario de los recursos no renovables que aparte de no

ser reutilizable atentan considerablemente contra la naturaleza. Es por ello que se ha decidido desarrollar este proyecto, como punto de partida para demostrar las bondades que presenta la utilización de energías híbridas como recurso para dotar de energía a una vivienda y como una de las mejores opciones para no contaminar al ambiente.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar mediante simulación diferentes configuraciones y estrategias de activación que permitan determinar la mejor solución híbrida para el suministro de energía a una pequeña vivienda sin conexión a red.

#### **1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS**

- Suministrar energía, a una vivienda donde la red eléctrica convencional no llega.
- Analizar la evolución temporal de la respuesta eléctrica del sistema híbrido de energía suministrando la potencia demandada por la carga (vivienda).
- Dimensionado de los elementos.
- Diseño del controlador.

- Informe económico del sistema híbrido.

#### **1.4 RESULTADOS ESPERADOS**

Informe económico – técnico del sistema de suministro.

Informe en detalle para la adquisición de los dispositivos necesarios.

Diseño funcional y sencillo del sistema híbrido de suministro de energía que permita energizar una carga variable durante las 24 horas del día o el tiempo necesario que ésta lo requiera.

Análisis mediante simulaciones utilizando características de elementos reales para así evaluar su costo al adquirir este sistema en la realidad.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 FUNDAMENTO TEÓRICO**

En este capítulo se muestran conceptos teóricos, tales como: sistema fotovoltaico, celda de combustible, banco de baterías, temas primordiales que sirven para dar justificación y afianzar los criterios del proyecto sobre el sistema híbrido de suministro de energía propuesto para suministrar de potencia eléctrica a una vivienda sin conexión a red.

#### **2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO**

El sistema fotovoltaico es la unión de componentes que generaran energía a través de la luz solar, la misma que se la acondiciona y almacena para ser

distribuida a sus puntos [1].

El tiempo que se toma en proporcionar la energía dependerá de la radiación solar, la inclinación u orientación de los paneles o la cantidad de paneles solares utilizados. Si deja de iluminar se pierde la energía. Por tanto, un sistema fotovoltaico, en la mayoría de las aplicaciones, debe de incluir un subsistema de acondicionamiento eléctrico y almacenamiento de energía. Por lo general, el acondicionamiento eléctrico se realiza por medio de dispositivos electrónicos (seguidores de máxima potencia, controladores de carga e inversores CD/CA), cuya función es acoplar el generador fotovoltaico con las cargas eléctricas a alimentar. Por otra parte, la retención de energía se la realiza con acumuladores (baterías) [1], como se puede apreciar en la FIG.2.1.



FIG. 2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CON ACUMULADORES (BATERÍAS). FUENTE: [3].

Sin embargo, hay métodos de almacenamiento de energía más ecológico como lo es la producción de hidrógeno a partir de agua por medio de electrólisis como se muestra en la Fig.2.2.

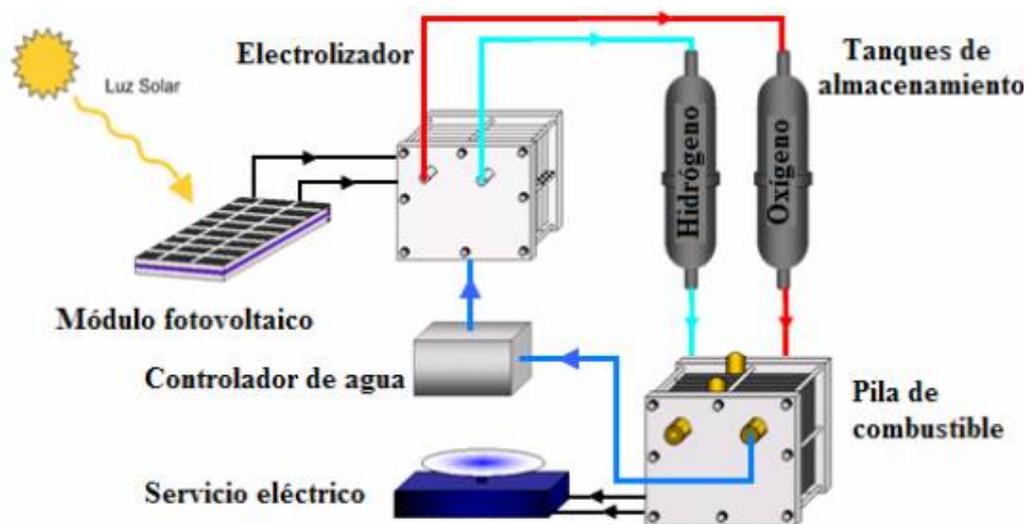


FIG. 2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CON ACUMULADORES MEDIANTE HIDRÓGENO. FUENTE: [2].

De esta manera la conversión del hidrógeno almacenado a energía eléctrica se realiza mediante el uso de las celdas de combustible. La energía generada por la celda es en corriente continua, por lo que es necesario un inversor para transformar la corriente continua a corriente alterna a 60 Hz, para ser compatible con los dispositivos de uso final, que son conectados a la red eléctrica[1].

### 2.1.1 PANEL FOTOVOLTAICO (PANEL SOLAR)

Un módulo fotovoltaico o panel solar (FV) es un grupo de celdas solares independientes conectadas eléctricamente entre sí, que proporciona en su salida de conexión un voltaje continuo (VDC) [3].

El ciclo de vida del panel solar puede variar entre 25 y 30 años, dependiendo del tipo del panel Fotovoltaico [4].

### 2.1.2 TIPOS DE PANELES SOLARES

Los tipos de paneles solares varían dependiendo la tecnología que los caractericen: silicio cristalino (monocristalinos, policristalinos) y amorfo, Tabla.1.

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

TABLA. 1 DIFERENCIAS ENTRE LOS PANELES SEGÚN LA TECNOLOGÍA DE LA FABRICACIÓN.

FUENTE: [3].

Si se habla de eficiencia en lo que respecta a paneles solares, el monocristalino tiene una ventaja mayor porque tiene un porcentaje de entre el 12% al 15% de eficiencia. Mientras que el policristalino mantiene una eficiencia del 11% a 14%, en tanto el amorfo siendo el más económico lleva un porcentaje de eficiencia del 6% al 7%.

### **2.1.3 FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO**

Los módulos o paneles fotovoltaicos basan su funcionamiento en un principio fotoeléctrico parecido al que usan las plantas en el proceso de la fotosíntesis. Las plantas son capaces de generar sustancias orgánicas a partir de la luz solar que incide sobre ellas, de la misma manera funcionan los módulo fotovoltaicos, solo que en vez de producir sustancias orgánicas estos generan electricidad, por eso este proceso es conocido como proceso fotoeléctrico[8]. A continuación se describe el modelo fotovoltaico usado en Matlab.

### **2.1.4 SOLAR CELL**

El bloque solar cell de matlab representa una fuente de corriente solar como se puede evidenciar en la Fig.2.3.

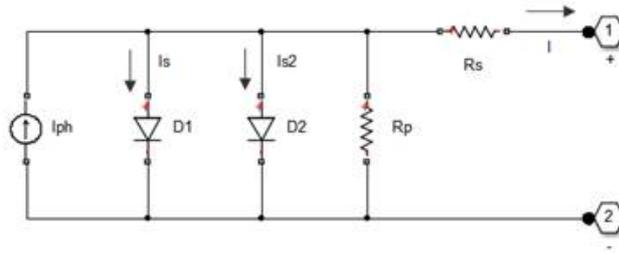


FIG. 2.3 BLOQUE SOLAR CELL DE MATLAB. FUENTE: [6].

## 2.2 BATERIA

Una batería es esencialmente un recipiente lleno de químicos que producen electrones. Las reacciones químicas son capaces de producir electrones y este fenómeno es llamado reacción electroquímica. En los llamados sistemas solares autónomos o sistemas fotovoltaicos domiciliarios (SFD), las baterías almacenan electricidad que será utilizada durante la noche. Así mismo, suministran electricidad durante periodos de escasez o ausencia de luz solar, necesaria para que el panel solar produzca energía [4].

La duración del periodo que puede ser cubierto está determinada por la demanda de electricidad y el tamaño de la batería de almacenamiento. Las baterías están disponibles en diversas formas y tamaños. Las de 12V son las más utilizadas. Si las baterías son nuevas y son del mismo tipo y tamaño, pueden ser conectadas para incrementar la capacidad del almacenamiento de

batería [4].

### **2.2.1 FUNCIONAMIENTO**

Si se examina una batería, esta tiene dos terminales. Una terminal está marcada (+) positivo mientras la otra está marcada (-) negativo [4].

Los electrones se agrupan en la terminal negativa de la batería. Si se conecta un cable entre las terminales positivas y negativas, los electrones pasarán de la terminal negativa a la positiva tan rápido como puedan (y descargarán a la batería muy rápido esto también tiende a ser peligroso, especialmente con baterías grandes, así que no es algo que debería hacer) [4].

### **2.2.2 TIPOS DE BATERIAS**

En la tabla 2 se puede observar los tipos de baterías con sus respectivas características:

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga	Autodescarga por mes	N.º de ciclos	Capacidad (por tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8-16 horas	< 5 %	Medio	30-50 Wh/kg	Bajo
Ni-Cd (níquel-cadmio)	1,2	1 hora	20 %	Elevado	50-80 Wh/kg	Medio
Ni-Mh (níquel-metal hydride)	1,2	2-4 horas	20 %	Medio	60-120 Wh/kg	Medio
Li ion (ión litio)	3,6	2-4 horas	6 %	Medio - bajo	110-160 Wh/kg	Alto

TABLA. 2 TIPOS DE BATERÍAS CON SUS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS. FUENTE: [3].

### 2.2.3 BATTERY

Este bloque implementa un modelo genérico parametrizado dinámico para representar los modelos más populares de baterías recargables.

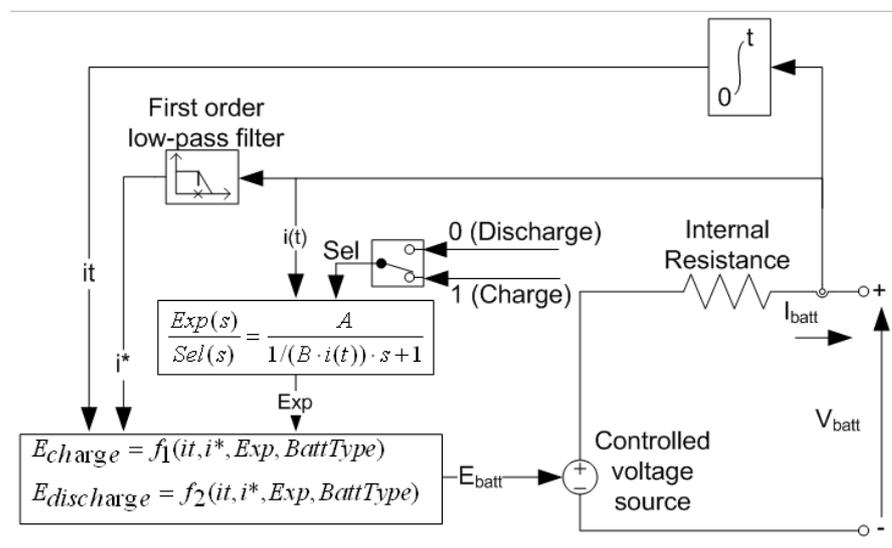


FIG. 2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE BATTERY DE MATLAB. FUENTE: [5].

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>
$i^* > 0$	Modelo de descarga
$i^* < 0$	Modelo de carga
$i^*$	Corriente dinámica de baja frecuencia
$i$	Corriente de la batería
$it$	Capacidad extraída (Ah)
$Q$	capacidad máxima de la batería en Ah (amperios hora)

TABLA. 3 PARÁMETROS DE LA BATTERY DE MATLAB. FUENTE:[5].

A continuación se muestra en la figura 2.5 una curva característica Voltaje vs Capacidad.

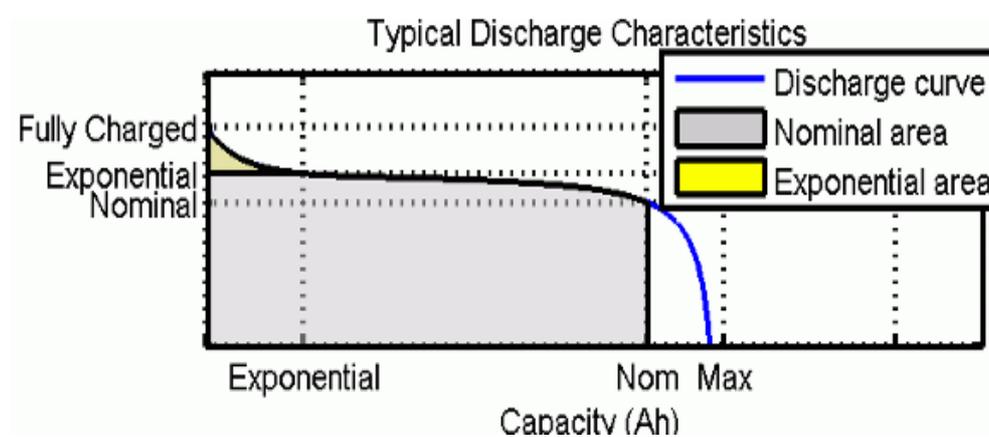


FIG. 2.5 CURVA CARACTERÍSTICA VOLTAJE VS CAPACIDAD. FUENTE: [5].

- Sección 1 de la figura 2.5.

Caída exponencial de voltaje cuando se carga la batería.

- Sección 2 de la figura 2.5.

Representa la potencia que se puede extraer de la batería hasta que el voltaje llegue a su valor nominal.

- Sección 3 de la figura 2.5.

Representa la descarga total de la batería cuando su voltaje cae rápidamente.

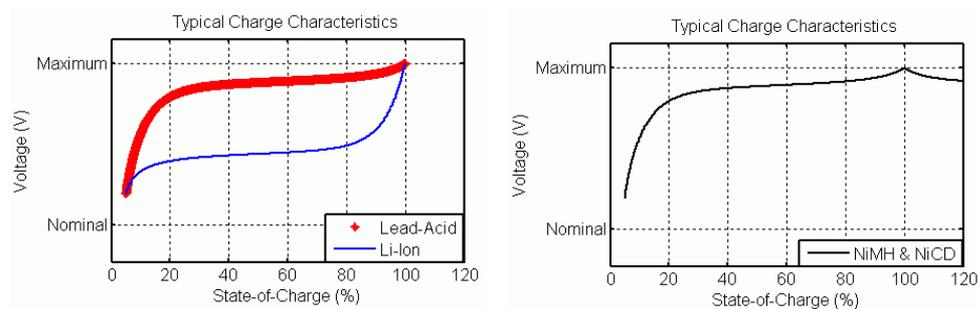


FIG. 2.6 CURVA TÍPICA DE CARGA DE LAS BATERÍAS. FUENTE: [5].

Donde podemos observar que ambas llegan a voltaje máximo al 100% de carga pero la de ion litio demora un poco más que la de plomo.

El lazo de histéresis de carga y descarga se puede observar a continuación:

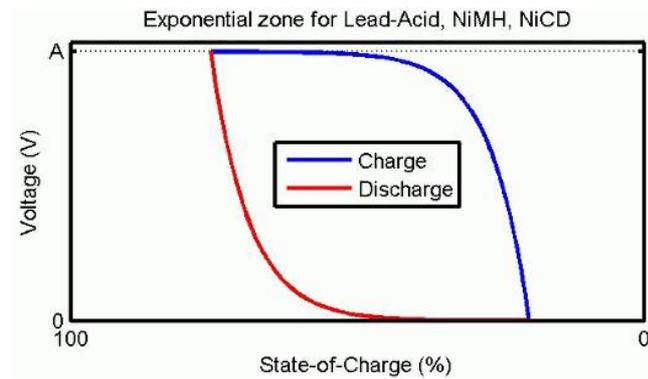


FIG. 2.7 CURVAS DE CARGA Y DESCARGA VOLTAJE VS SOC. FUENTE: [5].

Se carga y descarga de manera exponencial.

A continuación se muestra como a partir de una hoja de datos de una batería Panasonic de NIMH y su curva de descarga podemos entender mejor el modelo [5].

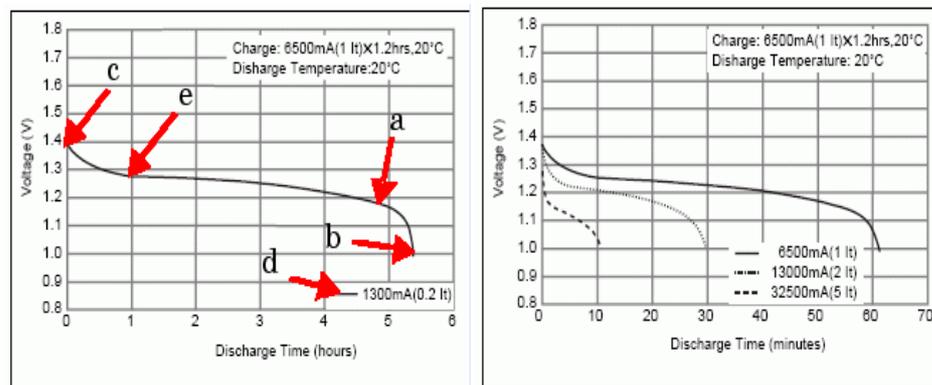


FIG. 2.8 ESPECIFICACIONES TÍPICAS DE DESCARGA DE LA BATERÍA. FUENTE: [5].

Nominal Voltage		1.2V		
Discharge Capacity*	Average**	6800 mAh		
	Rated (Min.)	6500 mAh		
Approx. Internal impedance at 1000Hz at charged state.		2mΩ		
Charge	Standard	650mA (0.1It) x 16hrs.		
	Rapid	6500mA (1It) x 1.2 hrs.		
Ambient Temperature	Charge	Standard	°C	°F
			0°C to 45°C	32°F to 113°F
	Rapid	0°C to 40°C	32°F to 104°F	
		Discharge		-10°C to 65°C
	Storage	< 2 years	-20°C to 45°C	-4°F to 113°F
< 6 months		-20°C to 55°C	-4°F to 131°F	

TABLA. 4 TÍPICAS DE DESCARGA DE LA BATERÍA. FUENTE: [5].

$Q = 6.5 \text{ Ah}$  mínimo en promedio serían  $6.8 \text{ Ah}$ .

$R_{\text{interna}} = 0.002 \text{ ohm}$ .

Voltaje nominal=  $1.2 \text{ voltios}$  o  $1.18$  para ser más exacto (esto se ve en la curva de descarga).

Capacidad máxima= (tiempo total de descarga hasta llegar a la corriente mínima\*la corriente mínima).

$Q_{\text{max}} = 5.4 \text{ horas} * 1.3 \text{ A} = 7.02 \text{ Ah}$ .

$V_{\text{max}} = 1.38 \text{ voltios}$ .

$Q \text{ a voltaje nominal} = 6.25 \text{ Ah}$ .

Igual si se activa la opción de ver las curvas se obtienen varias y se pueden comparar con las gráficas de las hojas de datos. A mayor corriente mínima de

descarga el tiempo de descarga será menor, es decir si la demanda de corriente es menor entonces durara más tiempo que en la realidad [5].

Ahora si le deseamos añadir celdas o baterías en serie o paralelo, es sencillo solo se multiplica el número de celdas en serie por el voltaje nominal, y se multiplica el número de celdas en paralelo por la  $Q_{nominal}$  [5]. Así:

The screenshot shows the 'Parameters' tab of a MATLAB battery model configuration window. The 'Battery type' is set to 'Nickel-Metal-Hydrate'. The parameters are as follows:

Parameter	Value
Nominal Voltage (V)	$1.18 * Nb\_ser$
Rated Capacity (Ah)	$6.5 * Nb\_par$
Initial State-Of-Charge (%)	100
<input type="checkbox"/> Use parameters based on Battery type and nominal values	
Maximum Capacity (Ah)	$7 * Nb\_par$
Fully Charged Voltage (V)	$1.39 * Nb\_ser$
Nominal Discharge Current (A)	$1.3 * Nb\_par$
Internal Resistance (Ohms)	$0.002 * Nb\_ser / Nb\_par$
Capacity (Ah) @ Nominal Voltage	$6.25 * Nb\_par$
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[ $1.28 * Nb\_ser$ $1.3 * Nb\_par$ ]

FIG. 2.9 PARÁMETROS PARA LA BATERÍA EN MATLAB. FUENTE: [5].

En el bloque se tiene una salida "m" la cual nos arroja señal de SOC que es el estado de carga de la batería, la corriente de la batería y el voltaje.

El SOC se calcula así:

$$SOC = 100(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt) \quad (2.1).$$

$$F=ma \quad (2.2).$$

$$V=RI \quad (2.3).$$

A continuación analicemos las suposiciones del modelo pues recordemos la frase “todos los modelos están mal, tan solo unos cuantos funcionan”

- ✓ La resistencia interna no varía se considera constante todo el tiempo.
- ✓ Los parámetros del modelo se deducen a partir de la curva de descarga y son los mismos para cuando se carga.
- ✓ La capacidad de la batería no cambia por la amplitud de la corriente.
- ✓ El modelo no toma en cuenta el efecto de la temperatura.
- ✓ No se representa el auto descarga de la batería, pero se la puede representar con una resistencia bien alta en paralelo a los terminales de la batería.
- ✓ La batería no tiene efecto memoria.

Dentro de las limitaciones:

El voltaje mínimo de la batería es 0 v y el máximo es 2Eo.

La Qmin=0 Ah y la máxima es Qmax [5].

### **2.3 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE**

El hidrógeno es una energía renovable y sustentable, que puede obtenerse a partir de fuentes de energías fósiles o renovables y destinarse a la generación de electricidad, al transporte vehicular, a otros usos industriales y domésticos. El hidrógeno es sin duda el combustible del futuro; produce una contaminación mínima o nula, dependiendo del proceso por el cual se obtiene y genera más trabajo por unidad de masa que cualquier otro combustible, incluyendo al gas natural. Puede además emplearse en celdas de combustible que generan electricidad y calor mediante una reacción de oxidación sin combustión cuyo producto es el agua [1].

El hidrogeno está siempre de forma enlazada en el ambiente en compuestos orgánicos y el agua. Se puede producir hidrogeno de varias fuentes entre ellas están el carbón, gas natural, gas licuado del petróleo , propano, metano, gasolina, diesel ligero, residuo pesado, biomasa seca, biomasa derivada de combustibles líquidos tales como(metanol, etanol, biodiesel ), nuclear, así como del agua [2].

### 2.3.1 PILA DE COMBUSTIBLE.

Una pila de combustible, como también llamada celda de combustible puede producir por medio del hidrogeno y del oxígeno, la electricidad en una forma corriente continua o calor. Este es un proceso adicional que servirá en este proyecto para la suministración de energía a la vivienda [12].

La pila de combustible consta de diversas partes entre ellas están:

- Electrodo (ánodo, donde se reduce el H<sub>2</sub> y cátodo, donde reacciona H<sup>+</sup> y O<sub>2</sub>).
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones H<sup>+</sup> al cátodo y separa los e<sup>-</sup>).
- Placas bipolares (que separan las celdas, “conducen” los gases y evacúan H<sub>2</sub>O).

Una pila de combustible es una asociación de celdas de combustible.

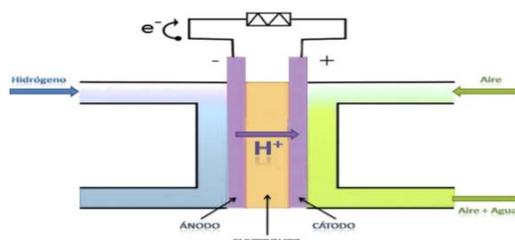


FIG. 2.10 PROCESO DE LA GENERACION DE ELECTRICIDAD CELDA DE COMBUSTIBLE [12].

Las reacciones que surgen en cada uno de los electrodos son:

Reacción en el ánodo:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ .

Reacción en el cátodo:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ .

Reacción global:  $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ .

En la ubicación del ánodo, el hidrógeno que llega se descompone en protones y electrones. Los protones son enviados por medio de la membrana al cátodo, de esta manera los electrones van hacia un circuito externo produciendo energía. En el lado del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones y protones para formar el agua [12].

A continuación se presenta los tipos de combustible según su función en la temperatura y electrolito en la siguiente ilustración fig.2.11.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolito	Membrana de Polímero Sólido	Solución Alcalina	Ácido Fosfórico	Carbonatos Fundidos	Óxido Sólido	Membrana de Polímero Sólido
Temperatura Trabajo (°C)	60 – 80	100 – 120	200 – 250	600 – 700	800 – 1000	50 -120
Combustible	Hidrógeno	Hidrógeno	Hidrógeno Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural	Metanol
Ventajas	Baja Tª Arranque rápido Baja corrosión y mantenimiento	Mayor eficiencia Reacción catódica más rápida	Acepta H2 con 1% de CO	Reformado interno Cogeneración	Reformado interno Cogeneración	No necesita reformador de combustible
Aplicaciones	Transporte Portátiles Residencial	Espaciales	Generación eléctrica distribuida Automoción	Generación eléctrica	Generación eléctrica	Portátiles

FIG. 2.11 TIPOS DE COMBUSTIBLE [12].

### 2.3.2 ELECTRÓLISIS DEL AGUA

Por medio de la energía suministrada por el panel solar el agua (H<sub>2</sub>O) se puede disociar en moléculas diatómicas de Hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), la electrólisis de un mol de agua se produce un mol de gas hidrógeno y medio mol de gas oxígeno.

Un detallado análisis del proceso, muestra el uso de los potenciales termodinámicos, la cual este lleva a 298°K y una atmosfera de presión, se presenta una tabla 5 de propiedades de termodinámicas [19]:

Cantidad	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	0,5 O <sub>2</sub>	Cambio
Entalpía	-285,83 kJ	0	0	ΔH = 285,83 kJ
Entropía	69,91 J/K	130,68 J/K	0,5 x 205,14 J/K	TΔS = 48,7 kJ

TABLA. 5 PROPIEDADES DE TERMODINÁMICAS, FUENTE:[19].

Este proceso debe proveer la energía para la disociación, más la energía para expandir los gases producidos, estos están incluidos en la tabla 5.

Estos están incluidos en el cambio de entalpía de la tabla de arriba, a una temperatura de 298°K y una atmósfera de presión, donde el trabajo es:

$$W = P\Delta V \quad (2.4).$$

En este proceso se produce un cambio en la energía interna, debe estar acompañado por la expansión de los gases producidos, la cual representa la

energía necesaria para llevar a cabo la electrólisis.

### 2.3.3 FUEL CELL STACK

Ese bloque implementa un modelo genérico de celda de hidrogeno, y que permite simular los siguientes tipos de celda de hidrogeno: Protón Exchange membrane fuel cell (PEMFC), Solid oxide fuel cell (SOFC), alkaline fuel cell (AFC) [7].

Estos son alimentados con hidrogeno y aire. Y podemos elegir el modelo simplificado.

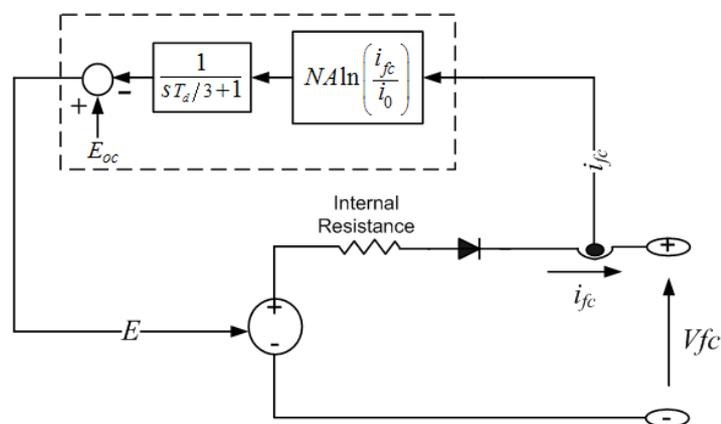


FIG. 2.12 MODELO SIMPLIFICADO DE FUEL CELL STACK EN MATLAB. FUENTE: [7].

El modelo simplificado representa una celda particular operando a

condiciones nominales de temperatura y presión. Los parámetros de este circuito equivalente pueden ser modificados basándonos en la curva de polarización que viene en las hojas de especificaciones del fabricante. Se debe ingresar el valor de voltaje a 0 y 1 Amperios. También los puntos de operación nominal y máximo y con eso se calculan los parámetros, además se usa un diodo para prevenir que fluya una corriente negativa dentro de la pila de hidrogeno. Una curva típica de polarización consiste en tres regiones: Región de activación.- representa la activación por caída de voltaje debido a la lentísima reacción química que toma lugar en la superficie del electrodo [7].

Dependiendo de la temperatura, presión, electrodo, tipo de catalizador utilizado esta región puede ser más o menos ancha. La segunda zona o región óhmica representa las pérdidas resistivas debido a la resistencia interna de la pila de combustible. La tercera región representa a las perdidas por transporte de masa resultantes del cambio en concentración de los reactantes como el combustible que se usa [7].

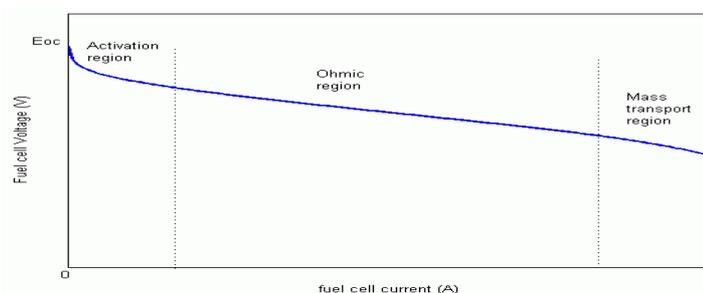


FIG. 2.13GRAFICA VOLTAJE VS CORRIENTE DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE. FUENTE: [7].

A continuación mostramos una hoja de datos del fabricante:

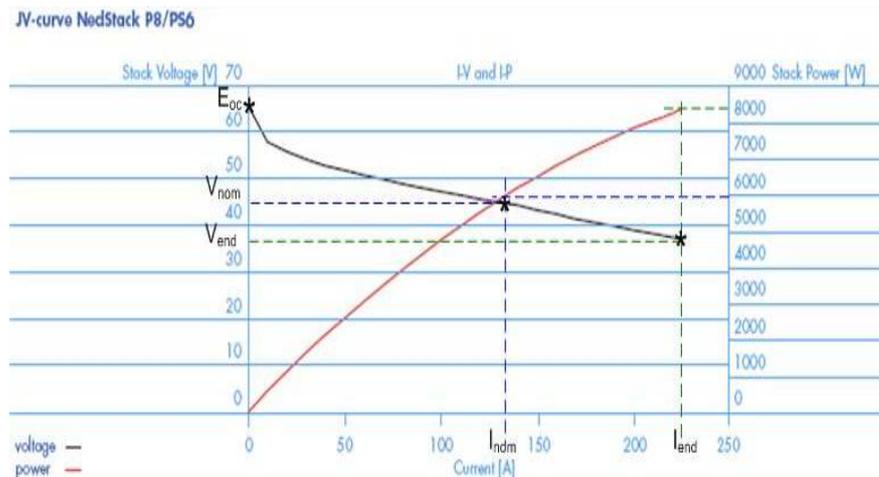


FIG. 2.14 CURVA DE VOLTAJE VS POTENCIA. FUENTE: [7].

## 2.4 CONVERTIDOR DC/DC

El convertidor DC-DC tiene como función suministrar un voltaje de salida regulado desde un voltaje de entrada no regulado, la cual este voltaje de salida de estos convertidores es controlado mediante la conmutación de los interruptores de potencia [15].

### 2.4.1 CONVERTIDOR BIDIRECCIONAL DC-DC DAB

Estos convertidor es permiten un flujo de potencia bidireccional entre dos fuentes de voltajes DC, enlaces DC de alta y de baja, de diferentes niveles de voltaje [16]. El DAB (por sus siglas en ingles Dual Active Bridge), son:

dos fuentes de voltaje DC, dos capacitores, dos convertidores PWM de puente completo conformados por IGBT's, los cuales permiten el flujo bidireccional.

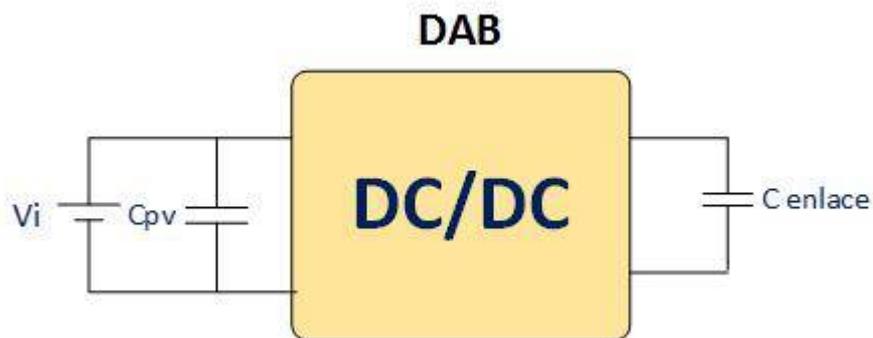


FIG. 2.15 BLOQUE DAB.

El Convertidor DAB tiene dos modos de operación:

- Modo de operación hacia adelante, en el cual la potencia se transfiere desde la fuente de alto voltaje DC hacia el lado de la fuente de bajo voltaje DC, en este modo de operación uno de los convertidores activos de puente completo del DAB opera como inversor mientras que el otro convertidor opera como rectificador, en este modo de operación, el transformador de alta frecuencia convierte una onda cuadrada de voltaje aplicada en el devanado primario por el inversor.
- Modo de operación hacia atrás, en el cual la potencia se transfiere

desde la fuente de bajo voltaje DC hacia la fuente de alto voltaje DC, durante este modo de operación los convertidores activos de puente completo invierten su funcionalidad [17].

Mediante la técnica de modulación del desplazamiento de fase se puede controlar el intercambio de la potencia del DAB mediante la siguiente ecuación (2.5):

$$P_{DAB} = \frac{HVDC * LVDC'}{2\pi * f_s * L_{DAB}} \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi}\right) \quad (2.5).$$

$HVDC$ : es el valor de la fuente de voltaje en el lado de alta.

$LVDC'$ : es el valor de la fuente de voltaje en el lado de baja referido al lado de alta.

$f_s$ : es la frecuencia de conmutación de los IGBTs.

$L_{DAB}$ : es la inductancia de fuga del transformador.

Si  $\phi > 0$  entonces el flujo de potencia es positivo.

Si  $\phi < 0$  entonces el flujo de potencia es negativo.

## 2.4.2 CONVERTIDOR DC/AC (INVERSOR)

La función del convertidor dc-ac, conocido también como inversor, es convertir un voltaje DC a un voltaje AC con magnitud y frecuencia variable[18].

Se muestra en la figura 2.16 el esquemático del Convertidor DC/AC:

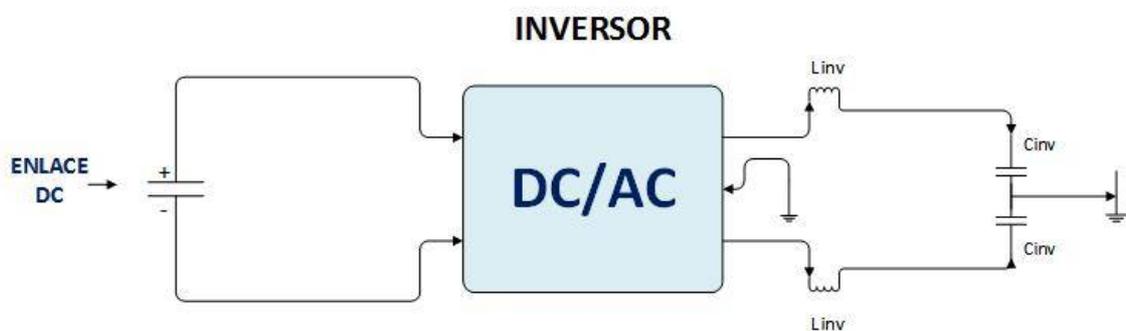


FIG. 2.16 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONVERTIDOR DC/AC.

En el inversor la forma de onda del voltaje de salida no tiene forma sinusoidal, pues contiene un número de armónicos que dependen de la técnica usada para la conmutación de los semiconductores de potencia (técnica de modulación). Esta distorsión de la forma de onda del voltaje de salida se puede mejorar limpiando los armónicos utilizando filtros LC.

### 2.4.3 FILTRO LC

El Filtro LC es un filtro de Segundo orden la cual nos ayuda a mejorar la onda resultante de la salida del Inversor eliminando las distorsiones del ruido y tener como resultando una onda limpia para poder observar más clara la onda resultante, filtro de Segundo orden es mucho más efectivo que la del primer orden porque para la misma atenuación de las componentes pueden ser menores.

Se muestra el esquemático del Filtro LC:

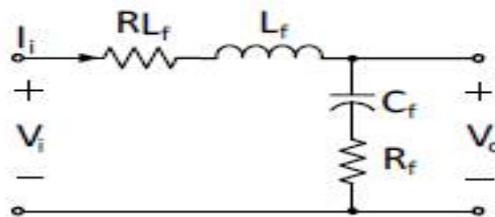


FIG.2.17 CIRCUITO FILTRO LC.

## **CAPÍTULO 3**

### **3 DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO**

En este capítulo se describe las características de los elementos que se aplica en el Suministro Híbrido de Energía (PV-FC-H2) para una vivienda con pequeñas cargas como se detalla en la siguiente tabla. 4, y esta vivienda se encuentran en el sector rural de Babahoyo, La Unión de Clementina. Las fuentes se dimensionan con valores reales para el panel fotovoltaico, la celda de hidrógeno y el banco de baterías, para estos elementos se deben calcular la cantidad y la configuración de cada uno para realizar un buen sistema híbrido.

CARGAS	CANTIDAD	POTENCIA [W]	POTENCIA TOTAL [W]	HORAS DE USO AL DIA [h/dia]	CONUNO DIARIO [Wh/dia]
Licuadaora	1	350	350	0,25	87,5
Foco ahorrador	8	15	120	3,75	450
Refrigerador	1	188	188	8	1504
Television	2	150	300	3	900
Computador	1	350	350	1	350
Ventilador	1	100	100	2	200
Equipo de sonido	1	75	75	2	150
Plancha	1	1200	1200	0,25	300
Dvd	2	25	50	2	100
Celular	3	3	9	2	18
				TOTAL	4059,5

TABLA. 6 CONSUMO EN [WH/DÍA] DE LAS CARGAS EN LA VIVIENDA.

### 3.1 MODULO FOTOVOLTAICO (PANEL SOLAR)

Para el dimensionamiento de este módulo lo principal es saber la demanda total de la vivienda, donde será implementado el sistema fotovoltaico para suministrar la potencia requerida. Para dicha vivienda el total de su consumo diario total ( $Q_T$ ) es 4059.5 [Wh/día] como se muestra en la tabla. 6.

Para obtener el consumo total se debe considerar un incremento del 15% ( $Q_F$ ) a dicho consumo en caso que existan variaciones así mismo se debe tomar en cuenta una eficiencia del 85% del convertidor DC/AC ( $\eta_{Inv}$ ) [9].

$$Q_{crT} = \frac{Q_F * Q_T}{\eta_{Inv}} = \frac{1.15 * 4059.5}{0.85} = 5492.26 [\text{Wh/dia}] (3-1).$$

Redondeando el consumo total se lo deja en 5.5KWh/día.

### 3.1.1 RADIACION SOLAR GLOBAL

Para mostrar la insolación directa de Los Ríos se ha elaborado una tabla.7 con la información [10] donde se presencia los valores mensuales de la radiación solar global.

MES	KWh/m2/dia
ENERO	4,35
FEBRERO	4,5
MARZO	4,8
ABRIL	4,5
MAYO	4,35
JUNIO	3,9
JULIO	3,9
AGOSTO	4,05
SEPTIEMBRE	4,2
OCTUBRE	4,05
NOVIEMBRE	4,35
DICIEMBRE	4,5

TABLA. 7 RADIACION SOLAR GLOBAL PROVINCIA DE LOS RIOS.

Teniendo en cuenta que para los meses problemas como Junio y Julio se debe dejar una reserva de suministro de energía.

### 3.1.2 DIMENSIONAMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Los paneles que van hacer utilizados para suministrar energía a la vivienda

son los paneles monocristalinos con las características de la tabla.8.

<b>MARCA</b>	SIMAX
<b>POTENCIA</b>	120 [W]
<b>VOLTAJE NOMINAL</b>	21.7[V]
<b>CORRIENTE MAXIMA</b>	7.57[A]

TABLA. 8 CARACTERISTICAS DE MODULO FOTOVOLTAICO.FUENTE: [11].



FIG. 3.1 PANEL FOTOVOLTAICO A USARSE EN EL PROYECTO.FUENTE: [11].

Para saber el número total de módulos fotovoltaicos se hace la siguiente relación entre la carga crítica ya encontrada anteriormente en la ecuación (3-1) y la potencia pico del módulo (PMPP) en producto con la horas de sol del mes tomado a partir de la tabla de radiaciones crítico ( $HPS_{cr}$ ) y el PR el factor global de funcionamiento que varía su valor de 0.65 y 0.9 [9].

$$N_T = \frac{Q_{crT}}{P_{MPP} * HPS_{cr} * PR} = \frac{5500}{120 * 3.9 * 0.8} = \mathbf{14.69017094} \approx \mathbf{15} \quad (3-2).$$

Ahora para calcular la cantidad de módulos en serie se elabora la división entre la tensión total que se da al DAB ( $V_{tp}$ ) y tensión nominal del módulo ( $V_{np}$ ) que se va utilizar [9].

$$N_S = \frac{V_{tp}}{V_{np}} = \frac{60}{21.7} = \mathbf{2.7649} \approx \mathbf{3} \quad (3-3).$$

En el caso de la cantidad de módulos en paralelo se realiza la división entre cantidad total de paneles ( $N_T$ ) y la cantidad de paneles en serie ( $N_S$ ) [9].

$$N_P = \frac{N_T}{N_S} = \frac{15}{3} = \mathbf{5} \quad (3-4).$$

Teniendo los resultados calculados en (3-2), (3-3) y (3-4) sabemos la siguiente información: tendremos un total de 15 módulos fotovoltaicos los cuales estarán 5 en configuración paralelo con 3 módulos en configuración serie en cada ramal del paralelo.

Con las siguientes configuraciones y la cantidad de módulos fotovoltaicos se puede obtener la potencia que va entregar a la carga mediante la ecuación (3-5) [10].

$$P_{PT} = N_T * PMPP = 15 * 120W = 1800W \quad (3-5)$$

### 3.2 BANCO DE BATERIAS

Las baterías que van hacer utilizadas son baterías secas de gel de ciclo profundo con las siguientes características mostrada en la Tabla. 9 para poder almacenar energía en caso de que el sector deje de estar soleado y a la vez le suministre la potencia requerida en la vivienda, siempre y cuando ésta este cargada.

<b>MARCA</b>	ULTRACELL
<b>VOLTAJE NOMINAL</b>	12 [VDC]
<b>CAPACIDAD NOMINAL (10HR)</b>	150[Ah]
<b>PROFUNDIDAD DE DESCARGA</b>	30%

Tabla. 9 CARACTERISTICAS DE LA BATERIA USADA. FUENTE: [11].



FIG. 3.2 BATERIA A USARSE EN EL PROYECTO. FUENTES: [11].

Para obtener la carga total de las baterías que se va requerir para el suministro realizar una relación entre potencia requerida ( $Q_{crT}$ ) y la tensión del sistema 90 V [9].

$$Q_{TB} = \frac{Q_{crT}}{V_{nS}} = \frac{5500Wh/d}{90V} = \frac{61Ah}{d} \quad (3-6).$$

Ahora para obtener la cantidad de baterías en paralelo se divide la carga total de las baterías para la capacidad nominal de la batería que se va utilizar en este proyecto.

$$B_P = \frac{Q_{TB}}{Q_{nB}} = \frac{61Ah/d}{150Ah/d} = 0.4066 \approx 1 \quad (3-7).$$

La cantidad de baterías en serie se divide el voltaje total del sistema y el voltaje nominal de la batería a usarse.

$$B_s = \frac{V_{nS}}{V_{nB}} = \frac{90V}{12V} = 7.5 \approx 8 \quad (3-8).$$

Para este sistema la vivienda usara un ramal de 8 baterías en serie.

### **3.3 CELDA DE HIDROGENO**

En el proyecto la celda de combustible que será utilizado es de la marca HorizonH-1000 PEM FUEL CELL 1000W FCS-C1000 con las siguientes características tabla 10. En este proyecto se usara una celda de 1000W porque resulta más factible a la hora de proporcionar energía, ya que con esta potencia nos va a generar la energía necesaria en casos de emergencias sea esta solo cuando la vivienda este con ausencia de la luz solar sea porque el día está nublado o este de noche, y el banco de baterías este descargado si y solo si el sistema esté en estas condiciones entra a funcionar la celda de combustible.

Marca	HORIZON
Voltaje nominal	12V
Potencia	1000W
Numero de celdas	48
Reactantes	Hidrogeno y Aire
Proteccion de corriente	42A

TABLA. 10 CARACTERÍSTICAS DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE A USARSE. FUENTE: [14].



FIG. 3.3 CELDA DE COMBUSTIBLE A USARSE EN EL PROYECTO. FUENTE: [14].

### 3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para realizar el siguiente análisis económico se tuvo que hacer varias cotizaciones en diferentes lugares como PROVIENTOS que es una empresa que se dedica a comercializar aquí en el Ecuador todo lo que tenga que ver con productos de energías renovables excepto la celda de combustible que eso se lo hizo mediante HORIZON que se dedica distribuir a esta.

COSTO DE EQUIPOS DEL SISTEMA HIBRIDO(PV-FC-H2)			
UNIDADES	DESCRIPCION	COSTO UNITARIO	COSTO
15	PANEL FOTOVOLTAICO DE 120W	190	2850
1	INVERSOR	3980	3980
3	CONVERTIDORES DC-DC	58	174
8	BATERIAS 150 Ah	560	4480
4	CONTROLADORES	543	2172
1	FILTRO	75	75
1	TANQUE DE HIDROGENO	550	550
1	CELDA DE COMBUSTIBLE 5Kw	15750	15750
		<b>TOTAL</b>	<b>30031</b>

Tabla. 11 COSTO DE EQUIPOS DEL SISTEMA HIBRIDO (PV-FC-H2).

## **CAPÍTULO 4**

### **4 DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **4.1 DIMENSIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE LA TOPOLOGIA**

En este proyecto se realiza el dimensionamiento de los elementos del el Suministro Híbrido de Energía (PV-FC-H<sub>2</sub>) en la que se muestra en la fig.4.1, la cual se dimensiona con valores reales para calcular el valor de la fuente (panel), la celda de hidrógeno y la batería, estos elementos funcionan como fuentes para suministrar corriente a una carga que en este caso sería una casa en los sectores rurales, la cual esta no tiene mayor demanda y este suministro se podría utilizar normalmente para ahorrar energía y tener mínimo impacto ambiental.

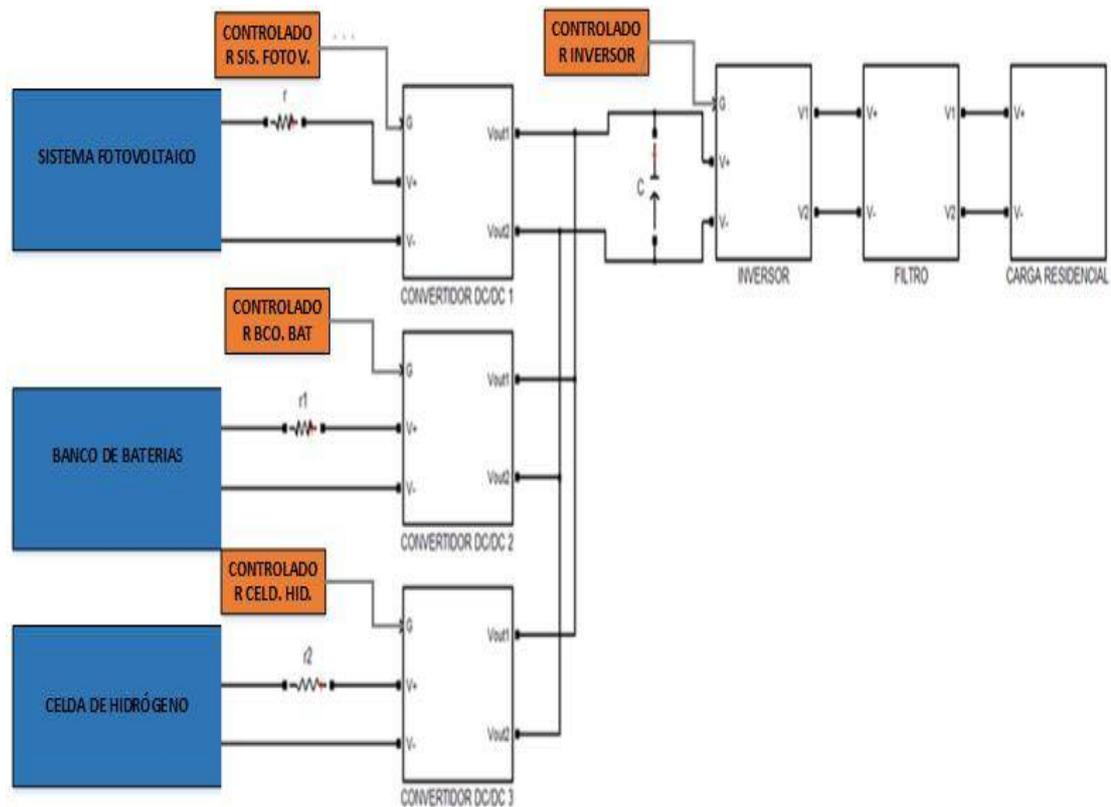


FIG. 4.1 SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGÍA (PV-FC-H2).

Este proceso consiste en las siguientes etapas:

## 4.2 ETAPA MÓDULO INVERSOR

### 4.2.1 DIMENSIONAMIENTO FILTRO LC PARA EL CONVERTIDOR DC/AC

En esta etapa los voltajes generados por el Convertidor DC/AC se utiliza un filtro LC, que reduce la distorsión armónica y obtenemos una forma sinusoidal pura, para esto se diseñó un filtro pasa bajo.

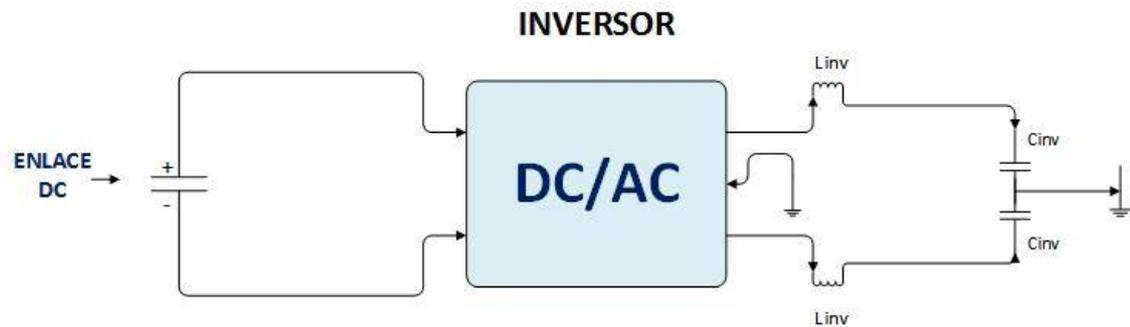


FIG. 4.2 MODULO INVERSOR FILTRO LC.

- INDUCTOR.

En esta etapa se utiliza el índice de modulación del inversor  $m_v$ :

$$m_v = 0.8 \quad (4.1).$$

Donde de la fórmula de  $m_v$  (índice de modulación del inversor), se puede calcular el voltaje de enlace DC:

$$m_v = \frac{V_{o(L-L) pico}}{V_{LVDC}} \quad (4.2).$$

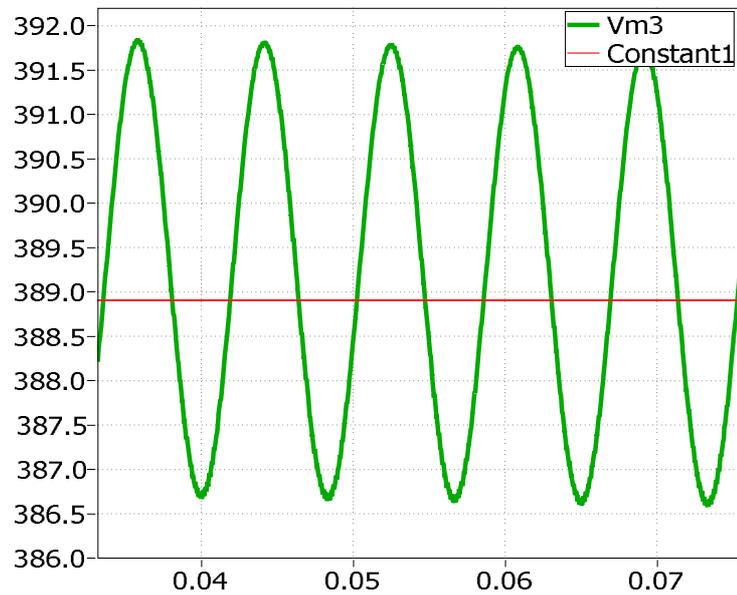


FIG. 4.3 VOLTAJE DE ENLACE DC.

Donde Constant1 es  $V_{Ldc}$  donde se estabiliza en 388.91V, voltaje que utilizamos para alimentar la carga.

Con este voltaje calculamos en (4.2) la corriente inductiva  $I_L$  con la fórmula:

$$P = V_{o(L-L)} \cdot I_L \cdot \cos \theta;$$

$$P = 5500 \text{ Kw}$$

$$I_L = 25 \text{ A}$$

Se procede a encontrar la variación de la corriente, la cual se muestra en la siguiente fig. 4.4.

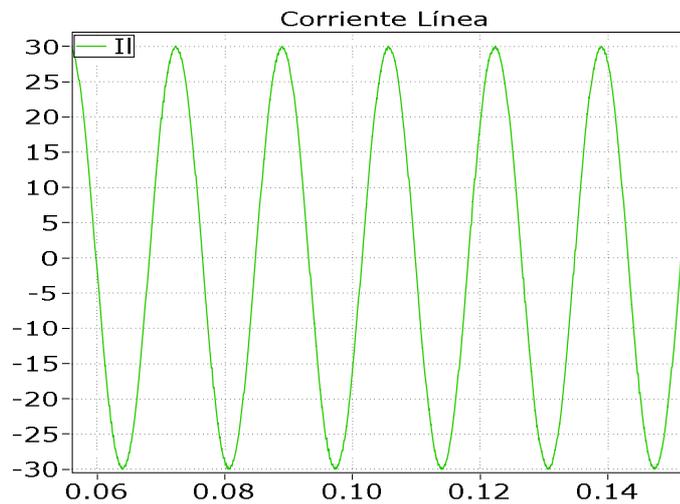


FIG. 4.4 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE  $I_L$ .

Con esta variación de Corriente aplicamos la integral para calcular:

$$\Delta I_L = \frac{1}{L_{inv}} \int V_{Linv} dt \quad (4.3).$$

$$\Delta I_L = \frac{3}{I_L} = 0.75 A \quad (4.4).$$

Donde la  $\int V_{Linv} dt$  su valor aproximado es 0.00544, y el valor del Inductor  $L_{inv}$  es 3.627 mH.

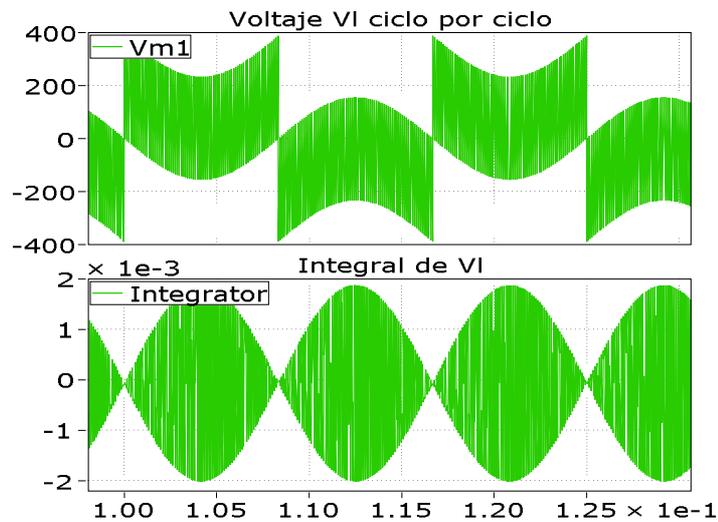


FIG. 4.5 SEÑAL DE VOLTAJE VL CON SU INTEGRAL.

- CAPACITOR.

Para encontrar el valor del capacitor se utiliza una frecuencia de resonancia (fresonancia) de 2KHz que significa una década por debajo de la frecuencia de conmutación  $f_s$  que es de 20KHz.

Se procede a calcular la capacitancia de la siguiente manera:

$$f_{resonancia} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{inv} \cdot C_{inv}}} \quad (4.5).$$

Despejando la Capacitancia se encuentra su valor:

$$C_{inv} = 1.75 \mu f \quad (4.6).$$

Se comprueba en la siguiente figura las señales de Voltaje es sinusoidal y rizo de corriente de línea, donde se puede observar los valores calculados anteriormente.

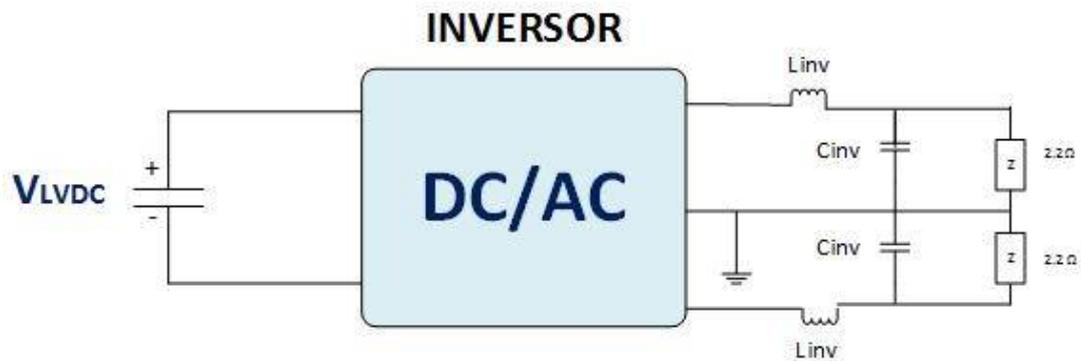


FIG. 4.6 CIRCUITO DE COMPROBACIÓN DE SEÑALES DE VOLTAJE Y RIZO DE CORRIENTE DE LÍNEA.

- CAPACITOR DEL ENLACE DC.

Para el cálculo del capacitor del enlace DC se utiliza una fuente  $V_{LDC}$  en vez del capacitor como se muestra en la siguiente figura 4.7:

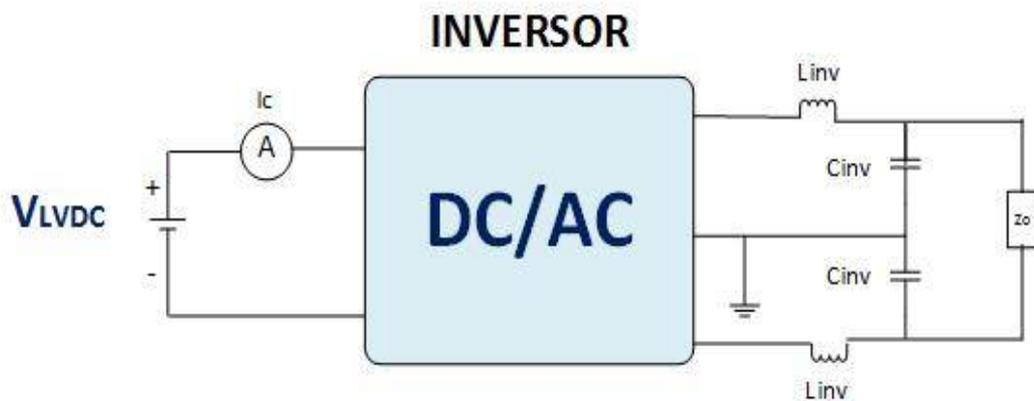


FIG. 4.7 CIRCUITO CÁLCULO DEL CAPACITOR DEL ENLACE.

En este grafico se puede observar la señal de corriente  $I_c$  en diferentes periodos de tiempo la cual su valor de la frecuencia se reduce en el que se saca el promedio de las  $I_c$  en su determinado periodo como el promedio de  $I_c$  a un periodo  $T_s$  con una frecuencia de 20000 Hz que es  $I_{c1}$  y el promedio de  $I_c$  a un periodo  $1/120 T_s$  a una frecuencia de de 120 Hz que es  $I_{c2}$  y se calcula el valor del promedio de  $I_c$  con la que se estabiliza a una frecuencia de 0 Hz en la cual se puede observar en la figura 4.8.

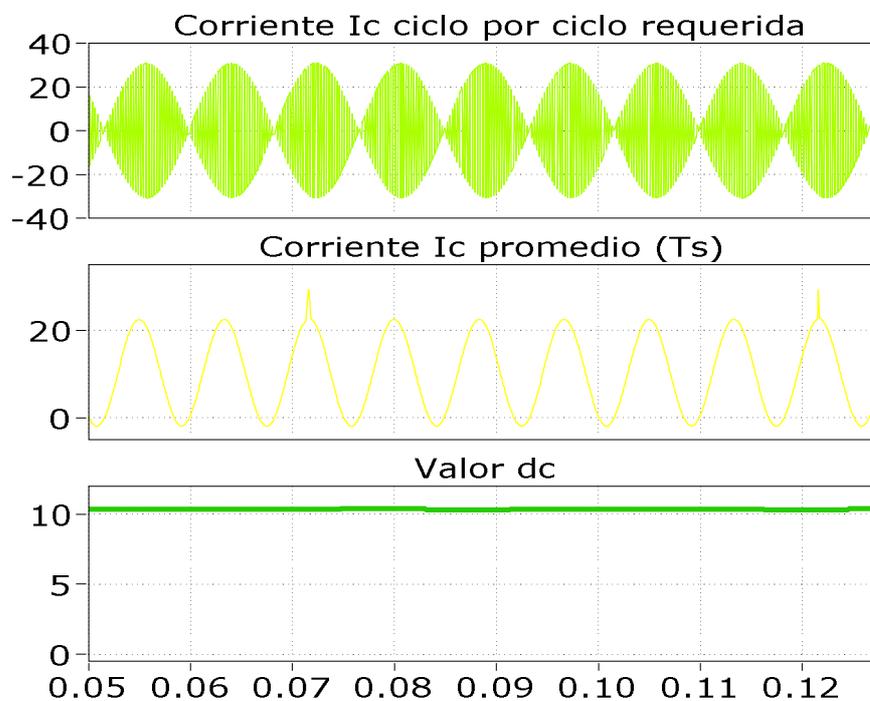


FIG. 4.8 GRAFICAS DE LAS CORRIENTES DEL CAPACITOR PROMEDIO.

Para encontrar el valor de la  $I_c$  se debe analizar el área positiva como se muestra en la siguiente figura la cual indica el rango de los intervalos a

evaluar para tener el valor del área y poder calcular el valor del capacitor despejando de la fórmula en (4.7) y se observa en esta figura 4.9 el valor promedio  $I_c$ .

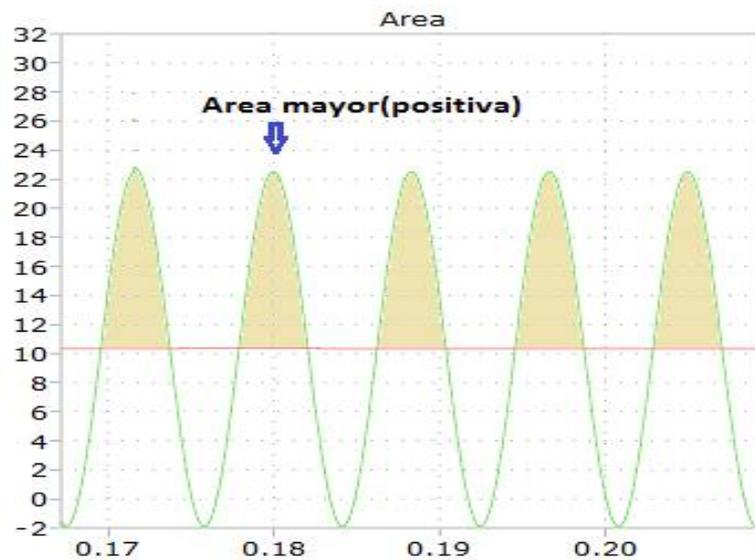


FIG. 4.9 ÁREA POSITIVA DE  $I_c$  A INTEGRAR.

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int I_c dt \quad (4.7).$$

El valor del área positiva se la obtiene gráficamente la cual se utiliza (4.8) que es la  $\int I_c$ .

$$\int I_c = Area = A * \sin(\omega t + \phi) + offset \quad (4.8).$$

Donde  $w = 2\pi f = 120$  y se encontró el valor que es de  $9.34 * 10^{-3}$

Una vez que se encontró el valor del área de la fórmula (4.9) despejamos C capacitor, considerando el 2% de  $V_{LVDC}$  que es  $\Delta V_c$  y calculamos su valor

$$C = \frac{\int I_c dt}{\Delta V_c} = 1.2005 mA \quad (4.9).$$

Una vez encontrado el valor del capacitor comprobamos el rizo del Voltaje del enlace DC donde se comprueba que el rizo es menor al  $\Delta V_c$ .

### **4.3 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE)**

#### **PANEL SOLAR.**

El convertidor DC-DC su función es controlar el voltaje de salida del panel solar para que así este represente una carga equivalente para proveer suficiente potencia.

Podemos observar el convertidor DC/DC en el inductor en la siguiente figura 4.10 donde el voltaje de salida  $V_{LDC}$  a controlar es referido a lado de  $V_i$ .

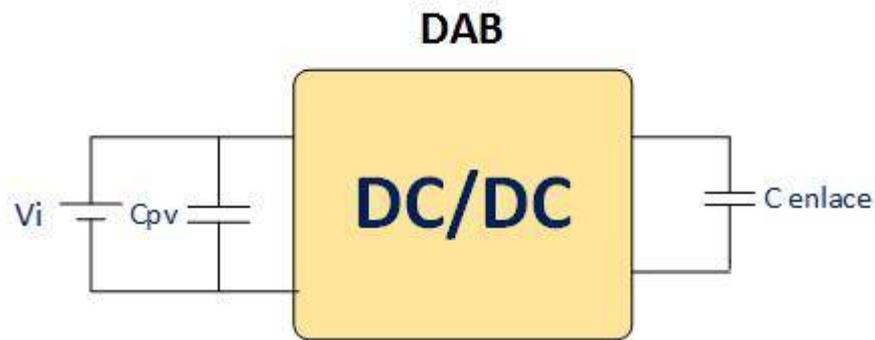


FIG.4.10 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) PANEL SOLAR.

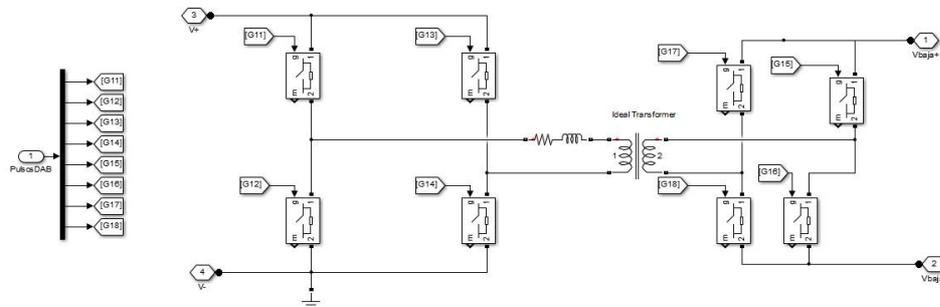


FIG. 4.11 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC PANEL SOLAR.

Se procede con el cálculo del valor del Inductor del DAB empezamos con la formula (4.10) y consideramos los siguientes valores que se utilizó en este proyecto:

$$P = \frac{V_i * V_{LVDC}}{X_{DAB}} * \phi \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right) \quad (4.10).$$

Donde:

$$\phi = \frac{\pi}{6}$$

$$V_i = V_{LVDC} = 70V$$

$$P = 11 kW$$

$$f_z = 20 kHz$$

Despejamos  $X_{DAB}$  y reemplazamos los valores ya dados anteriormente.

$$X_{DAB} = \frac{(70 V * 70 V)}{1100 KW} * \left(\frac{5\pi}{36}\right) \quad (4.11).$$

$$X_{DAB} = 0.1942) \quad (4.12).$$

Una vez encontrado el valor de  $X_{DAB}$  calculamos el valor del inductor  $L_{DAB}$  con la siguiente ecuación (4.13) con  $f_z = 20 kHz$ .

$$X_{DAB} = 2\pi f_z L_{DAB} \quad (4.13).$$

$$L_{DAB} = \frac{X_{DAB}}{2\pi f_z} = 1.55 * 10^{-6} H \quad (4.14).$$

Una vez que se calcula el valor del inductor se procede a encontrar el valor

del Capacitor  $C_{pv}$  de acuerdo al siguiente sistema.

En esta figura 4.12 se observa el área para obtener el valor del Capacitor  $C_{pv}$  donde matemáticamente se procede a encontrar integrando el área positiva de la corriente  $I_{Cpv}$ .

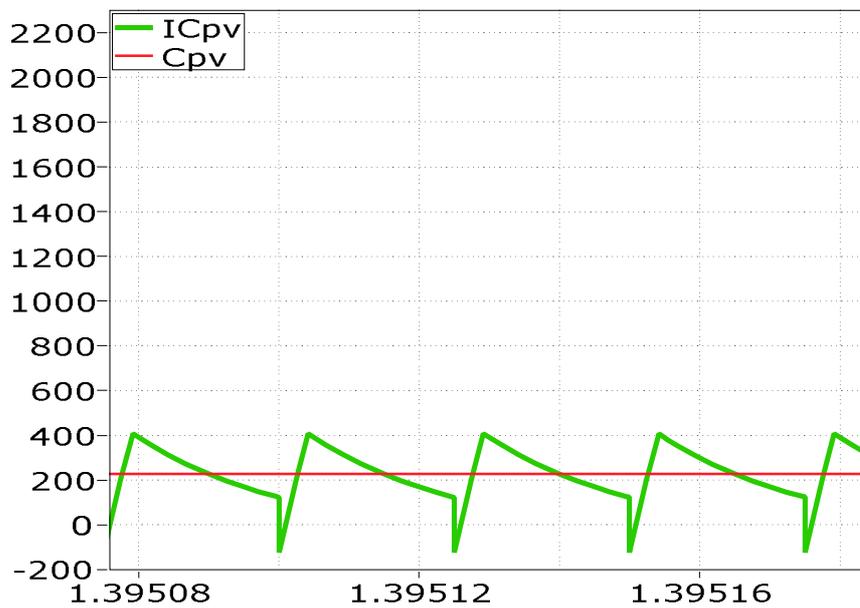


FIG. 4.12 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE  $I_{Cpv}$

Integrando el área positiva de la corriente  $I_{Cpv}$  obtenemos el valor del capacitor  $C_{pv}$  de la ecuación (4.15).

$$\int I_{Cpv} = \text{área} = 2.018 * 10^{-3} \quad (4.15).$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int I_{Cpv} dt \quad (4.16).$$

$$\Delta V_c = 2\% V_i \quad (4.17).$$

Obteniendo el valor de la  $\Delta V_c$  ( $V_i = 70 V$ ) se calcula el valor del capacitor  $C_{pv}$  de (4.18).

$$C_{pv} = \frac{\int I_{Cpv}}{\Delta V_c} = 1.44 \text{ mf} \quad (4.18).$$

#### 4.4 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) BATTERY

En esta etapa el convertidor DC-DC su función a igual que el convertidor del panel solar controlar el voltaje de salida para que así éste represente una carga equivalente para proveer suficiente potencia.

Podemos observar el convertidor DC/DC en el inductor en la siguiente figura 4.13 donde el voltaje de salida  $V_{LDC}$  a controlar es referido a lado de  $V_{bat}$ .

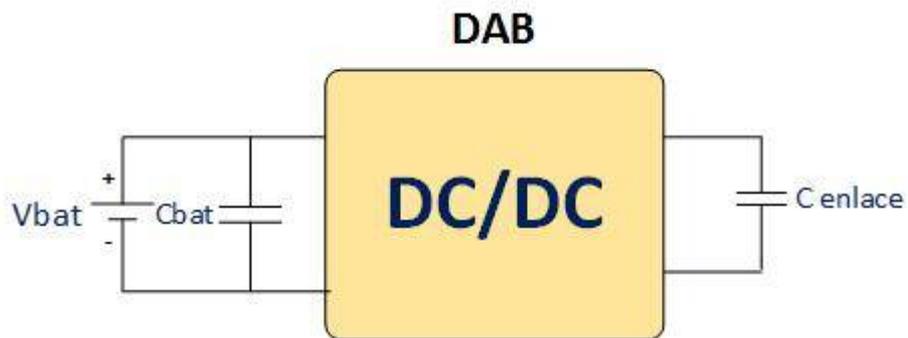


FIG.4.13 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) BATTERY.

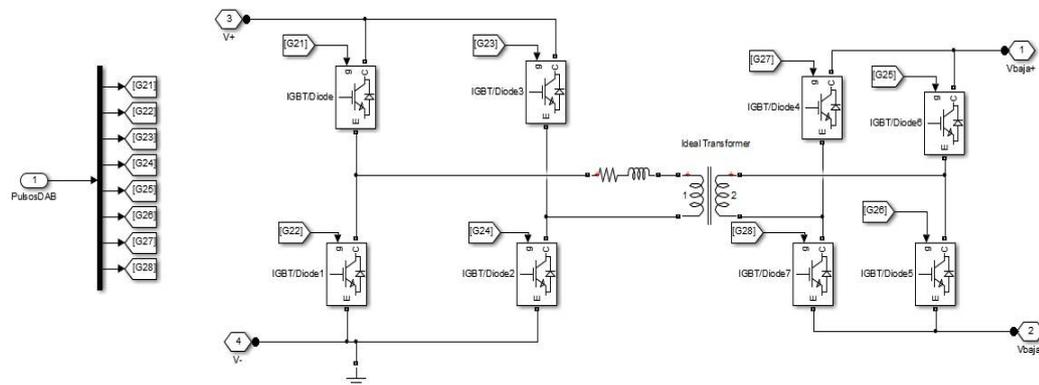


FIG. 4.14 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC BATTERY.

Se procede con el cálculo del valor del Inductor del DAB empezamos con la formula (4.19) y consideramos los siguientes valores que se utilizó en este proyecto:

$$P = \frac{V_i * V_{LVDC}}{X_{DAB}} * \phi \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right) \quad (4.19)$$

Dónde:

$$\phi = \frac{\pi}{6}$$

$$V_{bat} = 96V$$

$$V_{LVDC} = 96V$$

$$P_{bat} = 5.5kW$$

$$f_z = 20 \text{ kHz}$$

Despejamos  $X_{DAB}$  y reemplazamos los valores ya dados anteriormente.

$$X_{DAB} = \frac{(96V * 96V)}{5.5 \text{ KW}} * \left(\frac{5\pi}{36}\right) \quad (4.20).$$

$$X_{DAB} = 0.7311 \quad (4.21).$$

Una vez encontrado el valor de  $X_{DAB}$  calculamos el valor del inductor  $L_{DAB}$  con la siguiente ecuación (4.22) con  $f_z = 20 \text{ kHz}$

$$X_{DAB} = 2\pi f_z L_{DAB} \quad (4.22).$$

$$L_{DAB} = \frac{X_{DAB}}{2\pi f_z} = 5.82 * 10^{-6} H \quad (4.23).$$

Una vez que se calcula el valor del inductor se procede a encontrar el valor del Capacitor  $C_{pv}$  de acuerdo al siguiente sistema.

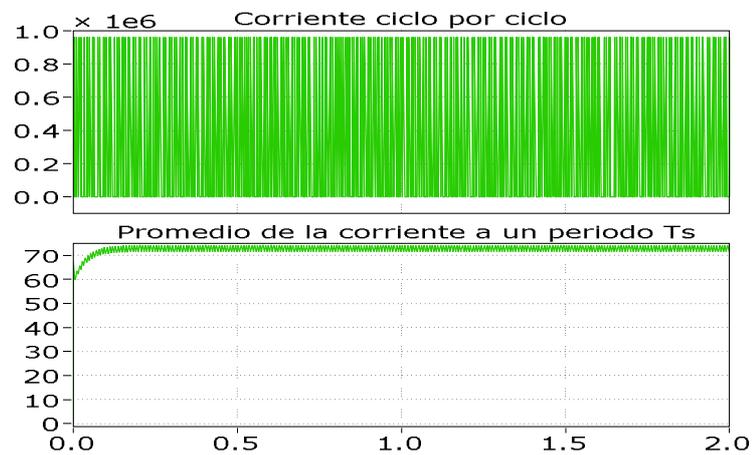


FIG. 4.15 GRAFICA PARA DISEÑAR EL CAPACITOR CBAT.

En esta figura 4.15 se observa el área para obtener el valor del Capacitor  $C_{bat}$  donde matemáticamente se procede a encontrar integrando el área positiva de la corriente  $I_{bat}$ .

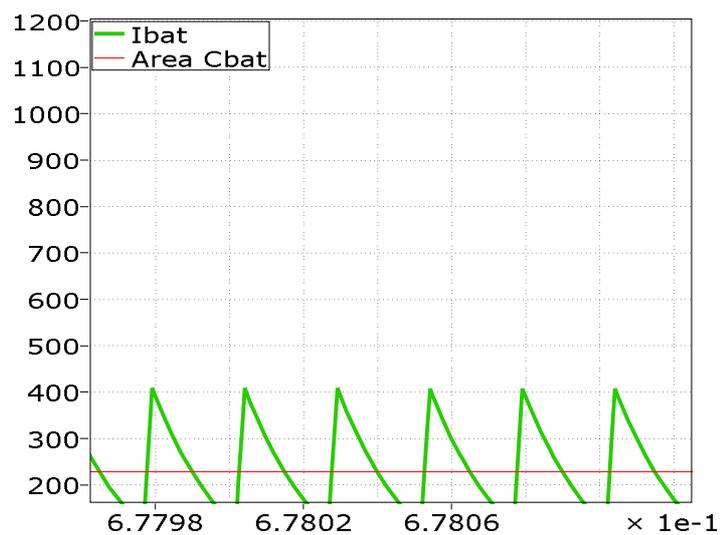


FIG. 4.16 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE  $I_{bat}$ .

Integrando el área positiva de la corriente  $I_{bat}$  obtenemos el valor del capacitor  $C_{bat}$  de la ecuación (4.24).

$$\int I_{bat} = \text{área} = 5.516 * 10^{-4} \quad (4.24).$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int I_{bat} dt \quad (4.25).$$

$$\Delta V_c = 2\% V_{bat} \quad (4.26).$$

Obteniendo el valor de la  $\Delta V_c$  ( $V_{bat} = 96 V$ ) se calcula el valor del capacitor  $C_{bat}$  de (4.27).

$$C_{bat} = \frac{\int I_{bat}}{\Delta V_c} = 2.87 * 10^{-4} f \quad (4.27).$$

#### **4.5 ETAPA DEL CONVERTIDOR DC-DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) CELDA DE HIDRÓGENO.**

En esta etapa el convertidor DC-DC su función a igual que el convertidor de la batería controlar el voltaje de salida para que así éste represente una carga equivalente para proveer suficiente potencia.

Podemos observar el convertidor DC/DC en el inductor en la siguiente figura 4.17 donde el voltaje de salida  $V_{LDC}$  a controlar es referido a lado de  $V_{ceh}$ .

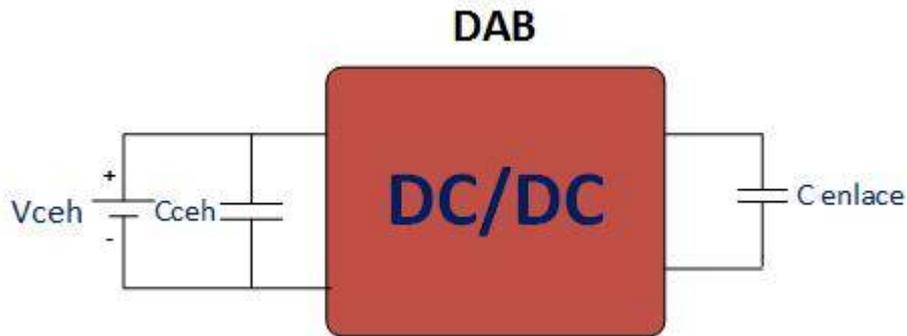


FIG. 4.17 CONVERTIDOR DC/DC (DUAL ACTIVE BRIDGE) CELDA DE HIDRÓGENO.

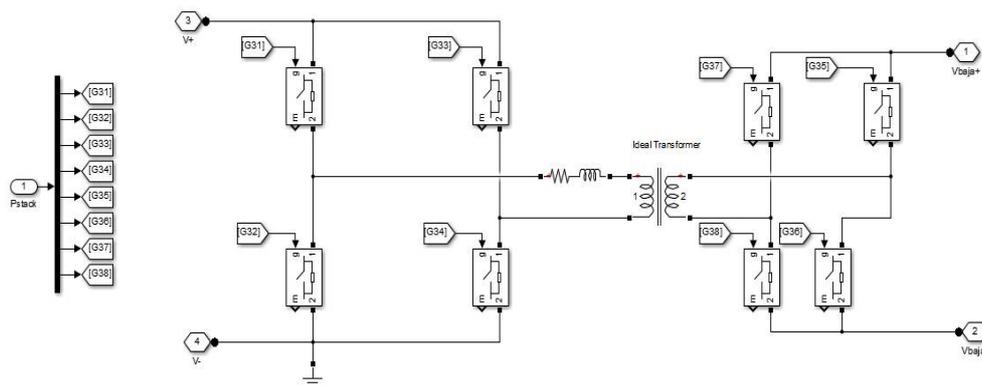


FIG. 4.18 ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR DC/DC CELDA DE HIDRÓGENO

Se procede con el cálculo del valor del Inductor del DAB empezamos con la formula (4.28) y consideramos los siguientes valores que se utilizó en este proyecto:

$$P = \frac{V_{ceh} * V_{LVDC}}{X_{DAB}} * \phi \left(1 - \frac{\phi}{\pi}\right) \quad (4.28).$$

Dónde:

$$\phi = \frac{\pi}{6}$$

$$V_{ceh} = 100V$$

$$V_{LVDC} = 100V$$

$$P_{stack} = 12kW$$

$$f_z = 20 \text{ kHz}$$

Despejamos  $X_{DAB}$  y reemplazamos los valores ya dados anteriormente.

$$X_{DAB} = \frac{(100V * 100V)}{12 \text{ KW}} * \left(\frac{5\pi}{36}\right) \quad (4.29).$$

$$X_{DAB} = 0.3636 \quad (4.30).$$

Una vez encontrado el valor de  $X_{DAB}$  calculamos el valor del inductor  $L_{DAB}$

con la siguiente ecuación (4.31) con  $f_z = 20 \text{ kHz}$

$$X_{DAB} = 2\pi f_z L_{DAB} \quad (4.31).$$

$$L_{DAB} = \frac{X_{DAB}}{2\pi f_z} = 2.89 * 10^{-6} H \quad (4.32).$$

Una vez que se calcula el valor del inductor se procede a encontrar el valor del Capacitor  $C_{ceh}$  de acuerdo al siguiente sistema.

En esta figura 4.19 se observa el área para obtener el valor del Capacitor  $C_{ceh}$  donde matemáticamente se procede a encontrar integrando el área positiva de la corriente  $I_{ceh}$ .

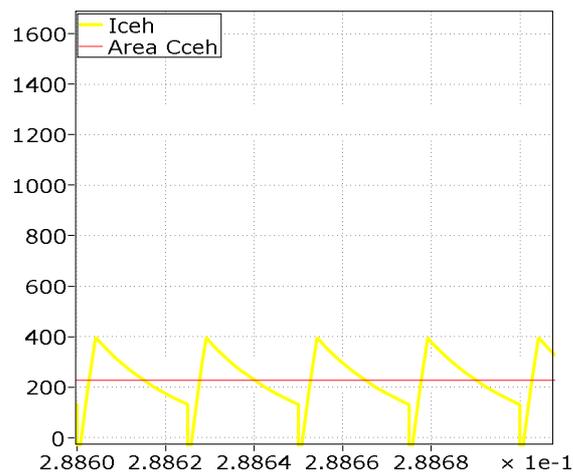


FIG. 4.19 ÁREA POSITIVA DE LA CORRIENTE  $I_{ceh}$ .

Integrando el área positiva de la corriente  $I_{ceh}$  obtenemos el valor del capacitor  $C_{ceh}$  de la ecuación (4.33).

$$\int I_{ceh} = \text{área} = 4.286 * 10^{-4} \quad (4.33).$$

$$\Delta V_c = \frac{1}{C} \int I_{ceh} dt \quad (4.34).$$

$$\Delta V_c = 2\% V_{ceh} \quad (4.35).$$

Obteniendo el valor de la  $\Delta V_c$  ( $V_{ceh} = 100 V$ ) se calcula el valor del capacitor  $C_{ceh}$  de (4.27).

$$C_{bat} = \frac{\int I_{bat}}{\Delta V_c} = 2.143 * 10^{-4} f(4.36).$$

## **CAPÍTULO 5**

### **5 PRUEBAS Y EVALUACIÓN**

En este capítulo se realiza la prueba del sistema, simulando los diferentes casos los cuales son:

- Carga variable
- Carga fija
- Batería cargada
- Batería descargada

Lo importante es que a la vivienda nunca le falte la potencia demandada sin importar la variación de los diferentes casos mencionados, en otras palabras el voltaje de salida hacia la carga no debe de verse afectado.

## 5.1 PRIMER CASO: Carga Variable

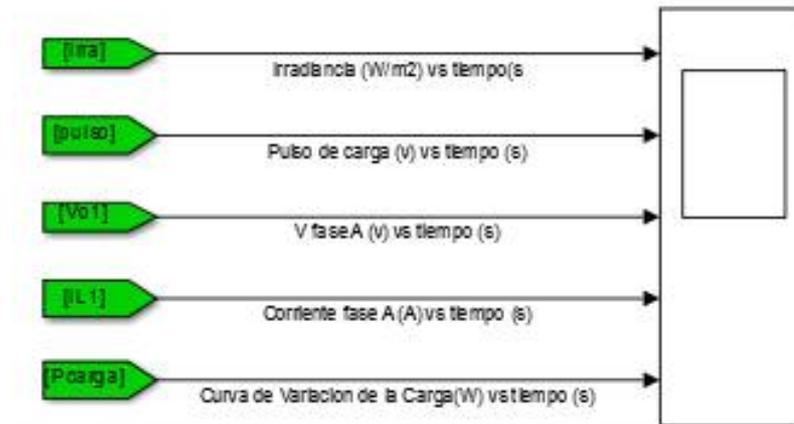


FIG. 5.1 GRAFICADOR DE LA CARGA VARIABLE.

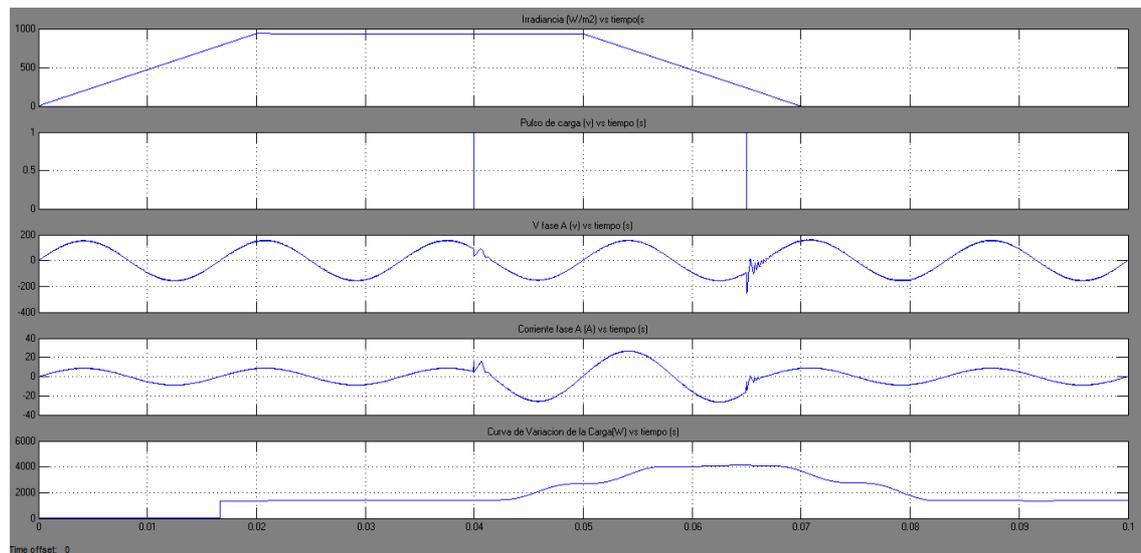


FIG. 5.2 GRAFICAS CON LA CARGA VARIABLE.

En este caso se muestra en la figura 5.2, la primera grafica representa la irradiación solar que hay en ese día, en la siguiente se muestra el tiempo en el que entran las cargas de la vivienda, este caso se simulo mediante pulso ya que fue la mejor manera de hacer que se conecten dos resistencias en

paralelo, las mismas que estaban anteriormente en un tiempo determinado para después ser desconectadas nuevamente, luego la tercera grafica muestra el voltaje de una de las fases de la salida que va hacia la carga de la vivienda como se puede ver con facilidad que hay unas pequeñas interferencias en el momento que se conectan y desconectan las cargas adicionales en el tiempo de 0.4 y 0.67, en la cuarta grafica se aprecia la corriente que entra hacia la vivienda, al igual que en el caso anterior se nota que hay unos pequeños transitorios en el momento que se conecta y desconecta las cargas adicionales, como se puede visualizar en esta gráfica la demanda de potencia es mayor en otras palabras la corriente incrementa. Finalmente en la última grafica está la potencia que se consume en la vivienda en lo largo del día, es evidente que la potencia máxima es 4150 [W].

## 5.2 SEGUNDO CASO: CARGA FIJA

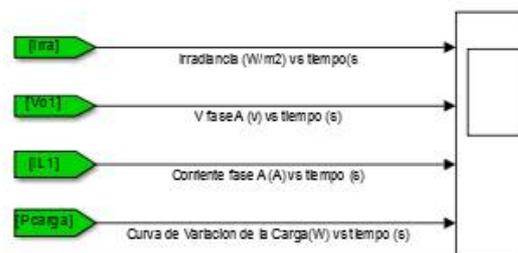


FIG. 5.3 GRAFICADOR CON EL CASO DE LA CARGA FIJA.

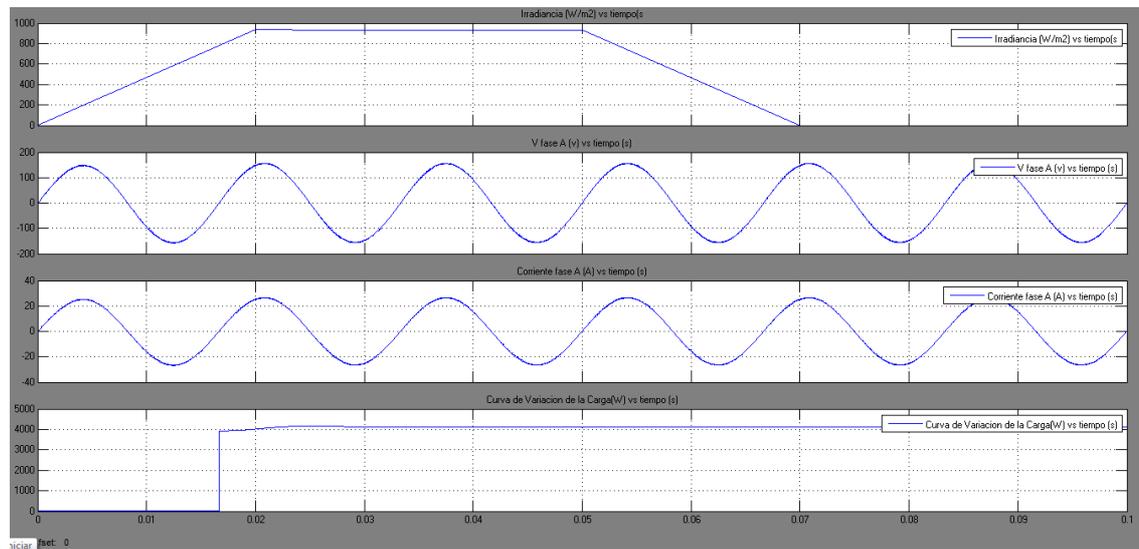


FIG. 5.4 GRAFICAS DEL CASO DE LA CARGA FIJA.

En este caso se puede visualizar la figura 5.4, en la primera grafica se observa la magnitud de la irradiación solar [w/m2] que hay en ese día como en el caso anterior de la carga variable, la siguiente grafica muestra el voltaje de una de las fases de la salida que va hacia la carga de la vivienda, como no hay variaciones de carga no se observa transitorios. En la tercera grafica está la corriente que se suministra a la vivienda a sí mismo es una señal libre de transitorios debido a que la vivienda maneja una carga fija, en la última grafica está la potencia que se consume en la vivienda en lo largo del día, se nota que la potencia máxima es de 4150 [W] pero a diferencia de la figura 5.2 ésta tiene una potencia constante.

### 5.3 TERCER CASO: BATERIA AL 100%

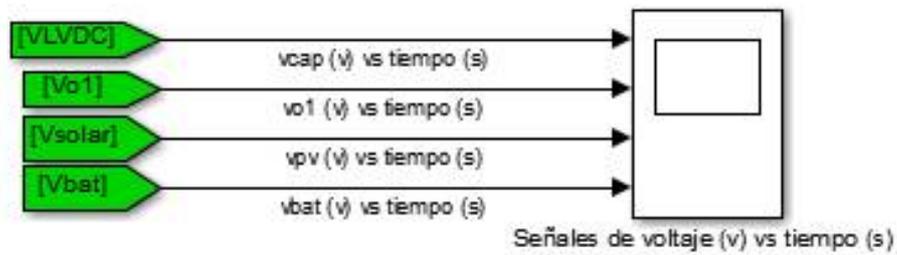


FIG.5.5 GRAFICADOR DE VOLTAJES.

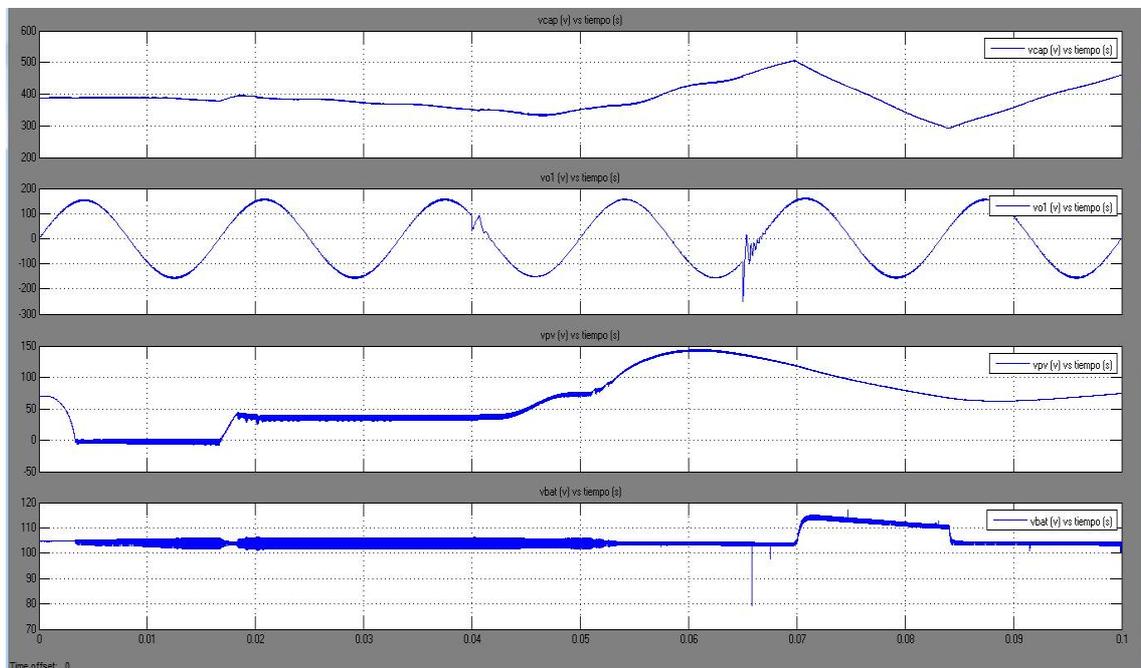


FIG. 5.6 GRAFICAS DE LOS VOLTAJES [V] VS EL TIEMPO [SEG] CON LA BATERÍA AL 100%.

En esta grafica de la figura 5.6 se muestra los siguientes voltajes [V] vs el tiempo [seg]:

$v_{cap}$  = voltaje del súper capacitor de alta frecuencia, el cual mediante el controlador de voltaje se encarga de tener siempre energizada la barra sin importar los cambios que se tenga en la carga de la vivienda, en otras palabras no va dejar que caiga el voltaje para el inversor sin importar la potencia que demande la carga para mantenerla a esta siempre alimentada como se puede ver en la siguiente grafica del  $V_{o1}$  que no cae su voltaje.

$V_{o1}$  = voltaje de salida de una de las fases, la otra fase de salida es similar, como se puede dar cuenta se tiene una señal de salida AC sinusoidal con un rango de  $\pm 120$  [Vrms], esto se debe a que en el sistema está incorporado un inversor.

$V_{pv}$  = este es el voltaje del sistema fotovoltaico, tal como se aprecia en la gráfica el voltaje máximo es 150 [V] lo cual ocurre cuando la irradiación solar se mantiene constante todo este tiempo, hasta que la irradiación baja y el voltaje de salida del panel empieza a bajar su magnitud.

$V_{bat}$  = magnitud del voltaje de la batería cuando se encuentra cargada al 100% lo que pasara es que esta no necesitara cargar porque ya está en el

máximo hasta que sea necesario usarla.

#### 5.4 CUARTO CASO: BATERIA 0%

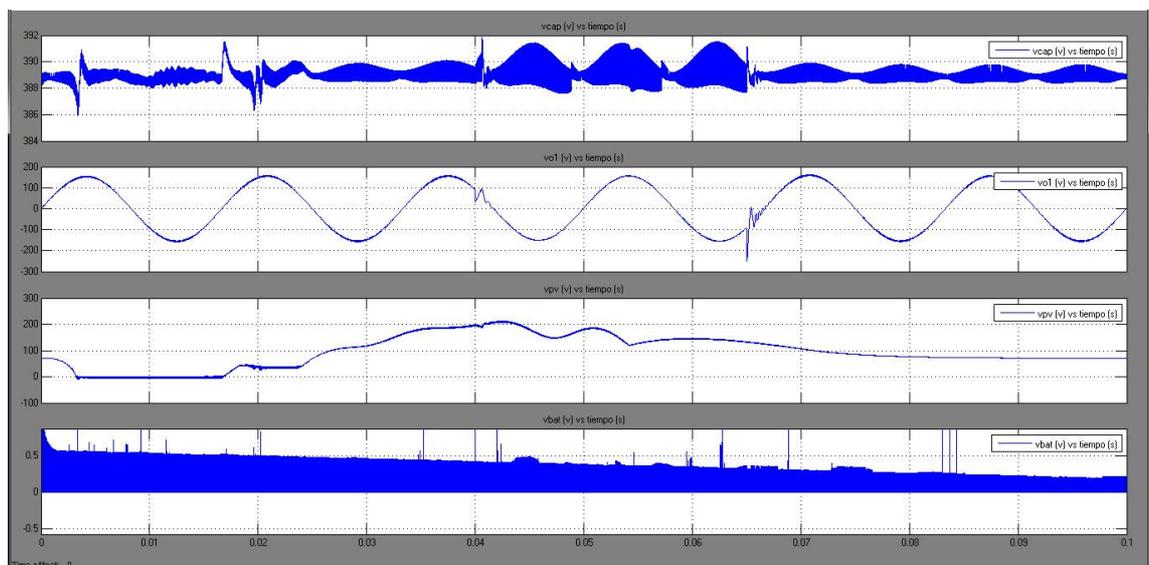


FIG. 5.7 GRAFICAS DE LOS VOLTAJES [V] VS EL TIEMPO [SEG] CON LA BATERÍA AL 0%.

En la figura 5.7 se muestran las gráficas de los voltajes vs tiempo cuando la batería se encuentra totalmente descargado 0%, en la segunda grafica se visualiza que a pesar de tener descargada la batería el voltaje de una de las fases de salida se mantiene con unos pequeños transitorios pero eso se debe a que la carga de la vivienda está aumentando o disminuyendo bruscamente.

En la figura 5.8 se observa que las dos primeras graficas son; el voltaje de la fase a y el voltaje de la fase b, en las cuales se nota una pequeña distorsión eso se debe al cambio brusco de la carga que demanda más corriente, este transitorio que no tarda mucho también se ve reflejada en las gráficas de la corriente de la fase a y la corriente de la fase b. En la última grafica se ve la potencia de la carga con la variación en el tiempo que aumenta o disminuye la carga de la vivienda.

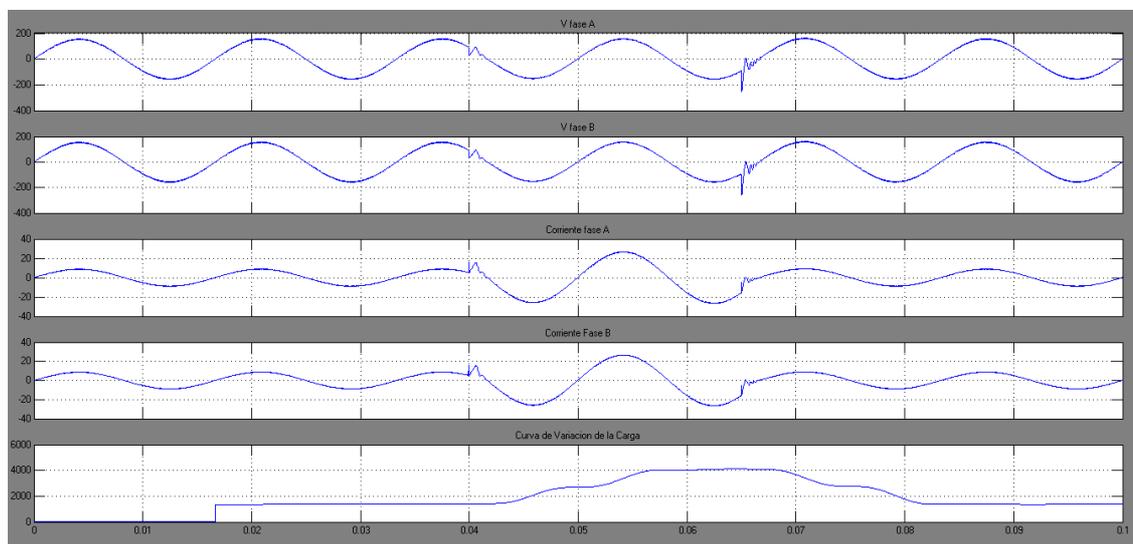


FIG. 5.8 ESTADO DE LA CARGA VOLTAJE - CORRIENTE – POTENCIA.

## 5.5 CARGA UTILIZADA EN EL SISTEMA HIBRIDO

Saliendo del filtro se encuentra la carga de tipo variable como se puede visualizar en la figura 5.9, también se nota que es un sistema de 110voltios AC / 220 voltios AC depende del uso que se le quiera dar al sistema hibrido, con la ayuda de un generador de pulsos como se muestra en la figura 48 se

realiza que la vivienda simule una variación de la carga en el momento que el pulso sea alto se conecten las cargas en paralelo y cuando sea bajo el pulso se desconecten las cargas mencionadas anteriormente, y esto se hace para simular el encendido de los diferentes electrodomésticos a lo largo del día para obtener una potencia como la mostrada en la figura 5.11.

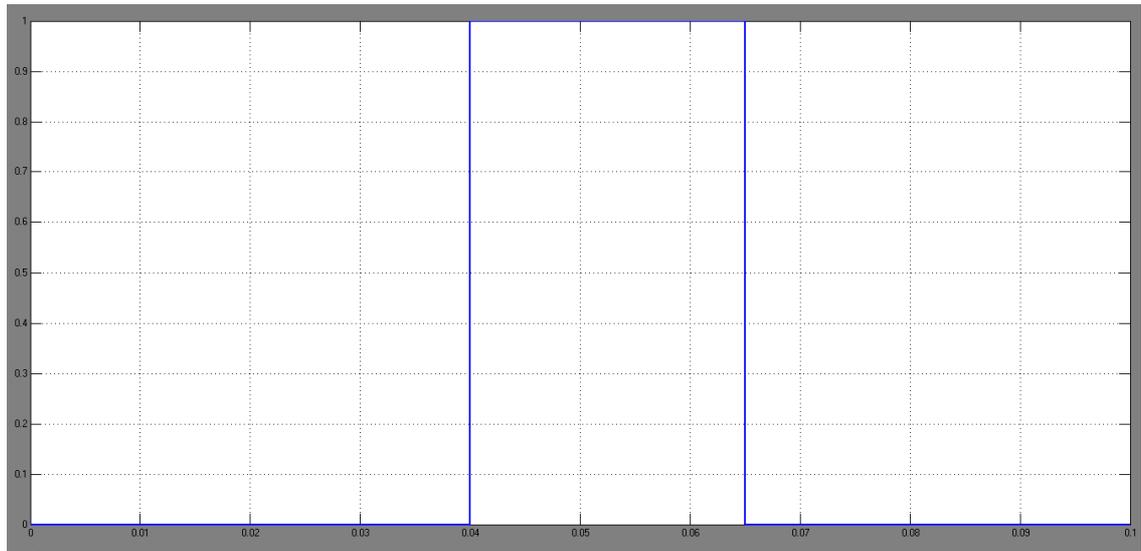


FIG. 5.9 PULSO HECHO MEDIANTE EL GENERADOR E PULSO PARA VARIAR LA CARGA.

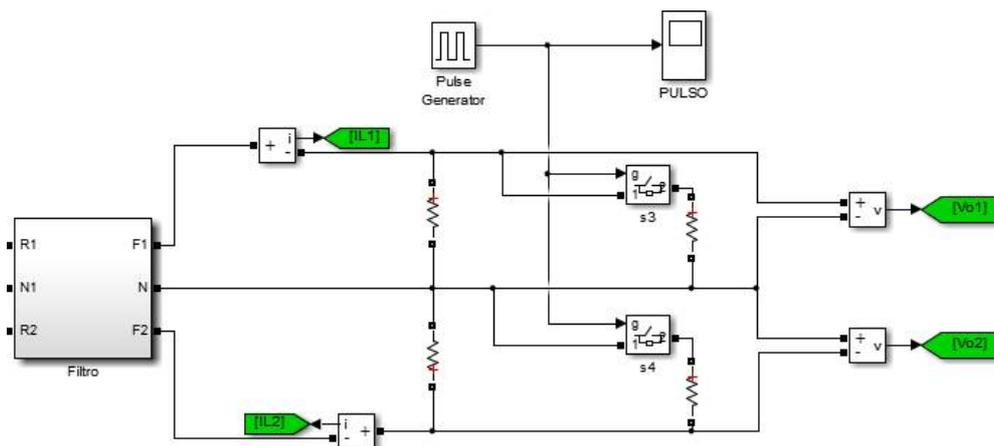


FIG. 5.10 CIRCUITO DE LA CARGA VARIABLE DE LA VIVIENDA.

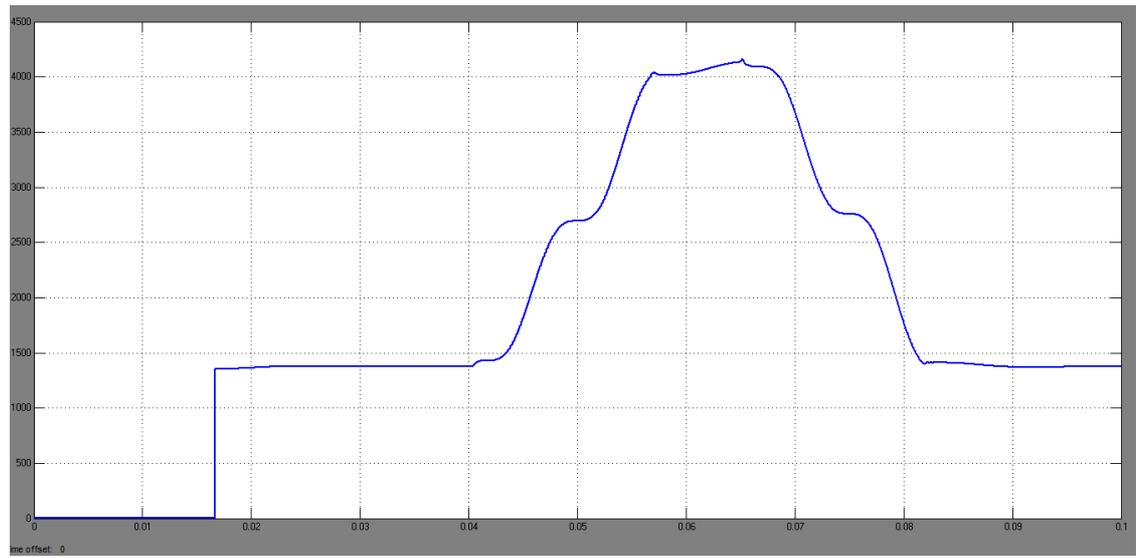


FIG. 5.11 POTENCIA DE SALIDA.

## CONCLUSIONES

1. El Suministro Híbrido de Energía propuesto proporciona potencia suficiente para la demanda eléctrica de una carga (vivienda) durante las 24 horas del día en ausencia de la RED eléctrica.
2. El voltaje de salida que se obtiene para la carga es una señal sinusoidal sin transitorios esto se debe a que en el circuito se incorporó un filtro pasa bajo.
3. El análisis de las simulaciones demuestra que la potencia generada por las fuentes de energía renovable (panel solar, batería y celda solar) garantizan la estabilidad de la potencia entregada a la carga con un correcto funcionamiento de cada una de ellas.
4. El Sistema de Suministro de Energía Híbrido propuesto alarga la vida útil de los electrodomésticos de la vivienda, porque si ocurre un corte de fluido eléctrico permite seguir suministrando energía a la carga además de mejorar la calidad de energía que llega a los electrométricos ya que incorpora filtros.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que la instalación del Sistema Híbrido sea en un lugar adecuado para facilitar la instalación, el mantenimiento y a su vez sea seguro que no cualquiera tenga acceso a este sitio solo personas autorizadas, para evitar accidentes o daños a los dispositivos del sistema híbrido.
2. Se recomienda usar súper capacitores y súper inductores a la hora de implementar este sistema, porque se está usando alta frecuencia y los voltajes también son grandes, al igual que la corriente que pasan por estos elementos.
3. Se recomienda usar un filtro pasa bajo en el momento de la implementación para obtener una señal limpia libre de transitorios.

## ANEXOS

k factor

```
function [Gc, PhaseBoost, kfactor] = K_Factor(sys,fc,pm_deg)
```

```
wc = 2*pi*fc;
```

```
[mag_sys, phase_sys] = bode(sys, wc);
```

```
PhaseBoost= pm_deg - ((phase_sys - 90) + 180);
```

```
if PhaseBoost <= 0,
```

```
    Gc = tf(1,[1 0]);
```

```
elseif PhaseBoost < 90,
```

```
    kfactor = tan(((PhaseBoost+90)*pi/180)/2);
```

```
    wz = wc/kfactor;
```

```
    wp = wc*kfactor;
```

```
    Gc= tf([1/wz 1], [1/wp 1 0]);
```

```
else
```

```
    kfactor = tan(((PhaseBoost+180)*pi/180)/4);
```

```
    wz = wc/kfactor;
```

```
    wp = wc*kfactor;
```

```
    Gc= tf([1/wz^2 2/wz 1],[1/wp^2 2/wp 1 0]);
```

```
end
```

```
mag_wc= bode(sys*Gc, wc);
```

```
Gc= Gc/mag_wc;
```

### Programa Principal

```
clc
```

```
clearall
```

```
Ron=1e-3;
```

```
Rsubber=1e6;
```

```
R_DAB=0.01;
```

```
L_DAB=1.55e-6;
```

```
C_DAB=2.2e-3;
```

```
fs=20e3;
```

```
Ts=1/fs;
```

```
f0=60;
```

```
w0=2*pi*f0;
```

```
Vdcpv=70;
Vbaja=388.91;
```

```
Eref=0.5*C_DAB*Vbaja^2;
phi_max=pi/2;
```

```
n1=1;
n2=Vbaja/Vdcpv;
```

```
BW_DAB=1200;
MF_DAB=60;
Gplanta_DAB=((Vdcpv^2)/(2*pi*fs*L_DAB))*tf(1,[1 0]);
Gc_DAB=K_Factor(Gplanta_DAB,BW_DAB,MF_DAB);
```

```
L_inv=7.253e-3;
R_inv=0.001;
C_inv=4.731e-7;
```

```
Z=17.6;
Inominal=25;
Io_max=Inominal*sqrt(2);
```

```
Gpi_inv=(Vbaja)*tf([Z*C_inv 1],[L_inv*C_inv*Z (R_inv*Z*C_inv+L_inv) (R_inv+Z)]);
Gpv_inv=tf(Z,[Z*C_inv 1]);
```

```
MF_inv=60;
BWi_inv=700;
BWv_inv=100;
```

```
Gci_inv=K_Factor(Gpi_inv,BWi_inv,MF_inv);
Gcv_inv=K_Factor(Gpv_inv,BWv_inv,MF_inv);
```

```
G=Gcv_inv*Gpv_inv;
Gcpr=1.2219*tf([1 685.1 116345.1],[1 0 1.421e5]);
```

```
R=0.0001;
```

```
C_DAB2=2.873e-6;  
L_DAB2=5.82e-6;  
Vbat=96;  
Eref2=0.5*C_DAB2*Vbat^2;  
phi_max=pi/2;
```

```
n3=1;  
n4=Vbaja/96;
```

```
BW_DAB2=1000;  
MF_DAB2=60;  
Gplanta_DAB2=((Vbat^2)/(2*pi*fs*L_DAB2))*tf(1,[1 0]);  
Gc_DAB2=K_Factor(Gplanta_DAB2,BW_DAB2,MF_DAB2);
```

```
BW_DABcarga=1000;  
Gplanta_DABcarga=((Vbat^2)/(2*pi*fs*L_DAB2))*tf(1,[1 0]);  
Gc_DABcarga=K_Factor(Gplanta_DABcarga,BW_DABcarga,MF_DAB2);
```

```
Vstack=100;  
Vbaja=388.91;  
L_DABs=1.16e-6;  
Eref=0.5*C_DAB*Vbaja^2;  
phi_max=pi/2;
```

```
n11=1;  
n22=Vbaja/100;
```

```
BW_DAB=1200;  
MF_DAB=60;  
Gplanta_stack=((Vstack^2)/(2*pi*fs*L_DABs))*tf(1,[1 0]);  
Gc_stack=K_Factor(Gplanta_stack,BW_DAB,MF_DAB);
```

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Dr. Pathiyamattom Sebastián, “ DESARROLLO DE UN SISTEMA HIBRIDO SUSTENTABLE DE FOTOVOLTAICA-HIDROGENO-CELDA DE COMBUSTIBLE PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA”, <http://energia.fi-b.unam.mx:8090/proyecto16/proyecto.pdf> (fecha de consulta OCTUBRE/2014)

[2] Libro de Ciencia y Tecnología N°2, “Tecnologías solar-eólica-hidrógeno-pilas de combustible como fuentes de energía”, <http://www.relaq.mx/RLQ/tutoriales/e-bookCyT2.pdf> (fecha de consulta OCTUBRE/2014)

[3] JESUS OBRERO, “Componentes de una instalación solar fotovoltaica”, Mcgraw-Hill, <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf> (fecha de consulta OCTUBRE/2014)

[4] Henríquez Prevoo Christian Paúl, “REGULADOR DE PANEL SOLAR - BATERÍA - CARGA CON MICROCONTROLADOR PIC”, [http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1383/IME\\_076.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1383/IME_076.pdf?sequence=1) (fecha de consulta OCTUBRE/2014)

[5]MathWorks, SimPowerSystem,“Battery”,  
<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>  
(fecha de consulta NOVIEMBRE/2014)

[6]MathWorks, SimPowerSystem, “Solar  
cell”,<http://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/solarcell.html> (fecha  
de consulta NOVIEMBRE/2014)

[7] MathWorks, SimPowerSystem, “Full cell stack”,  
<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>  
(fecha de consulta NOVIEMBRE/2014)

[8] Tostado Marcos, “Energía solar fotovoltaica”,  
[www.lossabios.com/Documentos.../Energia-solar-fotovoltaica.doc](http://www.lossabios.com/Documentos.../Energia-solar-fotovoltaica.doc)(fecha de  
consulta NOVIEMBRE/2014)

[9]CODESO, “Cálculos para la electrificación solar”,  
<http://www.codeso.com/Calculo03.html> (fecha de consulta ENERO/2015)

[10]CONELEC, “Atlas solar del ecuador con fines de generación eléctrica”,  
2008, [http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf) (fecha de

consulta ENERO/2015)

[11]PROVIENTO, “DATA SHEET PANEL FOTOVOLTAICO SIMAX”,  
<http://www.proviento.com.ec/> (fecha de consulta ENERO/2015)

[12] CENTRO NACIONAL DEL HIDROGENO, “PILAS DE COMBUSTIBLE”,  
<http://www.cnh2.es/info-h2/pilas-de-combustible/>(fecha de consulta  
ENERO/2015)

[13]PROVIENTO, “DATA SHEET BATERIA ULTRACELL”,  
<http://www.proviento.com.ec/> (fecha de consulta ENERO/2015)

[14] HORIZON FUEL CELL TECHNOLOGIES, “DATA SHEET H-1000 PEM  
FUEL CELL 1000W FCS-C1000”, <http://www.horizonfuelcell.com/#!h-series-stacks/c52t> (fecha de consulta ENERO/2015)

[15] Mohan N., Undeland T., Robbins W.; “Power Electronics  
Converters,  
Applications and Design”; John Wiley & Sons, Inc; New York 1995 (fecha de  
consulta MARZO/2015).

[16] Beldjajev Viktor; Roastolndrek; “Dual Active Bridge Based Isolation

Stage for Power Electronic Transformer” (fecha de consulta MARZO/2015).

[17] Krismer Florian, “Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC converter topologies” ( fecha de consulta MARZO/2015).

[18] Rashid Muhammad, “Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones”, Pearson Education 3era Ed., México 2004 (fecha de consulta MARZO/2015).

[19] M Olmo R Nave, “Electrólisis del Agua” <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/electrol.html> (fecha de consulta MARZO/2015).