



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**“MODELADO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN  
FOTOVOLTAICOS CON ALMACENAMIENTO EN BANCO DE  
BATERÍAS DE LITIO PARA UNA MICRORRED AC CON  
CONEXIÓN ON GRID”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

TIPO: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTORA:**

**GEOVANNA FRANSHESCA LUNA SEPULVEDA**

Riobamba – Ecuador

2021



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

#### **“MODELADO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS CON ALMACENAMIENTO EN BANCO DE BATERÍAS DE LITIO PARA UNA MICRORRED AC CON CONEXIÓN ON GRID”**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN**

TIPO: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

#### **INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**AUTORA:** GEOVANNA FRANSHESCA LUNA SEPULVEDA

**DIRECTOR:** Ing. JOSÉ LUIS TINAJERO LEÓN

Riobamba – Ecuador

2021

© 2021, Geovanna Franshesca Luna Sepulveda

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Geovanna Franshesca Luna Sepulveda, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 16 de Febrero de 2021

**Geovanna Franshesca Luna Sepulveda**




**060465351-9**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto de Investigación, **MODELADO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICOS CON ALMACENAMIENTO EN BANCO DE BATERÍAS DE LITIO PARA UNA MICRORRED AC CON CONEXIÓN ON GRID**, realizado por la señorita: **GEOVANNA FRANSHESCA LUNA SEPULVEDA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Mayra Alejandra Pacheco Cunduri <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>MAYRA ALEJANDRA PACHECO CUNDURI</b>	<u>2021-09-16</u>
Ing. José Luis Tinajero León <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	 Firmado electrónicamente por: <b>JOSE LUIS TINAJERO</b>	<u>2021-09-16</u>
Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	 JORGE LUIS PAUCAR SAMANIEGO He revisado este documento	<u>2021-09-16</u>

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mis padres, por su amor y apoyo incondicional brindado a lo largo de mi carrera y del camino de la vida a enseñarme a superarme cada día y no desistir, a mi hermano y hermana por siempre preocuparse por mí y mis estudios y por sacarme una sonrisa, a mi novio por ser un pilar muy importante en mi vida, a mis amigos y amigas que me ayudaron cuando lo necesitaba con sus ánimos; ustedes me impulsan a ser mejor persona.

*Geovanna*

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por el amor y bondad que me das, me permites sonreír ante todos mis logros que son el resultado de tu ayuda, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que me abrió las puertas permitiéndome convertirme en profesional, a todos los profesores de la Facultad de Informática y Electrónica por transmitir sus conocimientos, a mis compañeros de clase, amigas y amigos personales por brindarme su apoyo en aquellos espacios que no comprendía y ayudarme a reforzarlos.

De manera muy especial a mis Padres por enseñarme que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, por hacerme ver la vida de forma diferente con su apoyo y confianza en mis decisiones. Gracias Padre, por sus largas jornadas de trabajo dedicadas a nuestra superación para conseguir nuestros sueños. A mi hermano por su entrañable cariño y de forma referencial a mi hermana por aportarme con sus ideas. Agradezco grandemente por el pequeño tiempo compartido con mi tía madrina, mi tío, mi abuelita y mi pequeño primo, fue muy valioso pasar con ustedes seis meses en medio de la Pandemia. A todos mis demás familiares por sus buenos deseos hacia mí. Gracias a BTS por su hermosa música que me calma en los momentos difíciles de la vida y que me acompañó mientras se realizó el proyecto.

Especialmente agradezco a mi tutor Ing. José Tinajero que sin su ayuda, guía y conocimiento no hubiese sido posible realizar este proyecto de Investigación.

*Geovanna*

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<b>CC.</b>	Corriente Continua
<b>CD.</b>	Corriente Directa
<b>CA.</b>	Corriente Alterna
<b>GD.</b>	Generación Distribuida
<b>AD.</b>	Almacenamiento Distribuido
<b>MR.</b>	Microrred
<b>PAC.</b>	Punto de Acoplamiento
<b>PCC.</b>	Punto de Conexión Común
<b>SEP.</b>	Sistema Eléctrico de Potencia
<b>SFV.</b>	Sistema Fotovoltaico
<b>SFVC.</b>	Sistema Fotovoltaico Conectado a la red
<b>CO2</b>	Dióxido de Carbono
<b>Ip.</b>	Corriente pico
<b>Vp.</b>	Tensión pico
<b>I.</b>	Intensidad
<b>V.</b>	Tensión
<b>Isc.</b>	Intensidad de cortocircuito
<b>Voc.</b>	Tensión de circuito abierto
<b><math>P_{MPP}</math>.</b>	Potencia Máximo pico
<b><math>V_{MPP}</math>.</b>	Tensión en el punto de máxima potencia
<b><math>I_{MPP}</math>.</b>	Intensidad en el punto de máxima potencia
<b>PWM.</b>	Pulse Width Modulation
<b>SPWM.</b>	Senoidal Pulse Width Modulation
<b>MPPT.</b>	Maximum Power Point Tracker
<b>Ah.</b>	Amperios hora
<b><math>C_N</math>.</b>	Capacidad nominal
<b>Wh.</b>	Vatio-hora
<b>A.</b>	Amperios
<b>P.</b>	Potencia activa
<b>Q.</b>	Potencia reactiva
<b>PI.</b>	Proporcional-Integral



## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

## CAPÍTULO I

<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Microrredes.....</b>	<b>5</b>
<i>1.1.1. Operación de una microrred interconectada a la red.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2. Elementos de una microrred.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3. Software de simulación.....</i>	<i>9</i>
<i>1.1.4. Microrredes a nivel mundial.....</i>	<i>10</i>
<i>1.1.5. Microrredes a nivel país.....</i>	<i>11</i>
<b>1.2. Generadores Fotovoltaicos.....</b>	<b>12</b>
<i>1.2.1. Principio de funcionamiento de un sistema fotovoltaico.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2. Energía Solar.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.3. Efecto Fotovoltaico.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.4. Célula Fotovoltaica.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.5. Panel Fotovoltaico.....</i>	<i>15</i>
<b>1.3. Baterías de ión litio.....</b>	<b>19</b>
<i>1.3.1. Funcionamiento de las baterías de litio.....</i>	<i>20</i>
<i>1.3.2. Comparativa entre los diferentes modelos de baterías.....</i>	<i>21</i>
<i>1.3.3. Dimensionamiento de un banco de baterías.....</i>	<i>22</i>
<b>1.4. Control de convertidores electrónicos.....</b>	<b>23</b>
<i>1.4.1. Modulación por ancho de pulso (PWM).....</i>	<i>23</i>
<i>1.4.2. Transformaciones de Clarke y Park.....</i>	<i>27</i>
<i>1.4.3. Inversor para conexión a red.....</i>	<i>29</i>

## CAPÍTULO II

<b>2.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>35</b>
2.1.	Requerimientos para el modelado del sistema .....	35
2.2.	Consolidación general del modelado de la microrred .....	35
2.3.	Arquitectura de hardware del modelado de la microrred .....	36
2.4.	Diseño de las etapas de hardware del modelado de la microrred .....	37
2.4.1.	<i>Etapas de consumo.....</i>	37
2.4.2.	<i>Etapas de Generación .....</i>	37
2.4.3.	<i>Etapas de Almacenamiento.....</i>	38
2.5.	Selección de componentes de hardware para el modelado de la MR.....	38
2.5.1.	<i>Panel Solar Sanyo de Panasonic grupo HIP-190DA3.....</i>	38
2.5.2.	<i>Batería de Litio BYD Battery-Box H 10.2.....</i>	39
2.5.3.	<i>Procesador .....</i>	40
2.6.	Requerimiento de diseño para el software .....	41
2.7.	Arquitectura del software del modelado .....	41
2.7.1.	<i>Herramientas Software de desarrollo .....</i>	41
2.7.2.	<i>Desarrollo del código para el seguimiento de máxima potencia.....</i>	42
2.8.	Diseño de la microrred .....	44
2.8.1.	<i>Modelo de la red eléctrica de distribución .....</i>	44
2.8.2.	<i>Modelo de la carga.....</i>	45
2.8.3.	<i>Modelo de los paneles solares .....</i>	48
2.8.4.	<i>Modelo de la batería electroquímica .....</i>	53
2.8.5.	<i>Modelo de la microrred .....</i>	56

### CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
3.1.	Resultados de la carga de consumo con fuente trifásica .....	60
3.2.	Resultados del controlador MPPT de los paneles solares .....	61
3.3.	Resultados de las baterías con fuente trifásica.....	67
3.4.	Resultados del modelo de la Microrred conectada a la red .....	69
3.4.1.	<i>Prueba 1: producción es menor al consumo y la microrred consume energía de la red.....</i>	69
3.4.2.	<i>Prueba 2: producción es mayor al consumo y la microrred vende energía a la red .....</i>	71
3.4.3.	<i>Prueba 3: producción es menor al consumo y la diferencia es suministrada por las baterías .....</i>	73
3.4.4.	<i>Prueba 4: producción es mayor al consumo y la diferencia es acumulada por las baterías .....</i>	75

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b>	Comparativa entre los tipos de paneles solares .....	17
<b>Tabla 2-1:</b>	Comparativa entre los fabricantes de paneles solares monocristalinos.....	17
<b>Tabla 3-1:</b>	Comparativa entre las diferentes marcas de baterías de ion litio .....	21
<b>Tabla 4-1:</b>	Resumen ecuaciones de Clarke y Park.....	28
<b>Tabla 1-2:</b>	Características de Panel Sanyo HIT-190DA3 .....	39
<b>Tabla 2-2:</b>	Características de BYD B-BOX H 10.2 .....	40
<b>Tabla 3-2:</b>	Características principales HP ENVY 15.....	41
<b>Tabla 4-2:</b>	Cálculo de la demanda energética para una familia de clase media .....	46
<b>Tabla 5-2:</b>	Tabla de configuración de media, alta, y muy alta tensión.....	57
<b>Tabla 1-3:</b>	Balance de potencia para MR conectada a red prueba 1 .....	71
<b>Tabla 2-3:</b>	Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 2.....	73
<b>Tabla 3-3:</b>	Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 3.....	75
<b>Tabla 4-3:</b>	Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 4.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-0:</b>	Modelado de una microrred AC con conexión On Grid para un entorno residencial .....	4
<b>Figura 1-1:</b>	Arquitectura de una microrred.....	6
<b>Figura 2-1:</b>	Microrred conectada a la red. ....	7
<b>Figura 3-1:</b>	Sistema Fotovoltaico como microrred.....	13
<b>Figura 4-1:</b>	Representación del efecto fotovoltaico .....	14
<b>Figura 5-1:</b>	Célula fotovoltaica.....	15
<b>Figura 6-1:</b>	Arreglo fotovoltaico .....	15
<b>Figura 7-1:</b>	Celda solar a) Amorfa, b) Monocristalino, c) Monocristalinas.....	16
<b>Figura 8-1:</b>	Curva característica de un panel fotovoltaico .....	18
<b>Figura 9-1:</b>	Relación de curvas de baterías en función de su voltaje, capacidad, y condiciones de carga y descarga .....	20
<b>Figura 10-1:</b>	Proceso de carga y descarga de una batería de ion-litio .....	21
<b>Figura 11-1:</b>	Conversión CC-CC.....	24
<b>Figura 12-1:</b>	Forma de onda a la entrada del filtro paso-bajo de unconvertidor CC/CC ..	24
<b>Figura 13-1:</b>	Modulación por ancho de pulso (PWM): (a)diagrama de bloques, (b) señales del comparador.....	25
<b>Figura 14-1:</b>	Modulación de ancho de pulso (PWM) .....	27
<b>Figura 15-1:</b>	Esquema control vectorial corriente de un inversor conectado a red.....	29
<b>Figura 16-1:</b>	Reguladores PI para el control de corriente.....	30
<b>Figura 17-1:</b>	Sistemas de referencia estático $\alpha$ - $\beta$ y rotativo d-q .....	31
<b>Figura 18-1:</b>	Esquema control por fuente de corriente con circuito de entrada con condensador.....	32
<b>Figura 19-1:</b>	Controladores por histéresis para el control de corriente.....	33
<b>Figura 20-1:</b>	Lazo de control para el control en fuente de tensión .....	34
<b>Figura 21-1:</b>	Desacoplo de las ecuaciones del regulador de corriente .....	34
<b>Figura 1-2:</b>	Concepción General del Sistema.....	36
<b>Figura 2-2:</b>	Concepción del Sistema por Bloques .....	37
<b>Figura 3-2:</b>	Panel Solar Sanyo de Panasonic Grupo HIP-190DA3.....	38
<b>Figura 4-2:</b>	Batería BYD B-BOX H 10.2 .....	39
<b>Figura 5-2:</b>	HP ENVY 15 .....	40
<b>Figura 6-2:</b>	Diagrama de flujo para el control MPPT. Algoritmo de Perturbar y Observar .....	43
<b>Figura 7-2:</b>	Modelo de la red de distribución <b>a)</b> Bloque Three – Phase Source, <b>b)</b> Configuración de los parámetros .....	45

<b>Figura 8-2:</b>	Modelo zona residencial.....	45
<b>Figura 9-2:</b>	Zona Residencial submodelo.....	47
<b>Figura 10-2:</b>	Modelo paneles solares.....	48
<b>Figura 11-2:</b>	Paneles solares: curvas de corriente y potencia .....	50
<b>Figura 12-2:</b>	Paneles solares: submodelo .....	50
<b>Figura 13-2:</b>	Inversor CC/CA paneles solares: submodelo .....	51
<b>Figura 14-2:</b>	Control de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT.....	51
<b>Figura 15-2:</b>	Control MPPT: variación del punto de máxima potencia para distintas irradiancias .....	52
<b>Figura 16-2:</b>	Control MPPT: variación del punto de máxima potencia para distintas temperaturas .....	52
<b>Figura 17-2:</b>	Control MPPT: parámetros.....	53
<b>Figura 18-2:</b>	Modelo baterías electroquímicas .....	53
<b>Figura 19-2:</b>	Baterías electroquímicas: submodelo .....	55
<b>Figura 20-2:</b>	Inversor CC/CA baterías electroquímicas: submodelo.....	55
<b>Figura 21-2:</b>	Baterías electroquímicas: curva de descarga típica.....	56
<b>Figura 22-2:</b>	Baterías electroquímicas: curva de carga típica.....	56
<b>Figura 23-2:</b>	Microrred red fuerte: centro de transformación .....	58
<b>Figura 24-2:</b>	Modelo de la Microrred.....	59
<b>Figura 1-3:</b>	Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT.....	63
<b>Figura 2-3:</b>	Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT para $500W/m^2$ .....	64
<b>Figura 3-3:</b>	Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT para $10^{\circ}C$ .....	66
<b>Figura 4-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia para $45^{\circ}C$ con control MPPT descendente .....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3:</b>	Zona residencial: resultados de tensión y corriente de red .....	60
<b>Gráfico 2-3:</b>	Zona residencial: resultados de potencia de consumo .....	61
<b>Gráfico 3-3:</b>	Paneles solares: resultados de tensión y corriente de red.....	62
<b>Gráfico 4-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencias de generación sin control MPPT .....	62
<b>Gráfico 5-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencias de generación con control MPPT .....	63
<b>Gráfico 6-3:</b>	Paneles solares: punto de máxima potencia para $500 \text{ W/m}^2$ .....	64
<b>Gráfico 7-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia activa para $500 \text{ W/m}^2$ sin control MPPT .....	64
<b>Gráfico 8-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia activa para $500 \text{ W/m}^2$ con control MPPT .....	65
<b>Gráfico 9-3:</b>	Paneles solares: punto de máxima potencia para $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	65
<b>Gráfico 10-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia para $10 \text{ }^\circ\text{C}$ sin control MPPT.....	65
<b>Gráfico 11-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia para $10 \text{ }^\circ\text{C}$ con control MPPT.....	66
<b>Gráfico 12-3:</b>	Paneles solares: punto de máxima potencia para $45 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	66
<b>Gráfico 13-3:</b>	Paneles solares: resultados de potencia para $45 \text{ }^\circ\text{C}$ con control MPPT descendente .....	67
<b>Gráfico 14-3:</b>	Baterías electroquímicas: resultados de tensión y corriente de red.....	68
<b>Gráfico 15-3:</b>	Baterías electroquímicas: resultados de potencias de almacenamiento. Aporte de energía .....	68
<b>Gráfico 16-3:</b>	Baterías electroquímicas: resultados de potencias de almacenamiento. Almacenamiento de energía .....	69
<b>Gráfico 17-3:</b>	Potencia activa y reactiva entregadas por la generación solar .....	70
<b>Gráfico 18-3:</b>	Potencia activa y reactiva consumida por la carga residencial .....	70
<b>Gráfico 19-3:</b>	Potencia activa y potencia reactiva entregadas por la red.....	71
<b>Gráfico 20-3:</b>	Potencia activa y potencia reactiva entregadas por la generación solar.....	72
<b>Gráfico 21-3:</b>	Potencia activa y potencia reactiva vendidas a la red .....	73
<b>Gráfico 22-3:</b>	Potencia activa y potencia reactiva aportadas por la batería de almacenamiento.....	74
<b>Gráfico 23-3:</b>	Consumo nulo de activa y reactiva de la red .....	74
<b>Gráfico 24-3:</b>	Potencia activa almacenada en las baterías electroquímicas (sin almacenamiento de reactiva) .....	76
<b>Gráfico 25-3:</b>	Venta nula de potencia activa a la red y consumo de reactiva.....	76

## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Ficha técnica de Panel Solar Sanyo de Panasonic Grupo HIP-190DA3
- Anexo B:** Ficha técnica de Batería de Litio BYD Battery-Box H 10.2
- Anexo C:** Modelo del ejemplo de Matlab: 24-hour Simulation of a Vehicle-to-Grid (V2G) System y el submodelo de la carga residencial
- Anexo D:** Control Corriente Paneles Solares
- Anexo E:** Código del Algoritmo de Perturba y Observa
- Anexo F:** Control Corriente para Fuentes DC



## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el modelado de un sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento en banco de baterías de ion litio para una microrred de Corriente Alterna (CA) con conexión on-grid. Se realizó un análisis de la arquitectura y operación de la microrred (MR) y de cada uno de sus elementos; entendiéndose que por elementos de la microrred (MR) se encuentra la carga de consumo, generación distribuida (GD) y almacenamiento distribuido, (AD) y en algunos casos como en esta aplicación la red de distribución; se procedió con la selección de los elementos para el modelamiento de cada uno de ellos con su respectiva elección de la configuración de la red, elección de potencia de consumo y submodelo realizado mediante Simulink de forma independiente para después integrarlo en un solo bloque, además se realizó una recopilación de información sobre control de convertidores electrónicos entre estos están los más utilizados como modulación por ancho de pulso (PWM) y las transformaciones de Clarke y Park para realizar el control del inversor tanto de los paneles solares y de las baterías electroquímicas. De los resultados obtenidos, el control por corriente de los inversores funciona correctamente por lo que se logra la conexión tanto de los paneles como de las baterías a la red, permite la integración completa de energías renovables y tecnologías de almacenamiento de la energía. Se concluye que resulta ser un método eficaz de gestión de la energía. Para un mejor funcionamiento se debería desarrollar un control de la batería de forma autónoma.

**Palabras clave:** <MICRORREDES>, <CONEXIÓN ON-GRID>, <CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA>, <GENERACIÓN FOTOVOLTAICA>, <BANCO DE BATERÍAS>, <CARGA RESIDENCIAL>, <RED DE DISTRIBUCIÓN>, <SIMULINK>.



Firmado electrónicamente por:  
**ELIZABETH FERNANDA  
AREVALO MEDINA**



1371-DBRAI-UPT-2021

## ABSTRACT

The aim of this research project was to model a photovoltaic generation system with lithium-ion battery bank storage for an Alternating Current (AC) microgrid with on-grid connection. An analysis of the architecture and operation of the microgrid (MR) and each of its elements was carried out. The elements of the microgrid (MR) under analysis were the consumption load, distributed generation (DG) and distributed storage, (DS) and in some cases, as in this application, the distribution network. We proceeded with the selection of the elements for the modeling of each one of them with their respective choice of network configuration, choice of power consumption and sub-model, modeled independently through Simulink and then integrated into a single block. In addition, information was compiled regarding the control of electronic converters, among these are the most commonly used options such as pulse width modulation (PWM) and Clarke and Park transformations to perform inverter control for both solar panels and electrochemical batteries. The results obtained demonstrate that the current-controlled inverters work correctly so that both the panels and the batteries are connected to the grid, allowing for the complete integration of renewable energy and energy storage technologies. It is concluded that this is an effective energy management method. For improved functioning it is recommended that an autonomous battery control should be developed.

**Keywords:** <MICRONETWORKS>, <ON-GRID CONNECTION>, <POWER ELECTRONIC CONVERTERS>, <PHOTOVOLTAIC GENERATION>, <BATTERY BANK>, <RESIDENTIAL CHARGE>, <DISTRIBUTION NETWORK>, <SIMULINK>.



Firmado electrónicamente por:

**LENIN  
IVAN LARA**

## **INTRODUCCIÓN**

La generación y el consumo de energía es uno de los ámbitos más importantes sobre los cuales se debe enfocar el desarrollo de un país, orientándose a una menor dependencia del empleo de combustibles fósiles y a un mayor aprovechamiento de las energías renovables. Hoy en día existen varios mecanismos que coadyuvan a obtener energía sin el uso de recursos no renovables uno de ellos son los sistemas fotovoltaicos.

La energía solar fotovoltaica representa el uno por ciento del total de la capacidad eléctrica del mundo, el porcentaje que constituye dentro del mix energético de cada país es mucho mayor; principalmente en países donde se ha favorecido la inversión en energías renovables. Esto demuestra que el crecimiento de esta energía renovable puede potenciarse dependiendo de los objetivos y políticas que se propongan los países, en favor de la alternabilidad energética (Santillán Tituaña, 2015-2016).

Las centrales de sistemas de generación fotovoltaicos presentan la desventaja de que solamente suministra energía cuando está presente el recurso primario (radiación solar), una solución a este característico es el almacenamiento de energía, que en microrredes (baja - media potencia), es preferible mediante bancos de baterías. Las baterías posibilitan el almacenamiento de la energía para después distribuir en ciertos periodos donde es imprescindible mejorar el servicio, por ejemplo: los niveles de voltaje, el costo de la energía, aplanamiento de la curva de carga, confiabilidad, niveles de pérdidas, etc (VILLA ENDARA, 2017). No obstante, las baterías poseen vida útil, una potencia máxima de carga/descarga y una capacidad de almacenamiento.

Orientado en el uso de energías renovables se introduce el concepto de microrredes (MR), los cuales son sistemas pequeños e independientes adecuados a cada consumo en particular de tal forma que la energía eléctrica solicitada obtenga una elevada fiabilidad, eficiencia y un coste competitivo. Pueden estar conectadas a la red general por un punto que mantiene el voltaje al mismo nivel, pero si detecta problemas se puede desconectar y no verse afectada.

En el presente documento, se propone y desarrolla un modelo de microrred, incluyendo la red de distribución eléctrica, el sistema de generación fotovoltaica, sistema de almacenamiento de energía con sus agentes consumidores; comprobando mediante simulación la operación de la microrred (MR) analizando factores de eficiencia energética además de cumplir con la demanda energética.

## **FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo se optimiza el consumo energético de la red eléctrica, mediante el modelo de un sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento en un banco de baterías de litio para microrred AC con conexión on-grid?

## **SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA**

- ¿Cómo es la arquitectura y operación de las microrredes?
- ¿Cómo operan los sistemas de generación fotovoltaicos?
- ¿Cómo opera el sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de litio?
- ¿Cómo funcionan los diferentes tipos de control de convertidores electrónicos?
- ¿Cuál sería el modelo de la microrred incluyendo la red de distribución eléctrica, el sistema de generación fotovoltaica, sistema de almacenamiento de energía y agentes consumidores?
- ¿Cuáles serían los resultados del modelo de la microrred mediante simulación?

## **JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

En la actualidad, el uso de la energía eléctrica tiene una incidencia significativa en el avance socioeconómico de las regiones, a causa de esto se incrementa la demanda energética tanto en zonas urbanas como rurales, por tanto, se debe satisfacer la demanda a través del incremento en la capacidad de generación. Sin embargo, algunas zonas rurales no disponen con suministro de electricidad, de modo que es necesario extender la red de potencia hasta estos lugares, en el caso de que esto no sea posible o sea inviable, es preciso llevar a cabo sistemas de generación distribuida, constituidos generalmente por generadores que trabajan a base de combustibles fósiles. De acuerdo con el último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas (INEC) al año 2010 el 95% de la población ecuatoriana tiene acceso a energía eléctrica (BID, 2013); mientras que el resto al no tener acceso a este servicio no cuentan con salud, educación y comunicación, por ende, generando pobreza.

El aumento del consumo de energía eléctrica en el Ecuador y la búsqueda de fuentes de energías renovables, con las cuales se busca reducir el impacto ambiental; ha dado lugar a un acelerado desarrollo de tecnologías como son la generación de energía eólica y fotovoltaica (Guamán Sánchez, 2017).

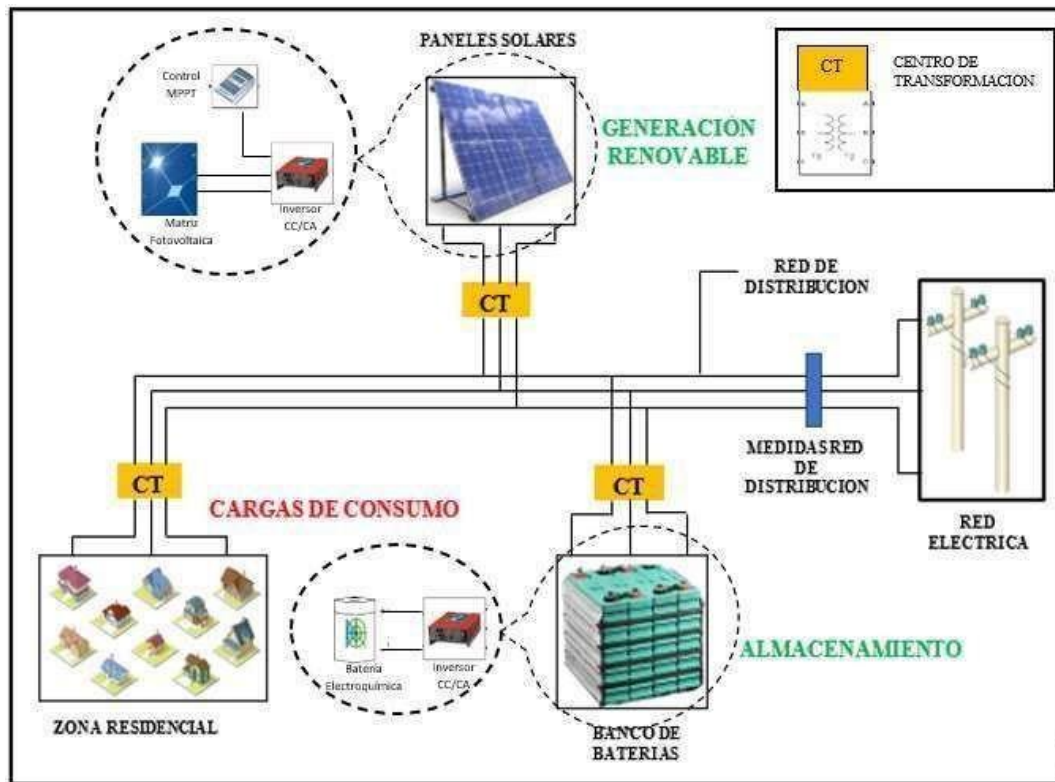
A través de la aplicación de microrredes las cuales son un grupo de cargas, generación y sistemas de almacenamiento de energía; que pueden operar en isla o conectados a la red convencional de distribución eléctrica, se podrá suministrar energía eléctrica de manera segura, eficiente y a un coste competitivo. Además, cuentan con varias ventajas como la reducción de pérdidas en la red, descongestión de los sistemas de transporte de energía y decremanta el impacto ambiental del sistema eléctrico.

Son estas razones por las que se propone desarrollar el presente proyecto de modelado de una microrred basada en energías renovables principalmente la fotovoltaica junto con su respectivo sistema de almacenamiento para suministrar electricidad, la microrred diseñada será capaz de ofrecer el suministro eléctrico en la cantidad requerida, en el instante que se necesite y con una calidad adecuada respetando con la demanda energética.

### **JUSTIFICACIÓN APLICATIVA**

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, será por una parte bibliográfico-documental para identificar la arquitectura y el funcionamiento de cada parte del sistema y determinar la solución más conveniente al problema planteado. Por otra parte, esta metodología deberá ser también Analítico-Sistemática para determinar los modelos matemáticos de las diferentes partes involucradas en el desarrollo de la investigación. La metodología sistemática se requiere debido a que en este trabajo se utilizan herramientas de simulación para realizar una posterior evaluación de los resultados obtenidos con estos modelos y así poder evaluar las características y capacidades del esquema de la microrred.

El presente documento está orientado en la gestión de una microrred conectada a la red local, específicamente de una zona residencial mostrada en la Figura 1-0. Los resultados de este trabajo logran determinar un modelo completo de operación para sistemas de generación distribuida partiendo desde el dimensionamiento y modelado de los agentes consumidores, seguidamente de paneles fotovoltaicos, el banco de baterías como sistema de almacenamiento y finalmente con la red de distribución; este estudio permite aportar métodos de análisis para construir nuevos esquemas técnicos para el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector eléctrico residencial para que un futuro pueda ser implementado por cualquier ente que lo requiera.



**Figura 1-0.** Modelado de una microrred CA con conexión On Grid para un entorno residencial.

Realizado por: Luna, G. 2020

## OBJETIVOS OBJETIVO GENERAL

Modelar un sistema de generación fotovoltaica que integre almacenamiento de energía mediante un banco de baterías de litio para microrredes de Corriente Alterna (CA) con capacidad de conexión on-grid.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar y analizar la arquitectura eléctrica y operación de las microrredes.
- Analizar el dimensionamiento y operación de los sistemas fotovoltaicos.
- Analizar el dimensionamiento y operación del sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de litio.
- Estudiar el control de convertidores electrónicos para los elementos que forman la microrred.
- Modelar la microrred incluyendo la red de distribución eléctrica, el sistema de generación fotovoltaica, sistema de almacenamiento de energía y agentes consumidores.
- Validar mediante simulación la operación de la microrred analizando factores de eficiencia energética y cumpliendo con la demanda energética.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se realiza la descripción de las microrredes como su arquitectura, modo de operación cuando se encuentra conectada a la red para cargas que trabajan en corriente alterna (CA.), los elementos que lo conforman, softwares de simulación y de algunos proyectos a nivel mundial. Se detalla acerca de los sistemas fotovoltaicos como su principio de funcionamiento, la energía solar, célula y paneles fotovoltaicos. Se especifica también una tabla sobre las diferentes marcas de baterías de ión litio como sistema de almacenamiento, su funcionamiento. Y por último diferentes modos de control para los convertidores al igual para los inversores.

### 1.1. Microrredes

Varios autores relacionados con este tema (Ton & Smith, 2012; CERTS<sup>1</sup>, 2019; Scott, 2016; IRENA, 2019; citados en Álvaro Hermana, y otros, 2020) establecen definiciones sobre microrredes desde diferentes puntos de vista cambiando tanto en su parte científica como legislativa, pero en general los aspectos principales que distinguen a una microrred no varían. Se puede decir que las microrredes son pequeñas redes eléctricas generalmente de media y baja tensión ubicadas cerca del consumidor, conformadas por un conjunto de cargas, Generación Distribuida (GD) tanto de recursos renovables como convencionales, sistemas de Almacenamiento Distribuido (AD) y por un sistema de control como se puede apreciar en la Figura 1-1 comportándose colectivamente como un único sistema consumidor o productor.

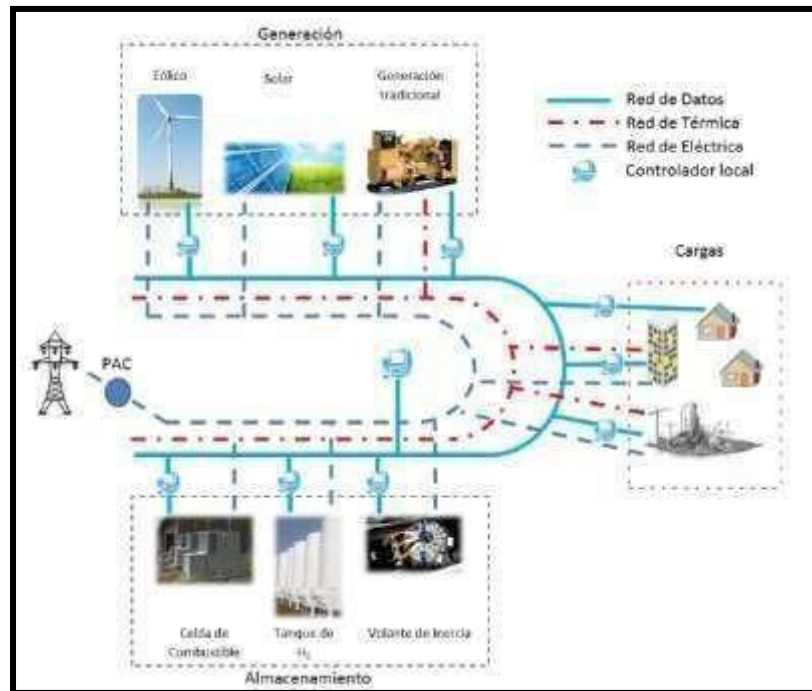
---

Llegan a ser una opción de abastecimiento de gran beneficio al integrar energías renovables como generadores. Puesto que tienen como objetivo garantizar una fuente de energía local, rentable y sostenible.

La microrred (MR) (MICRORREDES BASADAS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA: CARACTERÍSTICAS, OPERACIÓN Y ESTABILIDAD., 2014) al ser capaz de gestionar automáticamente los flujos de energía y autoajustarse a los cambios de suministros y la demanda de energía se la denomina red inteligente o Smart Grid transformándose en un sistema eficiente y adaptable.

---

<sup>1</sup> Consortium for Electric Reliability Technology Solutions.



**Figura 1-1.** Arquitectura de una microrred

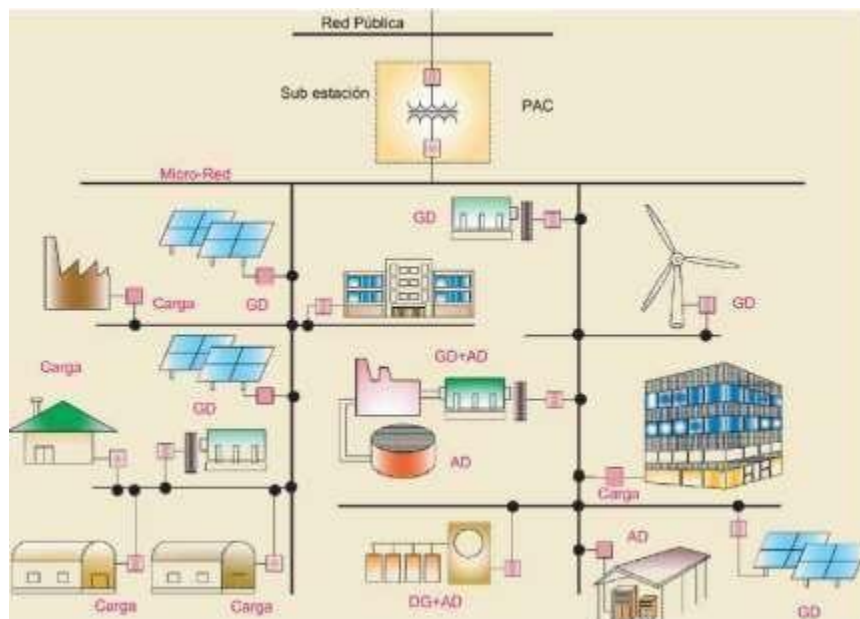
Fuente: Medina Ricardo, 2014, pp. 18

Tanto la MR como la Smart Grid vienen a ser lo mismo de un término general que es la Generación Distribuida (GD) con la diferencia de que la primera controla hasta 10 MW y la segunda se controla hasta 50 MW y en algunos casos hasta 60 MW de potencia entre generación y consumo.

### ***1.1.1. Operación de una microrred interconectada a la red***

Este modo de operación es presentado en la Figura 2-1, la microrred (MR) se conecta al sistema mediante un punto de acoplamiento o conexión común (PAC o PCC), este interruptor puede desconectar la red si la calidad del suministro disminuye por debajo de un umbral definido y previa orden del control de la MR, por tanto, dentro de este modo se puede operar conectado o desconectado a la red (Pérez Fernandez, 2017):





**Figura 2-1.** Microrred conectada a la red.

Fuente: Medina Ricardo, 2014. pp 16

- **Conectado a la red:** La microrred (MR) procura abastecer la mayor cantidad de energía demandada por las cargas de forma que no es necesario que toda la energía sea producida por los generadores; y gestiona la carga/descarga de los sistemas de almacenamiento, de manera que la red funcione como un nodo slack (nodo de balance), desde este contexto la MR podrá ser vista como un pequeño generador o como una carga en función de si la generación es mayor o menor que la energía demandada por las cargas. El sistema de control tiene como objetivo la disminución de coste de la energía para los consumidores que están asociados a ella y usa la generación local cuando es económicamente rentable disminuyendo la cantidad de energía que toma de la red.
- **Desconectado de la red:** Esta capacidad de operación de forma aislada y autónoma repercute favorablemente en la calidad y fiabilidad del suministro eléctrico. Este modo será activado cuando:
  - La red brinda suministro con baja calidad de la energía, es decir, alguno de los parámetros del sistema no cumple con las expectativas de las cargas.
  - Como respuesta a los precios de la energía.
  - Durante momentos de estrés del sistema, esto incluye horas pico, estado de alerta de la red, emergencia o recuperación del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

### ***1.1.2. Elementos de una microrred***

Como ya se había comentado anteriormente una microrred está compuesta de Generación Distribuida (GD), Almacenamiento Distribuido (AD) y cargas a lo que se refiere a la demanda energética, los cuales se detallará a continuación.

#### **Generación Distribuida (GD)**

Este concepto aparece en los últimos años debido a la evolución que ha tenido el sistema eléctrico, de acuerdo con el Reglamento General de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) son pequeñas centrales de generación instaladas cerca del consumo y conectadas a la red de la distribuidora (Dirección Nacional de Regulación Técnica, 2020). En general, este término es el fundamento de la idea de una Microrred. Existen dos tipos de tecnologías de generación:

- **Fuentes Renovables:** Se utilizan recursos ilimitados como la fotovoltaica, eólica, minihidráulica (central hidráulica a pequeña escala), oceánica, entre otros.
- **Fuentes No Renovables:** Se utilizan recursos limitados como motores alternativos, turbinas de gas, entre otros.

La GD permite minimizar las pérdidas de energía mejorando la fiabilidad y la calidad del servicio eléctrico, estabilizar los flujos de energía en momentos de demanda máxima, la inclusión de energías renovables reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### **Almacenamiento Distribuido (AD)**

El almacenamiento de energía es la acumulación de energía en cualquiera de sus formas, para posteriormente ser convertida en energía eléctrica. Dentro del concepto de microrredes, la función principal del AD es almacenar energía cuando sea barato generarla y entregarla en horas de alta demanda (VILLA ENDARA, 2017).

En la actualidad se utilizan tecnologías de almacenamiento que ayudan a mejorar el desequilibrio de energía, su calidad, estabilidad entre cargas y la salida de recursos generados distribuidos como: súper capacitores, baterías electroquímicas y de flujo, almacenamiento por compresión de aire (Compressed Air Energy Storage, CAES), volantes de inercia de alta y baja velocidad (flywheels), almacenamiento por superconductores magnéticos (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES), bombeo de agua (Pumped Hydro Storage, PHS), entre otros.

#### **Cargas**

Conocido también como subsistema de utilización o sistema de consumo y no es más que un conjunto de clientes o usuarios que son los destinatarios de la energía eléctrica que ha pasado

por todas las etapas anteriores de la energía eléctrica (Generación, Transmisión y Distribución) dentro de un sistema eléctrico de potencia.

Este sistema puede clasificarse por el tipo de cargas que tengan los usuarios finales dentro de sus instalaciones eléctricas para su consumo, pudiendo ser éstas residenciales, comerciales e industriales; las instalaciones residenciales y comerciales contienen cargas básicas como aparatos de alumbrado, cocción y ambientación, las instalaciones industriales en cambio se caracterizan por tener cargas como motores de inducción, transformadores, etc (Mosquera Tello,2014).

### ***1.1.3. Software de simulación***

Para el proceso de validación de la MR modelada se hablará de cuatro programas de simulación distintos que se pueden utilizar para realizar Microrredes: HOMER, TRNSYS, DigSILENT y Matlab. Para cada uno de ellos se indica su disponibilidad y se realiza una breve descripción del software.

#### **HOMER**

**Disponibilidad:** Tiene una prueba gratuita de 21 días.

**Descripción:** HOMER de sus siglas en inglés Hybrid Optimization of Multiple Resources es un software originalmente desarrollado por NationalRenewableEnergyLaboratory, mejorado y distribuido por HomerEnergy, extensamente utilizado para el diseño de redes aisladas remotas en cualquier sector, ya sea industrial, doméstico, militar, etc (BERTUA RÍOS, 2016-2017). Es un software de optimización de potencia enfocado a la toma de decisiones en MR y espacios con recursos de energía distribuida.

#### **TRNSYS**

**Disponibilidad:** Versión demo disponible que se renueva anualmente cada septiembre. Programa completo en versión de educación, pero de pago, aunque más económica que la versión comercial.

**Descripción:** TRNSYS de sus siglas en inglés TRaNsient SYStem es un paquete de software comercial desarrollado en la Universidad de Wisconsin, utilizado principalmente en los campos de la ingeniería de las energías renovables y la simulación de sistemas solares pasivos, así como el diseño solar activo (Cerezo Román, 2018).

#### **DigSILENT**

**Disponibilidad:** Versión demo para empresas y uso académico, pero sin versión gratuita.

**Descripción:** Software altamente especializado en el campo de los sistemas eléctricos de potencia desarrollado por la compañía alemana consultora DigSILENT GmbH. Es una herramienta computarizada avanzada de diseño asistido en ingeniería para el análisis de sistemas eléctricos de potencia, comercial e industriales y a gran escala. Ha sido diseñado como un avanzado, integrado e interactivo paquete computacional dedicado a los sistemas de potencia para lograr los objetivos principales de planificación y operación (Alfajarrín García, 2016).

### MATLAB

**Disponibilidad:** MATLAB está disponible para diversas plataformas (Windows, GNU/Linux, MacOS) bajo diferentes tipos de licencias privativas. Estas licencias suelen tener un alto coste, aunque existen licencias para estudiantes.

**Descripción:** De la abreviatura MATrix LABoratory, cuenta con un entorno de diagrama de bloques para Model-Based Design en Simulink al ser un complemento de MATLAB permite visualizar y tratar los gráficos en donde se reflejan los resultados con el editor del programa matemático.

#### ***1.1.4. Microrredes a nivel mundial***

Las MR han sido implementadas a nivel mundial existiendo más relevancia en ciertos países que en otros a continuación se hablará de tres casos de MR; I-SARE (2014), ATENEA (2013) y HUATACONDO (2010)

##### *I-SARE (2014)*

Impulsada por la Diputación Foral de Guipúzcoa y ubicada en el Edificio EnerTic del Polígono 27 en San Sebastián, i-Sare Microgrid Guipúzcoa es la primera microrred experimental operativa del Estado con 400 kW de potencia y sirve como banco de ensayo para desarrollar y experimentar la eficacia y viabilidad de diferentes tecnologías de generación y almacenamiento eléctrico. Gestiona eficientemente la energía para poder ajustar al máximo la generación a la demanda en cada momento, buscando siempre la mayor eficiencia (el coste energético mínimo), favoreciendo la integración de las fuentes de generación de origen renovable. Al gestionar la energía de manera eficiente, optimizando los recursos y distribuyendo la energía de forma automatizada e inteligente, i-Sare contribuye al ahorro de energía, reduciendo costes, optimizando las infraestructuras e incrementando la fiabilidad del sistema (Pérez, 2017a: p. 83).

### ATENEA (2013)

La instalación está ubicada en el recinto del Laboratorio de Ensayos de Aerogeneradores (LEA) de CENER, en el polígono industrial Rocaforte de Sangüesa (Navarra) y ha sido desarrollada por el Departamento de Integración en Red de Energías Renovables. La microrred de CENER conjuga una amplia variedad de sistemas de generación tanto renovables como convencionales junto con un gran catálogo de sistemas de almacenamiento avanzados. El objetivo de esta instalación es demostrar la viabilidad de esta alternativa de suministro energético integral en un entorno industrial además de servir como banco de pruebas y laboratorio de ensayos para tecnologías relacionadas con el desarrollo de microrredes (Pérez, 2017b: p. 86).

### HUATACONDO (2010)

Huatacondo es un pequeño pueblo aislado, ubicado en el desierto de Atacama, al norte de Chile, compuesto por aproximadamente 30 familias. El sistema fue diseñado por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. El proyecto consistió en construir una microrred basada en los recursos renovables particulares de la zona, junto al generador diésel ya existente, y ofrecer suministro eléctrico las 24 horas del día. El sistema está formado por paneles fotovoltaicos, una turbina eólica, un generador diésel, un banco de baterías y un mecanismo de gestión de la demanda colocado en cada casa (Pérez, 2017c: p.90).

#### **1.1.5. Microrredes a nivel país**

Ecuador también ha tenido interés con respecto al desarrollo de las energías alternativas con recursos renovables y amigables con el medio. Algunas instituciones del estado como el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), la Corporación Nacional de Electricidad (CNEL), la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), entre otras; han desarrollado proyectos basados en fuentes renovables de energía, de las cuales algunas de ellas se encuentran en construcción y otras ya en funcionamiento. A continuación, se realiza una breve descripción de algunos proyectos de generación alternativa en el Ecuador.

### PARQUE EÓLICO ISLA SAN CRISTÓBAL

Ubicada en el Archipiélago de las Galápagos, se inauguró en octubre del 2007 y está constituido por 3 aerogeneradores de 800 kW de potencia cada una, con una potencia total instalada de 2.4 MW. La central eólica sustituyó a las centrales a diésel que operaban en la isla para suministrar energía a la población de la isla (SANANGO FERNÁNDEZ, 2015a: p. 37).

### PARQUE EÓLICO VILLONACO

Ubicada a 4 km de la ciudad de Loja, constituido por 11 aerogeneradores con una potencia instalada de 16.5 MW y aportará 60 millones de kWh/año al Sistema Nacional Interconectado del Ecuador (SANANGO FERNÁNDEZ, 2015b: p. 38).

### CENTRAL FOTOVOLTAICA PIMAMPIRO

Ubicada en la comunidad de Paragachi perteneciente al cantón Pimampiro de la provincia de Imbabura es la primera planta fotovoltaica del Ecuador a gran escala, con 4160 paneles solares con una potencia total instalada de 28 MW con su incorporación a la red eléctrica en corto tiempo (SANANGO FERNÁNDEZ, 2015c: p. 38).

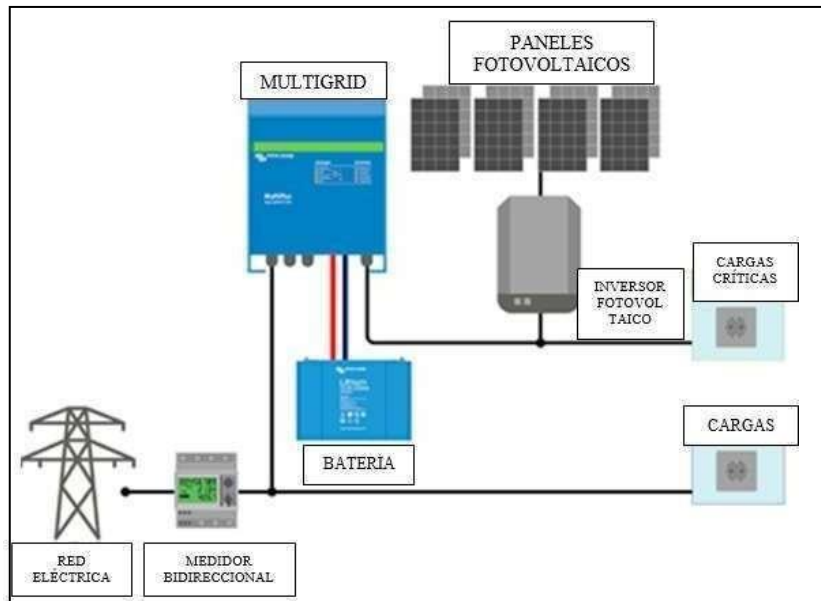
### SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN LAS COMUNIDADES SHUAR

Sistemas fotovoltaicos a pequeña escala instalados y operando en las comunidades Shuar de la provincia de Morona Santiago. Estos sistemas son aislados y no tiene conexión alguna con la red de distribución (SANANGO FERNÁNDEZ, 2015d: p. 38).

## **1.2. Generadores Fotovoltaicos**

Conjunto de componentes que permiten generar, controlar, transformar, almacenar y poner a disposición para el consumo la energía eléctrica proveniente de la radiación solar que puede ser aprovechada por usuarios aislados o conectados de la red (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2011a: p. 38).

**Sistema fotovoltaico de microrred (SFVC):** Sistema fotovoltaico centralizado que sirve a más de un usuario. Una microrred incluye otros componentes mostrados en la Figura 3-1 como las redes de distribución y los contadores o medidores de consumo (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2011b: p. 36).



**Figura 3-1.** Sistema Fotovoltaico como microrred.

**Fuente:** <https://autosolar.es/inversores-cargadores-24v/inversor-victron-multigríd-3000va-24v-7050a>

**Modificado por:** Luna, G. 2020

### ***1.2.1. Principio de funcionamiento de un sistema fotovoltaico***

Consiste en la incidencia de la radiación solar sobre la tierra en forma de fotones (partículas en forma de energía), esta es transformada en corriente directa a través de los paneles fotovoltaicos y por medio de un inversor adecua la energía a las características eléctricas de la red a la cual se conectará la demanda.

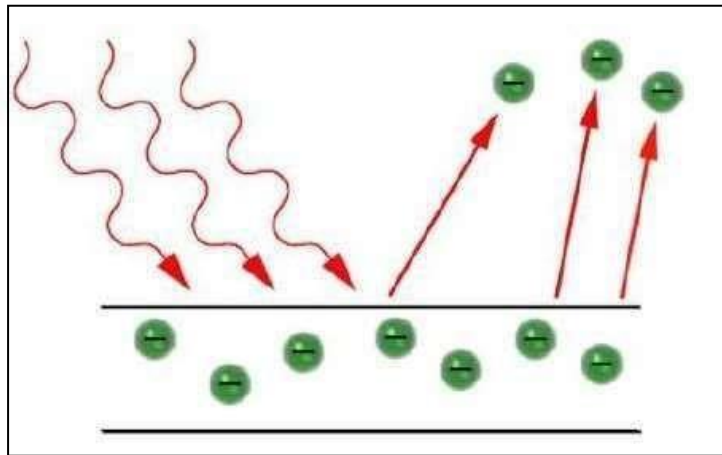
### ***1.2.2. Energía Solar***

La energía solar es la energía producida por el sol y es convertida en energía útil por el ser humano, Ecuador se encuentra dentro de la Subregión Comunidad Andina debido a que posee abundantes recursos renovables, lo que permite obtener una mejor productividad referente a la absorción, transformación y entrega de energía. En el año 2008 se realiza el Atlas Solar de Ecuador con el objetivo de contar con un documento en que se sustente el potencial de la energía solar presente en el país, debido a que el ángulo de incidencia de la luz solar es perpendicular a la superficie durante todo el año, mientras que en otros países al tener diferentes estaciones al año hace que el ángulo de incidencia de luz varíe dificultando el uso de recursos solares.

Al estar dentro de la Subregión Comunidad Andina forma parte de la franja tropical, cuyas características principales es la presencia de altos niveles de insolación debido a que ciertas zonas son de clima frío, árido, semiárido o montañoso. La irradiación global horizontal anual sobre el Ecuador varía desde 2.9 kWh/m<sup>2</sup>día a 6.3 kWh/m<sup>2</sup>día.

### 1.2.3. Efecto Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. Comienza en el momento en el que el fotón<sup>2</sup> impacta con un electrón de la última órbita (electrón de valencia) de un átomo de silicio<sup>3</sup> recibiendo la energía con la que viaja el fotón. Si la energía que adquiere el electrón supera la fuerza de atracción del núcleo (energía de valencia), este sale de su órbita y queda libre del átomo para viajar por el material (Oriol, 2015), en la Figura 4-1 se muestra una representación del efecto fotovoltaico para un mayor entendimiento. Para conseguir este efecto se necesita como mínimo una fuerza de impacto de 1.2 eV.



**Figura 4-1.** Representación del efecto fotovoltaico

Fuente: Oriol, 2015

### 1.2.4. Célula Fotovoltaica

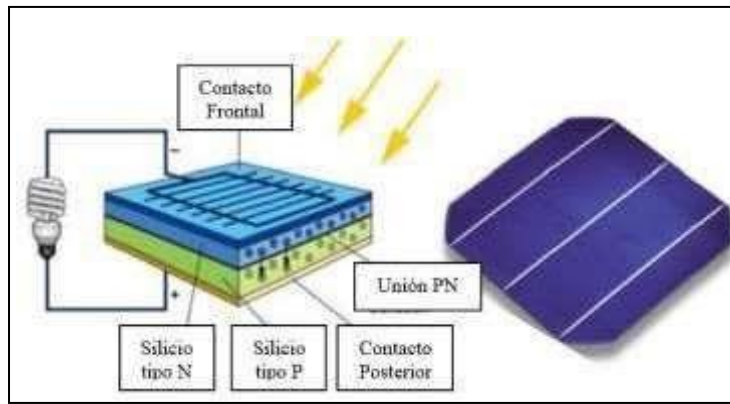
Conocido también como fotocélula, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía de la luz en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, produciendo corriente eléctrica gracias al campo eléctrico que se genera en la célula fotovoltaica, debido a que ésta se compone de dos láminas de un material semiconductor como se muestra en la Figura 5-1, pero de cargas opuestas cada una.

---

<sup>2</sup> Partícula de luz radiante.

<sup>3</sup> Material semiconductor.





**Figura 5-1.** Célula fotovoltaica.

**Fuente:** Mártil, 2015

**Modificado por:** Luna Geovanna, 2020

### 1.2.5. *Panel Fotovoltaico*

Es un conjunto de celdas o células solares, estas están hechas de semiconductores que forman uniones p-n como se indica en la Figura 6-1, el número de unidades dependerá de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados, el voltaje de salida del arreglo que corresponde al voltaje de operación del inversor se obtiene mediante la conexión en serie de un número determinado de paneles solares fotovoltaicos, y la potencia a través de la conexión paralelo de dichas series (RENOVAENERGIA).



**Figura 6-1.** Arreglo fotovoltaico.

**Fuente:** <https://www.energyrefuge.com/blog/wp-content/uploads/PrimeStar-Solar-Array.jpg>.

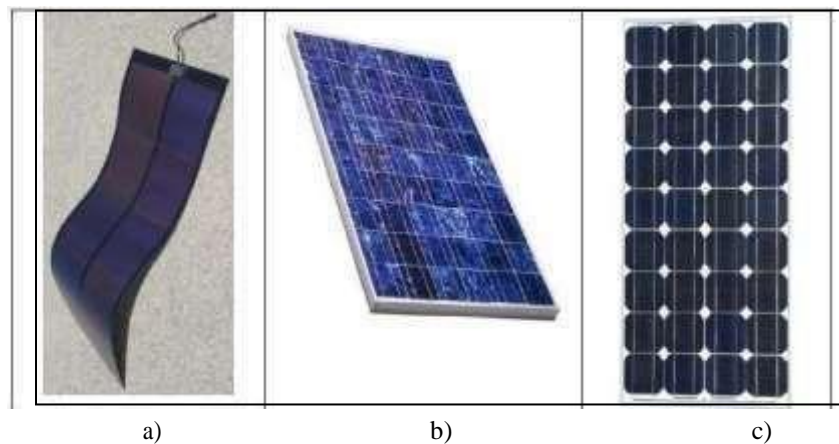
### Tipos de Paneles Fotovoltaicos

Actualmente, las células solares más utilizados están hechos de silicio y existen tres tipos básicos usadas comercialmente según Guamán Sánchez (2017):

- **Celdas solares amorfas:** En la Figura 7-1a se muestra este tipo de celda, se distinguen por ser más flexibles y resistentes que el resto, lo que les permite adaptarse mejor a casi cualquier

espacio, compuestas por una capa de silicio bruto, telurio de cadmio, indio, galio o selenio. La elaboración de estas celdas puede ser más económica debido al uso de un silicio sin pulir, pero no es muy viable usarlas en equipos fotovoltaicos, debido a su aprovechamiento de la energía de un 5% a 7%.

- **Celdas solares policristalinas:** Formadas de un silicio que se somete a menos procesos de filtrado que no eliminan todas las impurezas, fundido y enfriado de manera artificial, provocando la formación de varios cristales en la célula. Esto le da un aspecto azulado no uniforme con tonalidades negras o verdes como se muestra en la Figura 7-1b. Además del color, otra cosa que distingue a este tipo de celdas es que tienen una forma más rectangular y son usados para climas cálidos.
- **Celdas solares monocristalinas:** Hechas de un solo cristal de silicio de mayor pureza y calidad lo que aumenta su capacidad para aprovechar la energía en comparación con las policristalinas y las amorfas, se caracteriza por su color uniforme normalmente de color negro o azulado y esquinas redondeadas como se observa en la Figura 7-1c. Estos paneles tienen mayor eficiencia a niveles bajos de luminosidad (climas fríos), también aprovechan mejor el espacio debido a su tamaño.



**Figura 7-1.** Celda solar a) Capa Amorfa (Amorfa), b) Monocristalino, c) Monocristalinas

**Fuente:** SAVEENERGY, 2019

En la Tabla 1-1 se realiza una comparativa entre los paneles amorfos, policristalinos y monocristalinos, ayudará para definir qué panel solar es el más adecuado para nuestro modelado.

**Tabla 1-1:** Comparativa entre los tipos de paneles solares

	<b>AMORFAS</b>	<b>POLICRISTALINAS</b>	<b>MONOCRISTALINAS</b>
<b>COSTO</b>	Precio elevado por poca producción.	De 5% a 7% más baratas que las monocristalinas.	De 5% a 7% más caras que las policristalinas.
<b>APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA</b>	5% - 7%	14% - 16%	20% - 22%
<b>PUREZA DE SILICIO</b>	Bruto (material sin pulir)	Con algunas impurezas	Sin impurezas.
<b>USOS</b>	Calculadoras y equipos que no requieran mucha energía	Sistemas fotovoltaicos.	Sistemas fotovoltaicos.

Fuente: sde

Realizado por: Luna, G. 2020

Al observar la Tabla 1-1 los paneles monocristalinos tienen mayor eficiencia por lo que se utilizará para esta investigación. Entre los principales fabricantes de este tipo de panel fotovoltaico están Sun Power, LG Solar y Panasonic-Sanyo, se ha realizado una comparativa mostrada en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Comparativa entre los fabricantes de paneles solares monocristalinos.

<b>FABRICANTE</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>RENDIMIENTO</b>	<b>RANGO DE COEFICIENTE DE TEMPERATURA (%/°C)</b>	<b>GARANTÍAS</b>
<b>SunPower</b>	California (EE.UU)	16.5% - 22.8%	-0.29 a -0.29	25 años
<b>LG Solar</b>	Corea del Sur	18.4% - 21.7%	-0.36 a -0.3	12 años
<b>Panasonic-Sanyo</b>	Japón, Malasia, España	19.1% - 20.3%	-0.26 a -0.26	15 años

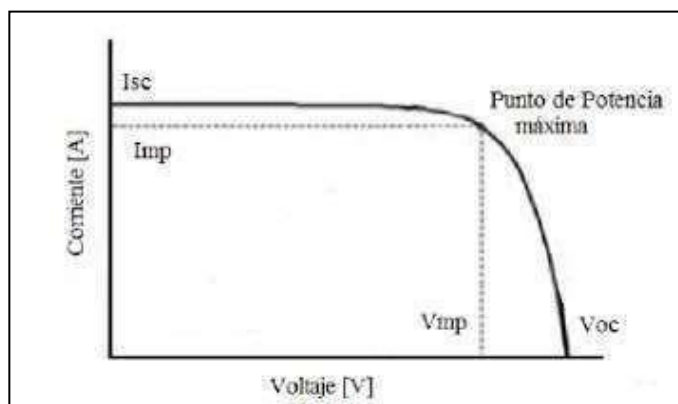
Fuente: Selectra

Realizado por: Luna, G. 2020

### Consideraciones para adquirir paneles fotovoltaicos

Hay que tener presente los siguientes parámetros de funcionamiento (Guamán, 2017):

La **potencia máxima o pico**, en la curva tensión-intensidad (V-I) mostrada en la Figura 8-1 el panel tiene una potencia máxima que depende de la corriente pico  $I_p$  y la tensión pico  $V_p$ .



**Figura 8-1.** Curva característica de un panel fotovoltaico.

Fuente: Vargas Juan Pablo & Navia Gonzalo, 2015. pp. 52

La **intensidad de cortocircuito** que es la corriente máxima del panel y se obtiene cuando en la célula se hace contacto en sus bornes.

La **tensión de circuito abierto** que es la máxima tensión que se puede obtener en el panel fotovoltaico cuando no tiene ninguna carga conectada.

En base a la conexión o configuración de los módulos fotovoltaicos, es necesario tener presente los siguientes parámetros eléctricos.

La **intensidad de cortocircuito**  $I_{sc}$ , es igual al producto de la corriente de cortocircuito de un módulo por el número de filas conectadas en paralelo.

La **tensión de circuito abierto**  $V_{OC}$ , es igual al producto de la tensión en circuito abierto de un módulo por el número de módulos conectados en serie.

La **potencia máxima o pico**  $P_{MPP}$  es la potencia máxima que el panel fotovoltaico puede entregar.

La **tensión en el punto de máxima potencia**  $V_{MPP}$  es el voltaje de salida del módulo fotovoltaico a potencia máxima.

La **intensidad en el punto de máxima potencia**  $I_{MPP}$  es la corriente que entrega el módulo fotovoltaico a potencia máxima.

#### Dimensionamiento del generador fotovoltaico

Previamente se debe realizar un estimado de la demanda lo más realista posible para evitar desviaciones en el dimensionamiento.

Una vez calculado el consumo, se realiza la búsqueda de los datos de irradiación solar global del área de estudio y se procede con el cálculo del número total de módulos solares necesarios con

la ecuación (1).

$$N_T = \frac{L_{mdcrit}}{P_{MPP} * HPS_{crit} * PR} \quad (1)$$

Donde:

$L_{mdcrit}$  es el consumo medio diario mensual.

$P_{MPP}$  es la potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida STC.

$HPS_{crit}$  son las horas de sol pico del mes crítico.

$PR$  es el factor global de funcionamiento que varía entre 0.65 y 0.90.

Respecto a la conexión de los módulos calculados en serie o paralelo se ocupan las ecuaciones (2) y (3).

$$N_{SERIE} = \frac{V_{BAT}}{V_{MODMPP}} \quad (2)$$

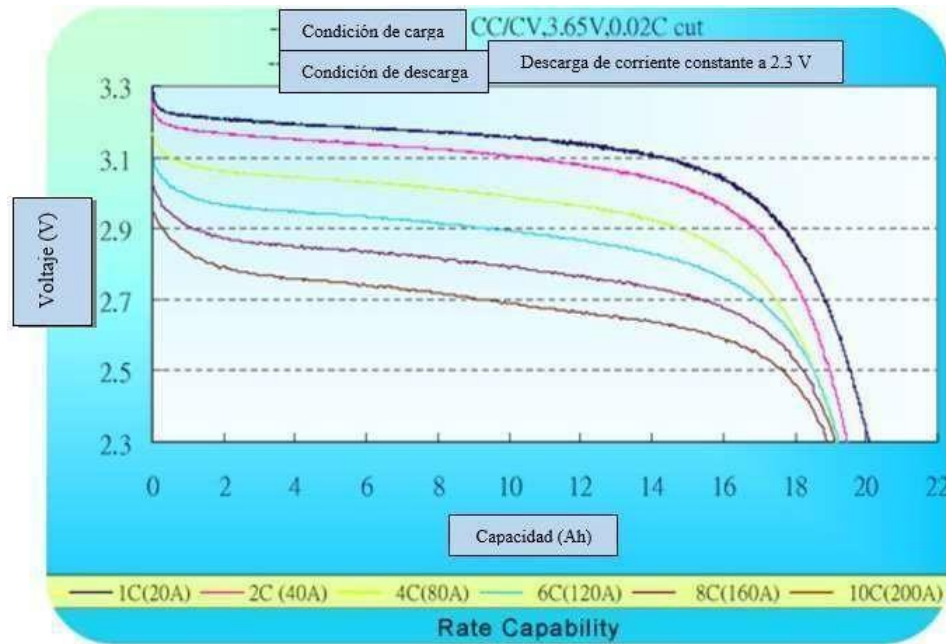
$$N_{PARALELO} = \frac{N_T}{N_{SERIE}} \quad (3)$$

### 1.3. Baterías de ión litio

Dentro de una microrred la función principal que tienen las baterías es el almacenamiento de la energía cuando exista excedentes a coste cero y utilizarla en el momento en que las fuentes renovables cuyo combustible primario no tiene coste y no generen lo suficiente para cubrir la demanda. Al seleccionar una batería se debe considerar los siguientes parámetros (Guamán Sánchez, 2017):

- **Tensión nominal:** Es el voltaje por elemento de la batería.
- **Capacidad de descarga:** Cantidad total de carga en amperios hora (Ah) que puede suministrar la batería durante un tiempo  $t_N$  desde plena carga hasta alcanzar la tensión de corte  $V_d$ . Dicha capacidad depende de la corriente de descarga y de la temperatura.
- **Capacidad nominal:** Cantidad de carga que puede extraerse en 20 horas, a una temperatura de 20 °C, hasta que la tensión entre terminales llegue a 1.8 V/vaso.
- **Régimen de descarga o carga:** Número de ciclos que soporta la batería conservando una capacidad residual por encima del 80% de la capacidad nominal. El tiempo de vida de la batería disminuye cuando se aumenta la profundidad de la descarga (DOD) y la temperatura de trabajo. El nivel de descarga (DOD) viene definido por el porcentaje de descarga de la batería.

En la Figura 9-1 se puede observar cómo interactúan estos parámetros en conjunto. Otros parámetros para considerar es el costo, peso y tamaño.



**Figura 9-1.** Relación de curvas de baterías en función de su voltaje, capacidad, y condiciones de carga y descarga.

Fuente: Leal Fernández, 2018

Las baterías de ion-litio tienen una densidad de energía más alta que la mayoría de las baterías recargables, de 100 a 150 Wh/kg, operan en voltajes más altos que otras baterías recargables, normalmente alrededor de 3.7 voltios y tienen una tasa de autodescarga más baja, con eficiencias del ciclo carga/descarga de 90 a 100% (Pérez Fernandez, 2017). Son muy utilizadas en la industria de dispositivos electrónicos, por ejemplo: celulares, laptops, etc. Algunos son usados en autos eléctricos, debido a que tienen una alta capacidad de almacenamiento. Actualmente existen dos tipos de esta tecnología (Chica Gallardo, y otros, 2017):

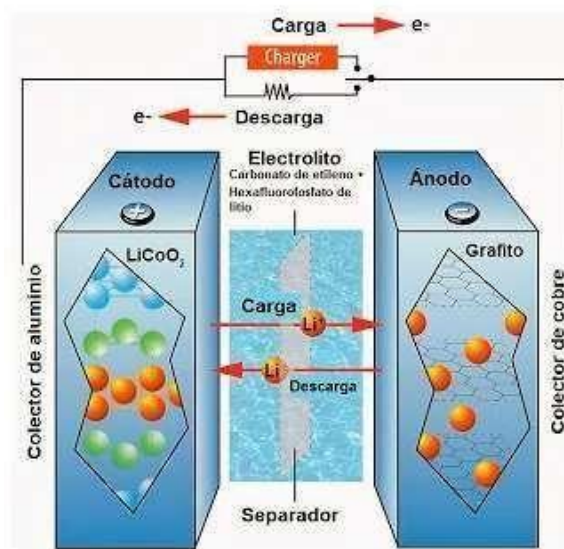
- **Baterías de titanio de litio:** Compuestas de manganeso (cátodos) y titanio de litio (ánodos), siendo una manera eficaz y rápida de cargar debido a sus elementos químicos, una de las ventajas de esta tecnología es su buen rendimiento en bajas temperaturas.
- **Baterías de fosfato de litio:** Utilizan fosfato de hierro en los cátodos convirtiéndose en un elemento seguro. Debido a su composición química se reduce la opción de que los electrodos liberen oxígeno, minimizando el riesgo de explosión. Este tipo de tecnología es una opción viable para utilizar en redes eléctricas.

### 1.3.1. Funcionamiento de las baterías de litio

El proceso de almacenamiento de energía se basa en el proceso químico de intercalación, este proceso consiste en que los iones de Litio los cuales tienen una carga previa son insertados y/o

separados de las estructuras moleculares de los electrodos (Pillco Valladolid, 2018).

Durante el proceso de carga, el electrodo negativo es eléctricamente reducido, de tal manera que los iones de Litio se insertan en las capas individuales del elemento que está formado el ánodo; en otras palabras, los iones de Litio viajan del electrodo positivo al negativo en este momento la batería absorbe energía que le proporciona una fuente externa. Por otro lado, en el proceso de descarga los iones de Litio abandonan el ánodo para regresar al electrodo positivo es el momento en que la batería está suministrando energía a una determinada carga (Mártil, 2019). En la Figura 10- 1 se muestra un esquema del proceso carga-descarga de una batería de ión litio donde los iones de litio están representados por círculos naranjas, los átomos de cobalto por círculos verdes y los de oxígeno por círculos azules.



**Figura 10-1.** Proceso de carga y descarga de una batería de ion-litio.

Fuente: Mártil, 2019

### 1.3.2. Comparativa entre los diferentes modelos de baterías

En la Tabla 3-1 se presenta una comparativa de las diferentes marcas de baterías basados en la tecnología de ion litio y se podrá seleccionar el tipo el de batería adecuado para el estudio.

**Tabla 3-1:** Comparativa entre las diferentes marcas de baterías de ion litio.

MARCA	BYD	FRONIUS	LGCHEM	TESLA
MODELO	B-BOX PRO 10.2	Solar Battery 12.0	Resu10H Type-R	Powerwall
RANGO TENSION NOMINAL (V)	320-451	320-460	350-450	230
CAPACIDAD (kWh)	10.24	9.6	9.3	14
ENERGÍA ÚTIL (kWh)	10	8.6	9	13.8
EFICIENCIA (%)	95.3	95	95	90

<b>POT. CARGA/DESCARGA (kWh)</b>	7.7/7.7	5.6/5.6	5/5	5/5
<b>MÁX. ENERGÍA A INSTALAR (kWh)</b>	11.52	12	10	90
<b>COMPATIBILIDAD</b>	SMA, KOSTAL	FRONIUS	SMA, VICTRON, SOLAREEDGE	FRONIUS, SOLAREEDGE
<b>RED/AISLADA</b>	RED	AMBOS	RED	RED Y AISLADA (SOLO CON FRONIUS)
<b>Nº MÁX. PARALELO</b>	5	NO	NO	9
<b>Nº MÁX. SERIE</b>	9 MÓDULOS DE 1.28 kWh	NO	NO	9
<b>AMPLIACIÓN DISPONIBLE</b>	SI	Hasta 8 módulos. Mínimo	SÍ	SÍ
<b>COMPATIBILIDAD ENTRE MODELOS</b>	AMBOS	AMBOS	TRIFÁSICO	MONOFÁSICA

Fuente: CAMBIO ENERGETICO, 2018

Realizado por: Luna, G. 2020

### 1.3.3. Dimensionamiento de un banco de baterías

Para el dimensionamiento de las baterías hay que recordar que los dos parámetros más importantes son la máxima profundidad de descarga (estacional y diaria) y el número de días de autonomía. Se calcula entonces ahora la capacidad nominal necesaria de las baterías en función de la profundidad de descarga estacional y diaria. La mayor de ellas será la que se selecciona, pues de lo contrario se puede incurrir en una insuficiencia estacional o diaria (SunFields, 2011).

En las ecuaciones (4) y (5) se calcula la capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria ( $C_{nd}$ ).

$$C_{nd}(Wh) = \frac{L_{md}}{P_{Dmaxd} * F_{CT}} \quad (4)$$

Donde:

$L_{md}$  es el consumo diario.

$P_{Dmaxd}$  es la profundidad de descarga máxima diaria.

$F_{CT}$  Factor de corrección de temperatura (=1).

$$C_{nd}(Ah) = \frac{C_{nd}(Wh)}{V_{BAT}} \quad (5)$$



Donde:

$C_{nd}$  es la descarga máxima diaria en Wh.

$V_{BAT}$  Voltaje de la Batería.

En las ecuaciones (6) y (7) se calcula la capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima estacional.

$$C_{ne} (Wh) = \frac{L_{md} * N}{P_{Dmaxd} * F_{CT}} \quad (6)$$

Donde:

$L_{md}$  es el consumo diario.

$N$  es el número de días de autonomía.

$P_{Dmaxd}$  es la profundidad de descarga máxima estacionaria.

$F_{CT}$  Factor de corrección de temperatura (=1).

$$C_{ne} (Ah) = \frac{C_{ne}(Wh)}{V_{BAT}} \quad (7)$$

Donde:

$C_{ne}(Wh)$  es la descarga máxima estacionaria en Wh.

$V_{BAT}$  Voltaje de la batería.

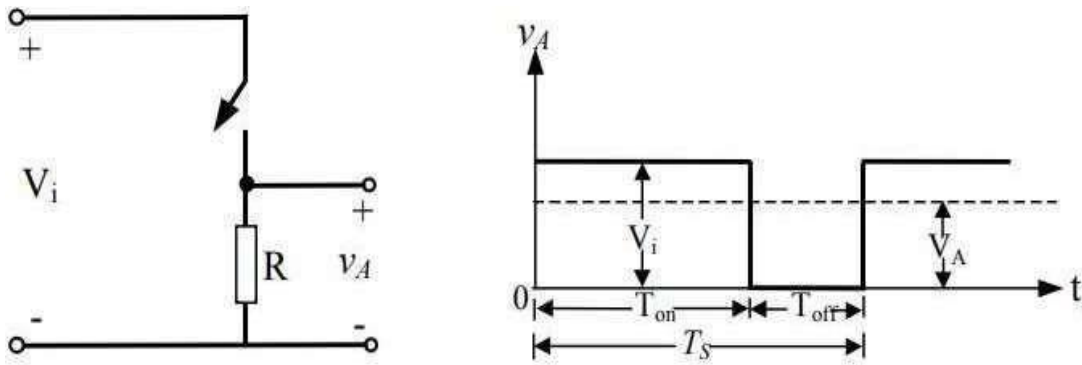
#### **1.4. Control de convertidores electrónicos**

Una vez recopilada y entendida la información sobre los elementos que se pueden incorporar en una MR, es necesario conocer cómo controlarlos, para ello se realizará un estudio teórico del control de convertidores electrónicos. Previamente, se va a realizar un estudio generalizado sobre el control de convertidores, principalmente la modulación por ancho de pulso PWM y las transformaciones de Clarke y Park. Después, se investigará sobre el control del inversor aplicado a la red estudiando el control por corriente y el control por tensión.

##### **1.4.1. Modulación por Ancho de pulso (PWM)**

###### PWM en convertidores CC-CC

Los convertidores CC-CC conmutados utilizan uno o más interruptores para transformar un nivel continuo en otro. Dada una tensión de entrada, el valor medio de la tensión de salida se ajusta controlando la duración del estado abierto (OFF) o cerrado (ON) del interruptor, es decir el valor medio  $V_A$  depende del tiempo de conducción  $T_{on}$  y el tiempo de no conducción  $T_{off}$  del transistor (Lacueva, 2011a: p. 3). Para ilustrar el concepto se puede observar en la Figura 11-1.



**Figura 11-1.** Conversión CC-CC.

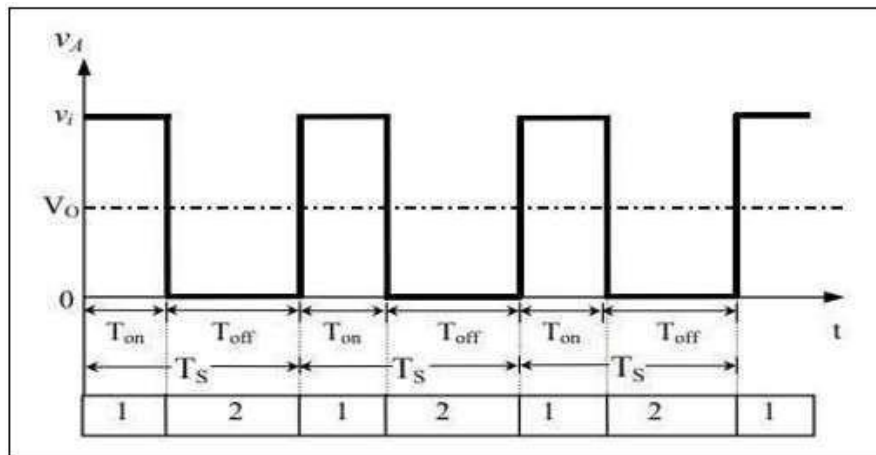
Fuente: Lacueva, 2011

El PWM por sus siglas en inglés Pulse-Width Modulation es uno de los métodos de control de la tensión de salida más usado, los parámetros que determinan la forma de onda de la Figura 11-1 son la variación de conducción del duty-ratio ( $D$ ) y la frecuencia de conmutación  $f_s$  definidas en las ecuaciones (8) y (9).

$$D = \frac{T_{on}}{T_S} \quad (8)$$

$$f_s = \frac{1}{T_S} \quad (9)$$

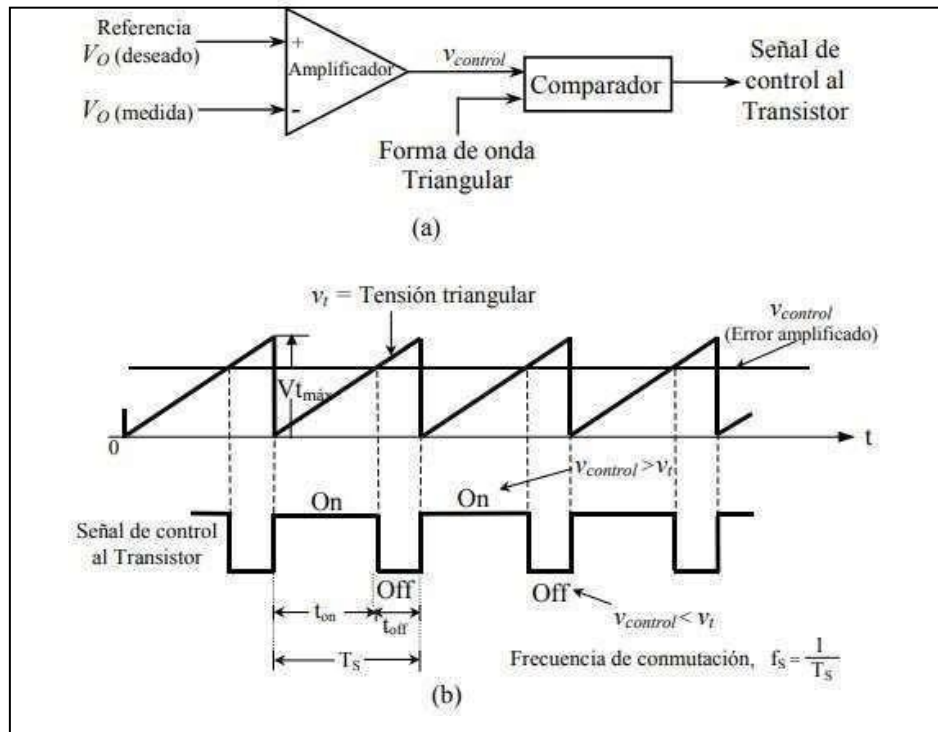
En la realidad los convertidores CC-CC presentan un filtro pasa bajo en la etapa de salida para obtener el valor medio de la tensión rectangular, eliminando tanto la componente fundamental como todos los armónicos de su desarrollo en serie de Fourier como se indica en la Figura 12-1.



**Figura 12-1.** Forma de onda a la entrada del filtro paso-bajo de un convertidor CC/CC.

Fuente: Lacueva, 2011

Con este modo de trabajo (PWM) se tiene una frecuencia de conmutación constante y la señal que controla si el estado del transistor está abierto o cerrado se genera comparando una tensión de control  $v_{control}$  con una forma de onda repetitiva triangular, para obtener la señal de tensión  $v_{control}$  se amplifica el error, o la diferencia entre la tensión de salida medida con el valor de tensión deseado como se indica en la Figura 13-1(a) y Figura 13-1(b).



**Figura 13-1.** Modulación por ancho de pulso (PWM): (a) diagrama de bloques, (b) señales del comparador.

Fuente: Lacueva, 2011

De la Figura 13-1 se puede observar que la forma de onda de la tensión triangular (diente de sierra) tiene un valor de pico  $V_{m\acute{a}x}$  constante y su frecuencia es la que establece la frecuencia de conmutación, esta se mantiene constante en un control PWM. De la comparación entre la señal triangular y la señal amplificada del error  $v_{control}$  (varía lentamente en el tiempo) comparado con la frecuencia de conmutación la señal resultante presenta una forma de onda rectangular y es la que controla el transistor; cuando  $v_{control} > v_t$  el transistor pasa a estado ON caso contrario el transistor pasa a estado OFF (Lacueva, 2011b: p. 6).

En la ecuación (10) se expresa la relación de conducción D (duty-ratio) en términos de  $v_m$  y el valor de pico de la forma de onda triangular  $V_{m\acute{a}x}$ .

$$D = \frac{T_{on}}{T_S} = \frac{v_{control}}{V_{m\acute{a}x}} \quad (10)$$

Existen dos tipos de control PWM (Leal Fernández, 2018):

- *Control por tensión:* Funciona tomando muestras de la tensión de salida del convertidor y ajustando el ciclo de trabajo directamente.
- *Control por corriente:* Toma muestras tanto de la corriente como de la tensión de salida para modificar esa misma tensión, resultando un poco más difícil de implementar. Este tipo de control son los más populares debido a su mayor disponibilidad y estabilidad en modo de operación continuo.

### Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM)

En el caso de los inversores, la modulación de ancho de pulso mostrada en la Figura 14-1 además de controlar la magnitud de la tensión de salida también se pretende controlar su frecuencia y su espectro armónico (Leal Fernández, 2018a: p. 74).

Esta tecnología se basa en emplear una modulación múltiple (varios pulsos de disparo en cada medio ciclo de voltaje de salida), el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso (CCAMA POLANCO, 2018).

Para la obtención de la modulación se logra empleando una señal de control senoidal  $v_{control}$  a la frecuencia de salida deseada  $f_1$  (frecuencia moduladora), la cual es comparada con una onda triangular de frecuencia  $f_s$  (frecuencia portadora) para generar las señales de disparo. La frecuencia  $f_s$  establece la frecuencia de conmutación del inversor además se mantiene constante.

Puede ser controlada mediante modulación de amplitud y frecuencia, las relaciones de dichas modulaciones se encuentran en las ecuaciones (11) y (12) respectivamente.

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{TRI}} \quad (11)$$

Donde:

$V_{control}$  es la amplitud de la señal de control.

$V_{TRI}$  es el pico de la onda portadora triangular.

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (12)$$

Donde:

$f_s$  es la frecuencia portadora.

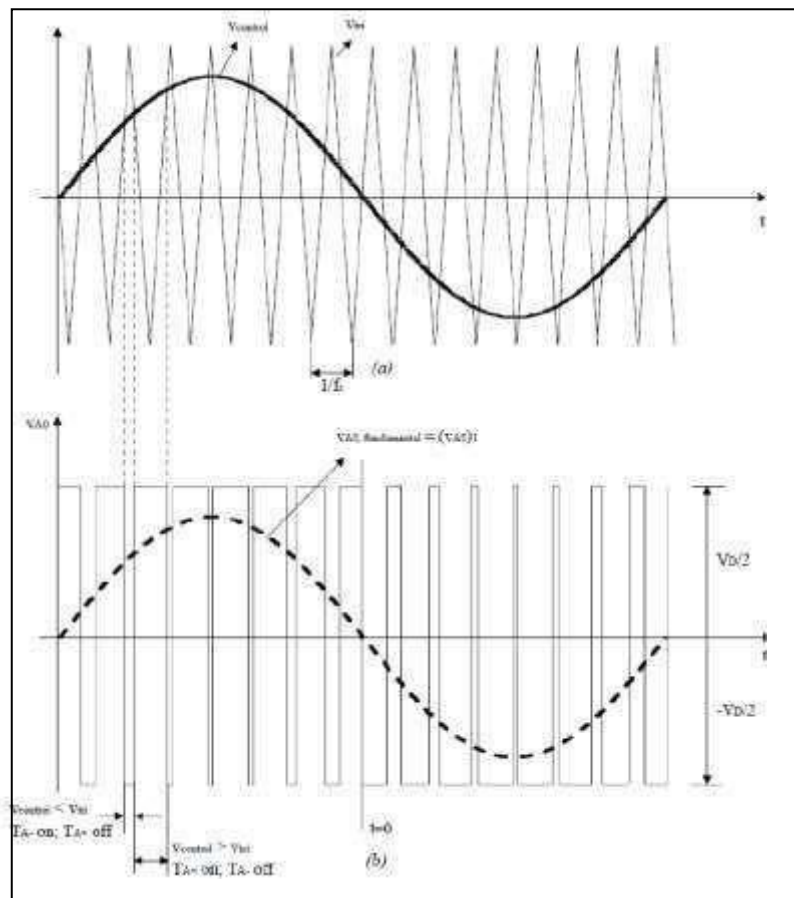
$f_1$  es la frecuencia moduladora.

La comparación de las dos señales establece el estado del transistor:

$$V_{control} > V_{tri} \rightarrow T_{A+} \text{ cerrado} \rightarrow V_{AO} = \frac{V_D}{2} \quad (13)$$

$$V_{control} < V_{tri} \rightarrow T_{A-} \text{ cerrado} \rightarrow V_{AO} = -\frac{V_D}{2} \quad (14)$$

Estas técnicas tienen como principal ventaja la sencillez en su implementación, pero como contrapartida, no se adaptan bien a la respuesta dinámica en cargas no lineales y poseen elevadas pérdidas por conmutación que se producen cuando se requiere una distorsión armónica total (THD) de bajo valor, debido a que el número de conmutaciones debe ser elevado (Leal Fernández, 2018b: p. 75).



**Figura 14-1.** Modulación de ancho de pulso (PWM).

Fuente: Leal Fernández, 2018

#### 1.4.2. Transformaciones de Clarke y Park

En el estudio de sistemas de potencia, las transformaciones matemáticas son usadas para desacoplar variables, y, por tanto, facilitar la solución de ecuaciones complejas con coeficientes variantes en el tiempo (BARBA NARANJO, y otros, 2012a: p. 5).

Para un sistema trifásico la transformación de las tensiones y corrientes medidas en el convertidor

para su implementación en la estrategia de control está basada en las transformadas de Clarke en ejes estáticos " $\alpha\beta\gamma$ " y de Park en ejes dinámicos " $dq0$ " (Comparativa convertidores HVDC-VSC, 2011).

La transformada de Clarke permite al modelo matemático de un sistema trifásico denotada por las variables  $abc$  por sus tres fases, convertirse en un sistema estacionario de dos únicos ejes fijos  $\alpha$  y  $\beta$  (BARBA NARANJO, y otros, 2012b: p. 7). Mientras que la transformada de Park es usada para cambiar las medidas de las tensiones y corrientes a un marco de referencia  $dq0$ .

La ventaja de estas transformaciones es facilitar el control de las señales del sistema trifásico utilizando bloques PI en la herramienta Simulink para los nuevos dos únicos ejes (Leal Fernández, 2018, p. 82). En la Tabla 4-1 se muestra un resumen de las ecuaciones para Clarke y Park.

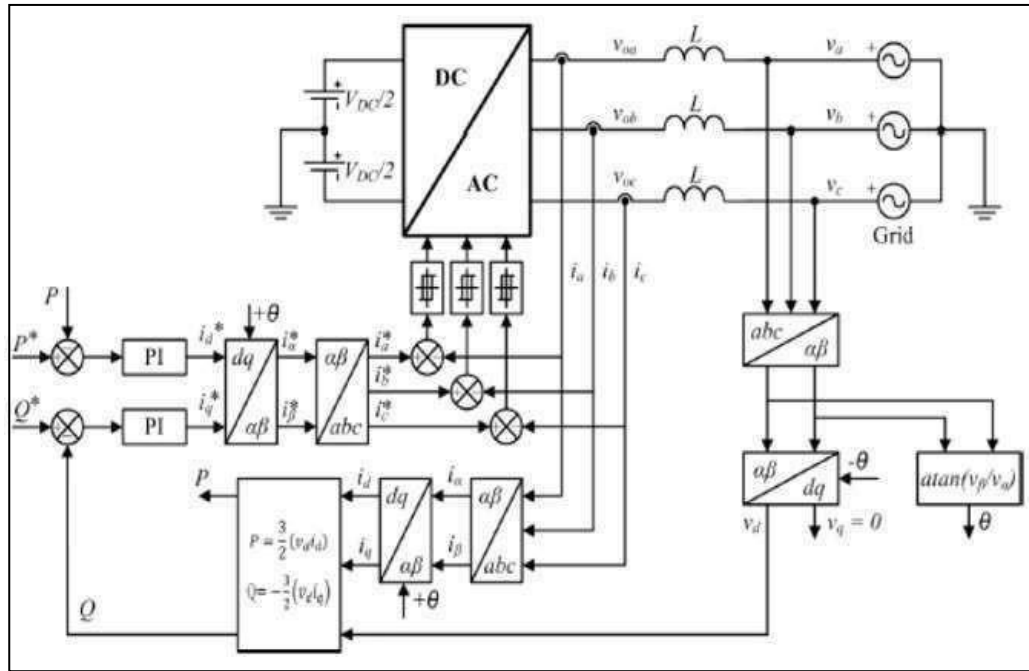
**Tabla 4-1:** Resumen ecuaciones de Clarke y Park

<b>CLARKE</b> $(a,b,i) \rightarrow (\alpha,\beta)$	<b>PARK</b> $(\alpha,\beta) \rightarrow (d,q)$
$i_\alpha = i_a$ $i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b$ $i_0 = 0$	$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta)$ $i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta)$
<b>INVERSA DE CLARKE</b> $(\alpha,\beta) \rightarrow (a,b,i)$	<b>INVERSA DE PARK</b> $(d,q) \rightarrow (\alpha,\beta)$
$i_a = i_\alpha$ $i_b = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta$ $i_c = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta$	$i_\alpha = i_d \cos(\theta) - i_q \sin(\theta)$ $i_\beta = -i_d \sin(\theta) + i_q \cos(\theta)$

**Fuente:** Leal Fernández, 2018

**Realizado por:** Luna, G. 2020

La transformada de Clarke y Park permite realizar el control vectorial de corriente de un inversor conectado a la red (Herrero de Lucas, y otros), como el de la Figura 15-1.



**Figura 15-1.** Esquema control vectorial corriente de un inversor conectado a red.

**Fuente:** Leal Fernández, 2018

### 1.4.3. Inversor para conexión a red

Para la integración de todos los elementos de la microrred (MR) que se requiere una transformación de CC-AC para la correcta conexión a red se necesita de un inversor el cual es un elemento principal, para su buen funcionamiento será necesario controlarlo a través del control de su potencia activa, potencia reactiva y de la tensión del condensador de Corriente Directa (CD). Como punto de partida, se emplean los conocimientos base desarrollados anteriormente para el control de inversores: PWM, SPWM y transformaciones de Clarke y Park. Para el control de un inversor conectado a red se puede realizar mediante el control de corriente y control detensión.

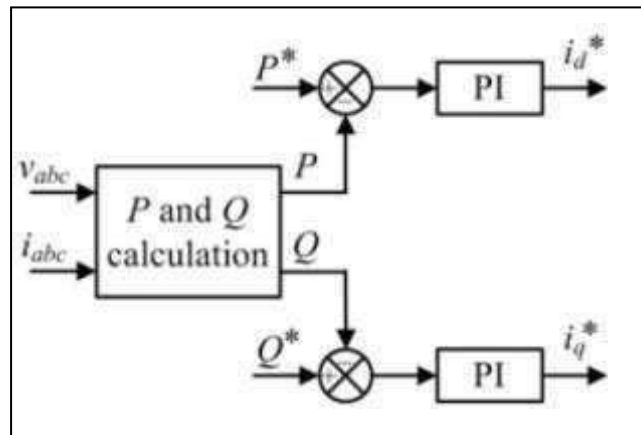
#### Control de corriente

Las tensiones de red son aproximadamente constantes, entonces la tensión  $V_a$  también será aproximadamente constante y se puede controlar las potencias activa  $P$  y reactiva  $Q$  mediante las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  (Leal Fernández, 2018, p. 87) a partir de las ecuaciones 15 y 16, respectivamente.

$$P = \frac{3}{2}(v_a i_d) \quad (15)$$

$$Q = -\frac{3}{2}(v_a i_q) \quad (16)$$

A través de un regulador PI se controlan la potencia activa y reactiva como se indica en la Figura 16-1 ingresando valores de referencia  $P^*$  y  $Q^*$  por lo tanto, las salidas de los bloques PI son las referencias  $i_d^*$  e  $i_q^*$  que controlarán el sistema.



**Figura 16-1.** Reguladores PI para el control de corriente.

Fuente: Leal Fernández, 2018

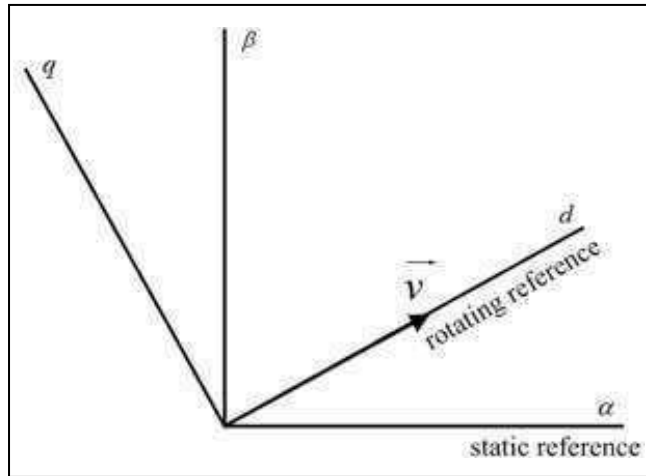
Dentro de los valores nominales en las redes CC y CA se establecen las referencias para la potencia activa y reactiva. La ecuación (15) que es el cálculo de la potencia activa en el eje d y la ecuación (16) que es el cálculo para la potencia reactiva en el eje q se obtienen a partir de los valores instantáneos de los voltajes  $v_a, v_b, v_c$  y las corrientes  $i_a, i_b, i_c$  de la red trifásica, mediante las ecuaciones (17) y (18).

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (17)$$

$$Q = - \frac{1}{\sqrt{3}} [v_a(i_b - i_c) + v_b(i_c - i_a) + v_c(i_a - i_b)] \quad (18)$$

El término  $V_d$  presente en las ecuaciones (15) y (16) representa la componente continua de la tensión de red que se la expresa en un vector  $\vec{v}$  en un sistema de referencia giratorio, mientras que  $i_d$  e  $i_q$  representan las componentes continuas y en cuadratura de la corriente de red en el sistema de referencia de la tensión de red, para un mayor entendimiento se puede observar en la Figura 17-1.



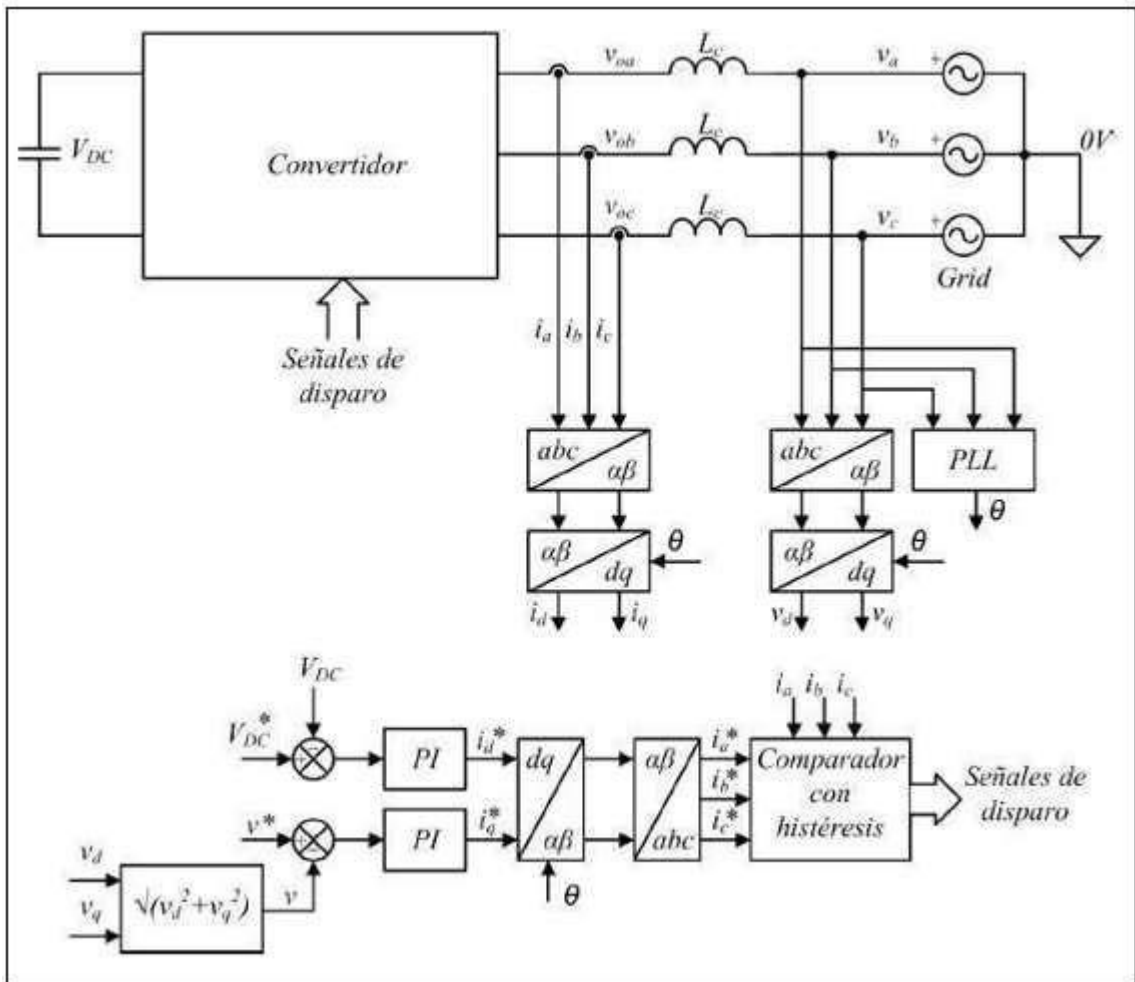


**Figura 17-1.** Sistemas de referencia estático  $\alpha$ - $\beta$  y rotativo d-q.

Fuente: Leal Fernández, 2018

El término P puede ser controlada por la corriente  $i_d$  mientras que el término Q puede ser controlada por la corriente  $i_q$  siempre y cuando el vector  $\vec{v}$  se encuentre alineado con el eje d ( $v_q = 0$ ), por otro lado, si la entrada del circuito es un condensador, se reemplaza el lazo de potencia activa P por un lazo de tensión continua  $V_{DC}$ , como en el esquema de la Figura 18-1.

El motivo por el que se realiza el cambio en el lazo de control es debido al condensador que se introduce, se comienza a variar la tensión continua de entrada, por lo que el punto de máxima potencia ya no será siempre el mismo y la tensión de entrada se convierte en el nuevo valor de referencia.

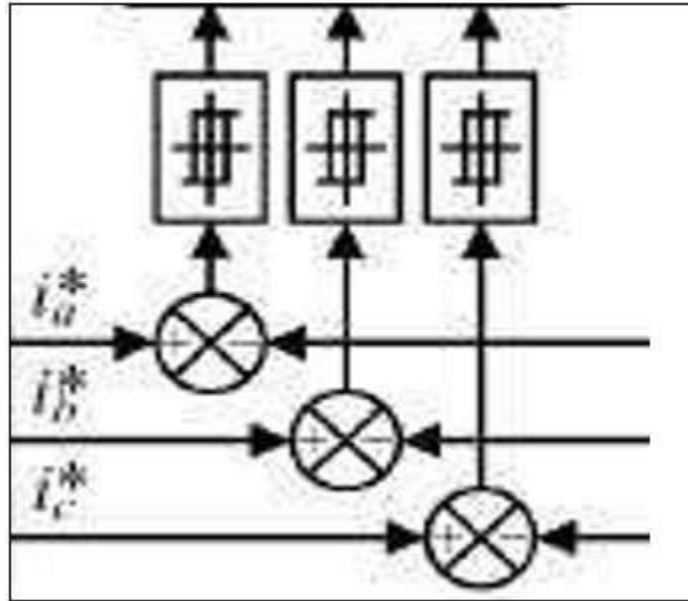


**Figura 18-1.** Esquema control por fuente de corriente con circuito de entrada con condensador.

Fuente: Leal Fernández, 2018

El voltaje en el condensador  $V_{DC}$  y el voltaje en la red  $v$  son las nuevas referencias. De la ecuación (15) donde  $V_i$  es constante se puede controlar  $V_{DC}$  mediante  $i_d$ ; mientras que  $v$  es controlada mediante  $i_q$  por la ecuación (16). El control de corriente se realiza mediante banda de histéresis, explicada a continuación.

Las corrientes de fase de referencia adquiridas mediante la regulación PI, se comparan con las corrientes de fase obtenidas en el circuito mediante un controlador de histéresis, representados en la Figura 19-1. El controlador por histéresis permite mantener los valores de corriente dentro de una determinada banda, llamada banda de histéresis, de forma que las tensiones de red tomen valores únicos de  $+\frac{V_{DC}}{2}$  y  $-\frac{V_{DC}}{2}$  (Leal Fernández, 2018, p. 89).



**Figura 19-1.** Controladores por histéresis para el control de corriente.

Fuente: Leal Fernández, 2018

### Control de tensión

Es realizado mediante el lazo de control de la Figura 20-1. A través de  $i_d$  e  $i_q$  se controlan las señales de referencia  $V_{DC}$  y  $v$  respectivamente, al igual que para el control por corriente con la diferencia de que se necesita un lazo de desacoplo de ejes d-q a partir de  $i_d^*$  e  $i_q^*$  para obtener las señales de referencia  $V_{od}^*$  y  $V_{oq}^*$ . A causa de este lazo de control, es más común utilizar el control por corriente, por ser más sencillo.

La ecuación (19) relaciona la tensión del convertidor  $\vec{V}_o$ , la tensión de red  $\vec{v}$ , y la corriente de salida del convertidor  $I$  (Martínez Rodrigo, y otros):

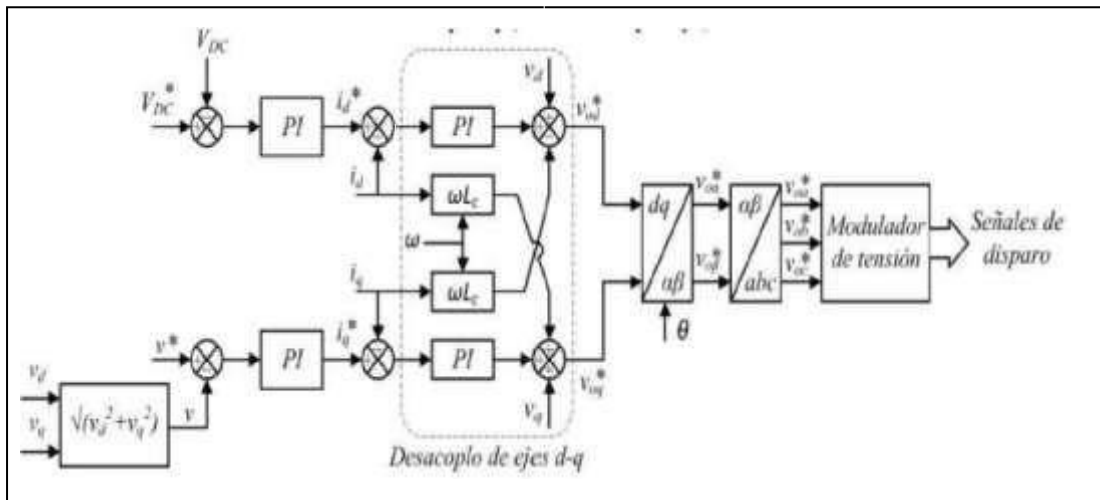
$$\vec{v} = \vec{V}_o - L_c \frac{di}{dt} - j\omega L_c \vec{i} \quad (19)$$

La ecuación vectorial (19) puede dividirse en dos ecuaciones (20) y (21) en los ejes d-q, con las que finalmente se implementa el lazo de acoplamiento (Herrero de Lucas, y otros).

$$v_d = v_{od} - R_d i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega L_q i_q \quad (20)$$

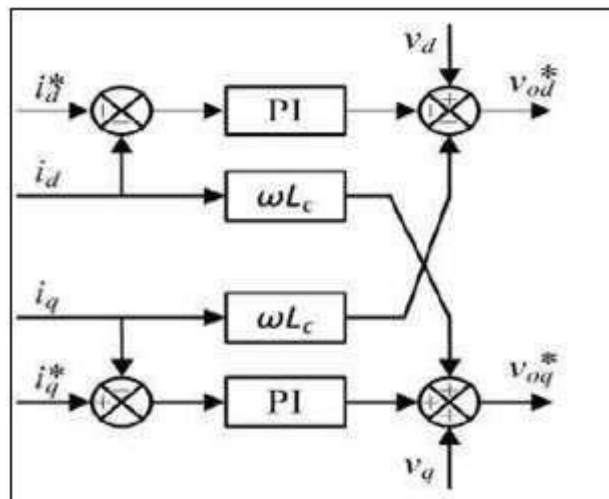
$$v_q = v_{oq} - R_q i_q - L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d \quad (21)$$

La ecuación (20) incluye las relaciones en el eje d mientras que la ecuación (21) incluye las relaciones en el eje q; ambas ecuaciones incluyen un término de acoplamiento ( $\omega_k L_i q$  y  $\omega_k L_i d$ ) por lo que se puede decir que estas ecuaciones están acopladas. De modo que, para regular las corrientes de red  $i_d$  e  $i_q$  se deben incluir los términos de desacoplamiento como se muestra en la Figura 21-1. La salida del desacoplador son las referencias de las tensiones del convertidor  $V_{od}^*$  y  $V_{oq}^*$ .



**Figura 20-1.** Lazo de control para el control en fuente de tensión.

Fuente: Leal Fernández, 2018



**Figura 21-1.** Desacoplo de las ecuaciones del regulador de corriente.

Fuente: Leal Fernández, 2018

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se detalla la concepción general del sistema de la MR, se establecen los requerimientos, se especifica las características técnicas del *hardware* de cada equipo que se utilizará para este estudio, el *software* con el que se trabaja, además se detalla los modelos de cada elemento de la MR y se especifica el funcionamiento de cada bloque.

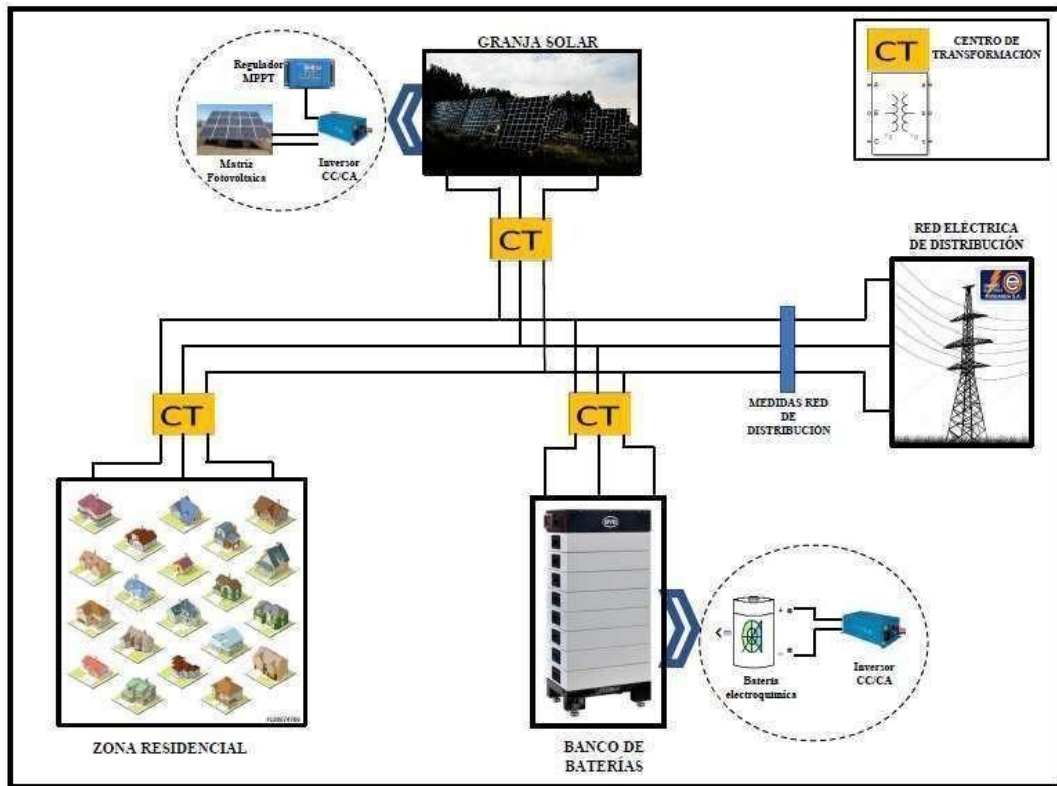
#### 2.1. Requerimientos para el modelado del sistema

Por medio del estudio realizado en el capítulo anterior se pueden definir los requerimientos que realizará el modelado de sistema de generación fotovoltaico con almacenamiento en banco de baterías de ion litio para microrredes AC con conexión on-grid durante la validación.

- El tiempo de simulación es de 24 segundos.
- Los paneles solares deben ser capaces de trabajar conectado a la red.
- El banco de baterías debe ser capaz de trabajar conectada a la red.
- El modelo debe ser estable.
- El controlador MPPT debe buscar siempre el punto de máxima potencia para cada conjunto de paneles solares.
- El inversor de los paneles solares trabaja mediante control de corriente.
- El inversor del banco de las baterías electroquímicas trabaja mediante control de corriente.
- El sistema funciona para cualquier valor de temperatura y a cualquier valor de irradiancia.

#### 2.2. Consolidación general del modelado de la microrred

Como se presenta en la Figura 1-2, se aprecian los elementos constitutivos del sistema como son las cargas de consumo que para este estudio se considera una zona residencial estas cargas consumen todo el tiempo, paneles fotovoltaicos los cuales se encargan de captar la irradiación y por ser simulación capta la irradiancia que se ingresa para transformar la energía solar en electricidad cd y mediante un inversor cc/ca alimenta a las cargas de consumo además cuenta con un regulador de carga el cual obtiene siempre la máxima potencia, el banco de baterías se encargan de almacenar energía y de entregar energía a las cargas mediante un inversor cc/ca cuando no exista el recurso primario (energía solar) y la red eléctrica trabaja junto con los paneles solares y el banco de baterías para alimentar a las cargas.

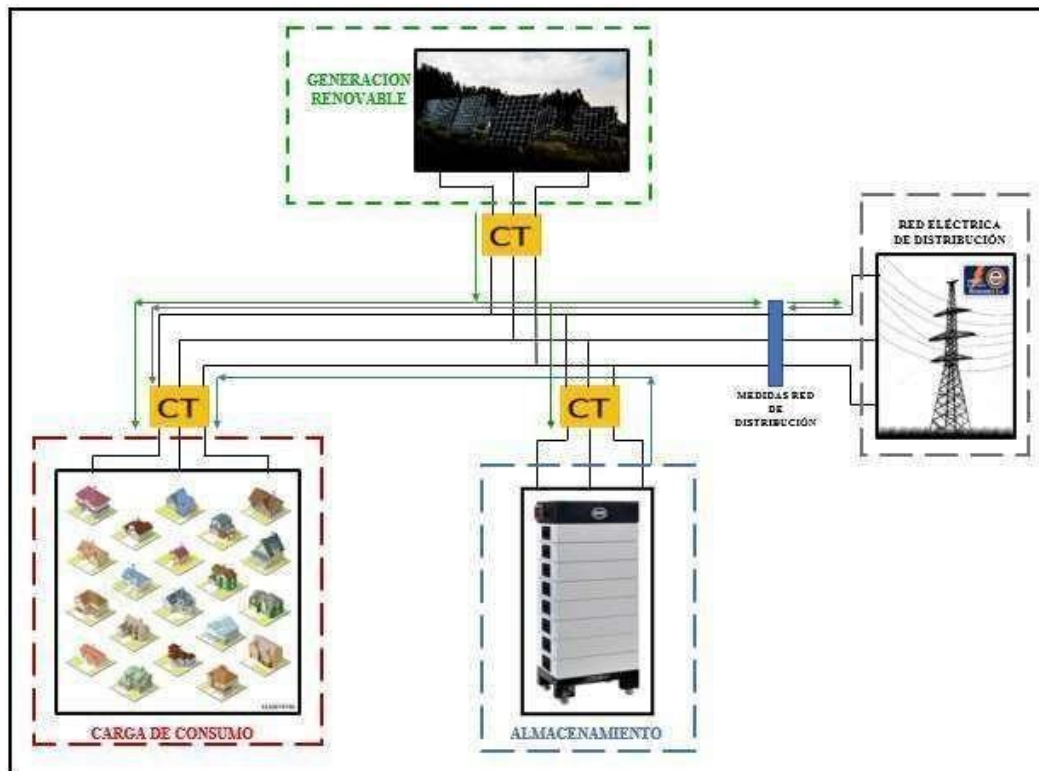


**Figura 1-2.** Concepción General del Sistema.

Realizado por: Luna, G. 2020

### 2.3. Arquitectura de hardware del modelado de la microrred

En la Figura 2-2 se muestra los flujos de energía, está conformado por la *etapa de distribución de la energía* está conformado por una fuente trifásica para alimentar a las cargas, además para disminuir el tráfico en la red, se encuentra la *etapa de generación* constituida por conjuntos de paneles solares y cada conjunto posee un regulador de carga donde se encuentra programado el algoritmo de seguimiento de máxima potencia además de un inversor que convierte la energía de corriente continua a corriente alterna para conectarse a la red; también se incluye una *etapa de almacenamiento* conformado por un banco de baterías que se encarga de almacenar y suministrar energía a las cargas y al igual que los paneles tiene un inversor para poder conectarse a la red y por último se encuentra la *etapa de consumo* conformado por una zona residencial de 25 viviendas.



**Figura 2-2.** Concepción del Sistema por Bloques.

Realizado por: Luna Geovanna, 2020

## 2.4. Diseño de las etapas de hardware del modelado de la microrred

Una vez analizada la arquitectura de *hardware* del modelado de la MR y para una mejor comprensión del funcionamiento se detalla a continuación cada una de las etapas que conforma el sistema.

### 2.4.1. Etapa de consumo

Es la etapa a la que se le suministra energía por medio del banco de baterías, los paneles fotovoltaicos o la red de distribución. Como carga de consumo se considera una zona residencial conformada por 25 viviendas con una demanda de 200 kW constante.

### 2.4.2. Etapa de Generación

Se conforma de paneles solares para la generación de energía eléctrica, cuenta con un control MPPT (Maximum Power Point Tracking) para la mejora del funcionamiento del sistema y de un inversor que transforma la energía de CC-CA para alimentar a las cargas las cuales trabajan en CA; además trabaja junto con la red, cuando la generación es menor al consumo la diferencia de estas dos será aportada por la red y si la generación es mayor al consumo el excedente es entregada a la red.

### **2.4.3. Bloque de Almacenamiento**

Conformada de baterías de ion litio que gestiona el consumo y la generación de energía, consumen la energía cuando necesiten ser recargadas y generarán energía cuando el recurso solar de la generación renovable no se encuentre disponible; además al igual que los paneles constará de un inversor CC/CA.

## **2.5. Selección de componentes de hardware para el modelado de la MR**

Después de analizar los requerimientos de hardware, y cada uno de los bloques que comprenden el sistema, se procede a seleccionar los componentes que se utiliza en la simulación del sistema desarrollado con las características más importantes. En los Anexos A y B se adjuntan las respectivas hojas de datos.

### **2.5.1. Panel Solar Sanyo de Panasonic Grupo HIP-190DA3**

Son paneles monocristalinos, en la Figura 3-2 se puede apreciar un módulo Sanyo HIP (heterounión con capa fina intrínseca), son híbridos de silicio monocristalino rodeados por capa de silicio amorfo ultrafinas, las obleas de silicio se fabrican en los EE.UU y los paneles se ensamblan en México; la parte posterior genera electricidad a partir de la luz ambiental que ha pasado a través del panel o se refleja en las superficies circundantes, mientras que la parte frontal funciona simultáneamente, lo que resulta en una mayor generación de energía (ecodirect, 2020) y aumentando el rendimiento del sistema.



**Figura 3-2.** Panel Solar Sanyo de Panasonic Grupo HIP-190DA3

**Fuente:** ecodirect, 2020

En la Tabla 1-2 se detallan las principales características del panel Sanyo HIT-190DA3.



**Tabla 1-2:** Características de Panel Sanyo HIT-190DA3

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Potencia Nominal ( $P_{max}$ )	190 W
Voltaje de Potencia máximo ( $I_m$ )	55.3 V
Corriente de Potencia máxima ( $I_m$ )	3.44 A
Voltaje de Circuito abierto ( $V_{oc}$ )	68.1 V
Corriente de cortocircuito ( $i$ )	3.7 A
Voltaje máximo del sistema ( $V_{SYS}$ )	600 V
Eficiencia de la célula	18.8 %
Eficiencia del módulo	15.7%

Fuente: Yumpu, 2020

Realizado: Luna, G. 2020

### 2.5.2. Batería de Litio BYD Battery-Box H 10.2

B-Box está diseñado con una batería química LiFePO4 que ha sido ampliamente reconocida como una de las tecnologías de batería más seguras en la Figura 4-2 se muestra este tipo de batería. La química LiFePO4 presenta estructuras estables y soportan una temperatura de hasta 480 °C, no emite gases tóxicos y tiene un mantenimiento nulo (Fusion energía solar, 2019).



**Figura 4-2.** Batería BYD B-BOX H 10.2

Fuente: itsenergiasolar, 2019

En la Tabla 2-2 se detallan las principales características de la batería BYD B-BOX H10.2.

**Tabla 2-2:** Características de BYD B-BOX H 10.2

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Capacidad útil	10.24 KWh= 25.037 Ah
Potencia máxima de salida	10.24 KW
Potencia pico de salida	20.48 KW – 5 min
Eficiencia	>95.3%
Tensión Nominal	409 V
Rango de tensión	320 ~ 451 V
Rango de temperatura ambiente	-10 ~ +50
Profundidad de descarga estacional	80%
Profundidad de descarga diaria	8%

Fuente: itsenergiasolar, 2019

Realizado por: Luna, G. 2020

### 2.5.3. *Procesador*

Como se muestra en la Figura 5-2 se utiliza un computador portátil HP ENVY 15 séptima generación con Windows 10 para la validación de la simulación.



**Figura 5-2.** HP ENVY 15

Realizado por: Luna, G. 2020

En la Tabla 3-2 se detallan las principales características de la portátil HP ENVY 15.

**Tabla 3-2:** Características principales HP ENVY 15

DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
Procesador	Intel Core I7
RAM	12,0 GB
Tipo de sistema	Sistema Operativo de 64 bits
Disco Duro	1 TB
Tarjeta de video	4 GB

Fuente: HP Support Assistant, 2018

Realizado por: Luna, G. 2020

## 2.6. Requerimiento de diseño para el software

Para el proceso de validación del modelado de la microrred con conexión on-grid se realiza mediante simulación con un programa. Luego de analizar la arquitectura del *hardware* se procede a estudiar los requerimientos de *software*.

Los requerimientos del *software* del modelado son:

- Visualizar cada uno de los bloques que son parte de la microrred (MR) para una mejor estética.
- Proporcionar información de las formas de onda de voltaje, corriente, potencia activa y potencia reactiva de cada bloque mediante scopes.

## 2.7. Arquitectura de *software* del modelado

Para el desarrollo de *software* se utiliza un programa gratuito, para la parte del seguimiento de máxima potencia de los paneles solares se utiliza Matlab donde se realiza el algoritmo y para la modelación se utiliza Simulink el cual es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación Matlab; se utiliza los bloques de System Power Electrical.

### 2.7.1. Herramientas *Software* de desarrollo

En este apartado se presenta una descripción de cada uno de los programas necesarios para el desarrollo del modelado de la MR. Las herramientas usadas de *software* usadas son de libre acceso y código abierto con aplicaciones en la robótica e ingeniería.

#### *Software Simulink*

Simulink es una aplicación que permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques; el comportamiento de dichos sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de Matlab y señales predefinidas de todo tipo; dispone de una serie de utilidades que facilitan la visualización, análisis

y guardado de los resultados de simulación (Aracil, y otros, 2006-2007a: p. 3). Además, se emplea abundantemente en ingeniería de control.

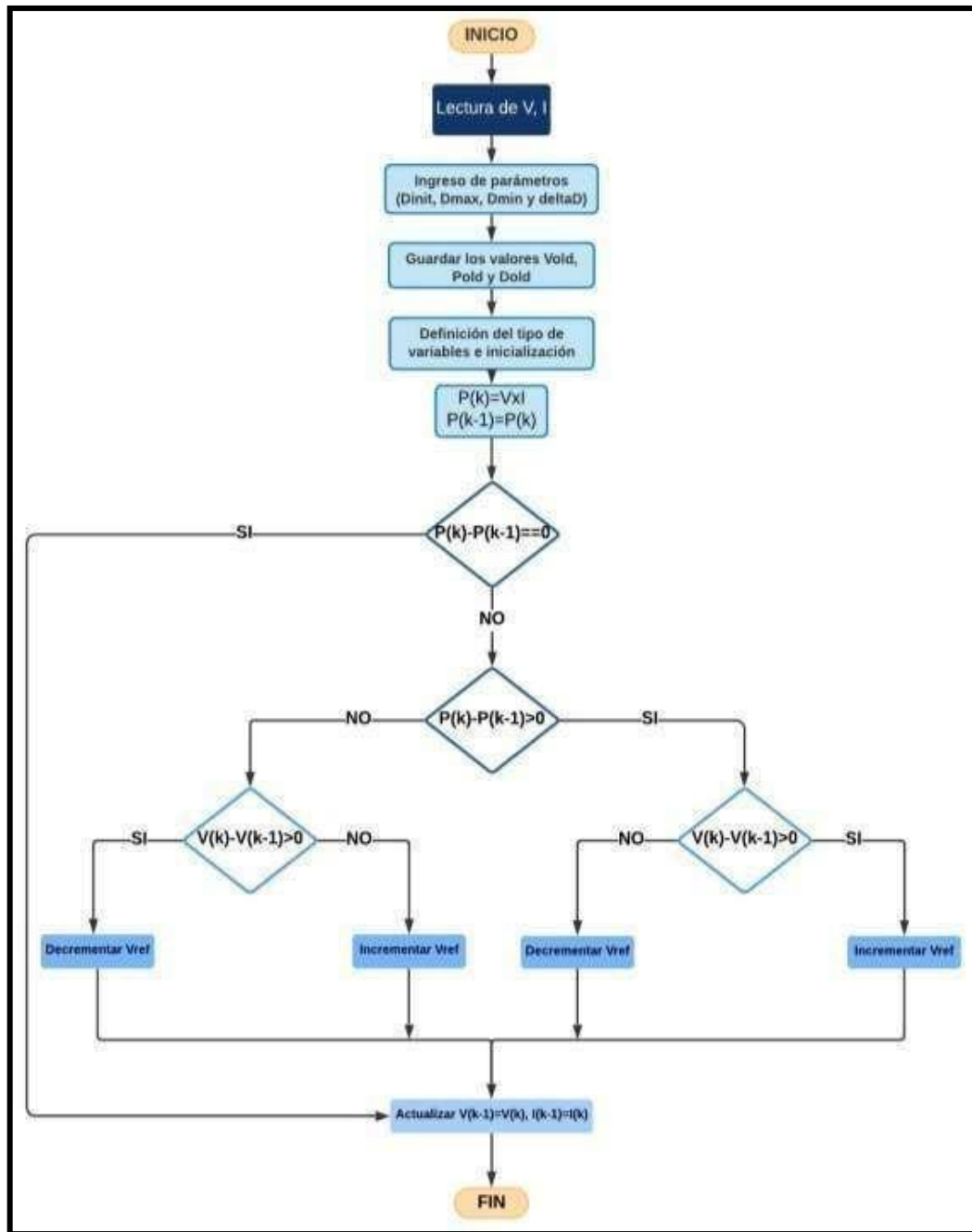
### Software Matlab

Matlab es un programa de gran aceptación en ingeniería destinado realizar cálculos técnicos científicos y de propósito general. En él se integran operaciones de cálculo, visualización y programación, donde la interacción con el usuario emplea una notación matemática clásica (Aracil, y otros, 2006-2007b: p. 1).

#### **2.7.2. Desarrollo del código para el seguimiento de máxima potencia**

A continuación, en la Figura 6-2 se presenta el diagrama de flujo que describe el control de máxima potencia para los paneles fotovoltaicos programado en el entorno de Matlab. Los comandos que se utiliza se describen a continuación:

- Se crea una función dentro del script de Matlab donde recibe los valores de voltaje y corriente; y como salida un nuevo valor de voltaje que tiene como nombre de variable D.
- Se utiliza el comando *persistent* para guardar valores de algunas variables. Este comando declara a las variables como persistente, las variables persistentes son locales a la función en la que se declaran, pero sus valores se conservan en la memoria entre llamadas a la función; cuando Matlab encuentra por primera vez una declaración persistente particular, inicializa la variable persistente en una matriz vacía ([]) (MathWorks).
- Se utiliza el comando *dataType* para definir el tipo de dato de las variables.
- Se utiliza la instrucción *if*, esta instrucción evalúa una expresión y ejecuta un grupo de instrucciones cuando la expresión es verdadera y realiza otras instrucciones cuando la expresión es falsa (MathWorks).
- Se utiliza el comando *isempty* para verificar si una matriz está vacía.



**Figura 6-2.** Diagrama de flujo para el control MPPT. Algoritmo de Perturbar y Observar  
Realizado por: Luna, G. 2020

El control de seguimiento de máxima potencia está basado en el algoritmo de Perturbar y Observar es de fácil análisis e interpretación pues perturba la tensión de funcionamiento en pequeños intervalos, comprobando en cada uno si ha aumentado la potencia, para garantizar la potencia máxima y se describe a continuación:

- Se inicializa con la lectura de los valores de Voltaje y Corriente generado por los paneles solares.
- Se ingresan los parámetros de valor inicial, valor máximo, valor mínimo y el valor de incremento o decremento de  $V_{DCref}$ .
- Se guardan en memoria los valores  $V_{old}$ ,  $P_{old}$  y  $D_{old}$ .
- Se define el tipo de variable y la inicialización.
- Mide la potencia actual y comparándola con la potencia anterior, si ambas son iguales significa que se ha alcanzado el MPP y no es necesario variar el voltaje del conversor. Si la potencia actual es mayor que la potencia anterior y el voltaje actual es mayor al voltaje anterior, debe incrementarse el voltaje  $V_{ref}$  para alcanzar el MPP, caso contrario si el voltaje actual es menor al anterior, debe reducirse el voltaje  $V_{ref}$  para alcanzar el MPP. Si la potencia actual es menor a la anterior, debe reducirse  $V_{ref}$  para alcanzar el MPP, caso contrario debe incrementarse  $V_{ref}$ .

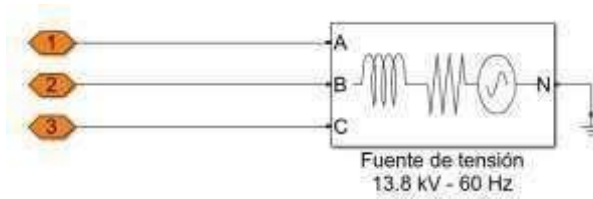
## 2.8. Diseño de la microrred

Se desarrolla los modelos para formar los elementos de la microrred. En primer lugar, se diseña la red de distribución eléctrica, después se presenta el modelo correspondiente a la carga de consumo, que como ya se ha mencionado se realiza para una zona residencial.

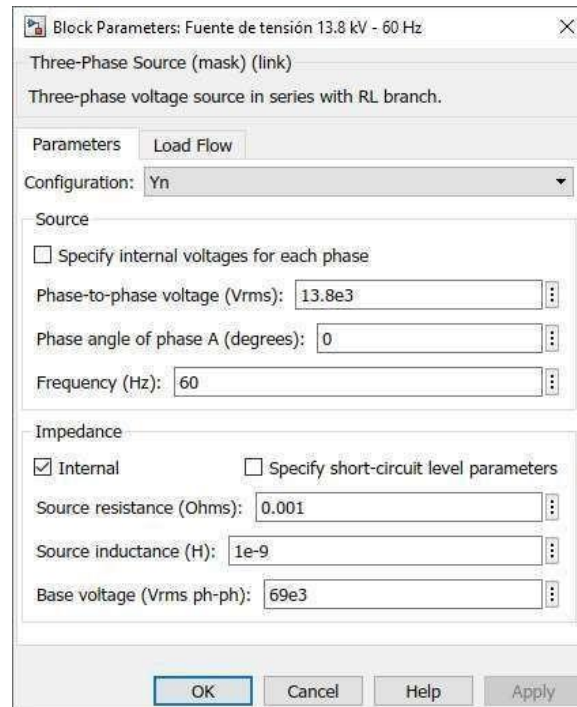
El siguiente modelo corresponde a la generación renovable, configurando el modelo para los paneles solares, además se ha implementado el control MPPT para la mejora del funcionamiento. Por último, se crea un esquema para el almacenamiento que gestione el consumo y la generación, mediante el banco de baterías electroquímicas específicamente la de ión – litio.

### 2.8.1. Modelo de la Red eléctrica de Distribución

La red de distribución está representada en la Figura 7-2.a está conformada por el bloque Three - Phase Source que se encuentra en el navegador de biblioteca simulink en la sección Simscape → Electrical → Specialized Power System → Fundamental Blocks → Electrical Sources. Este bloque está conformado por una fuente trifásica una resistencia y una inductancia, en la Figura 7-2.b se encuentra la configuración de los parámetros del bloque.



a)

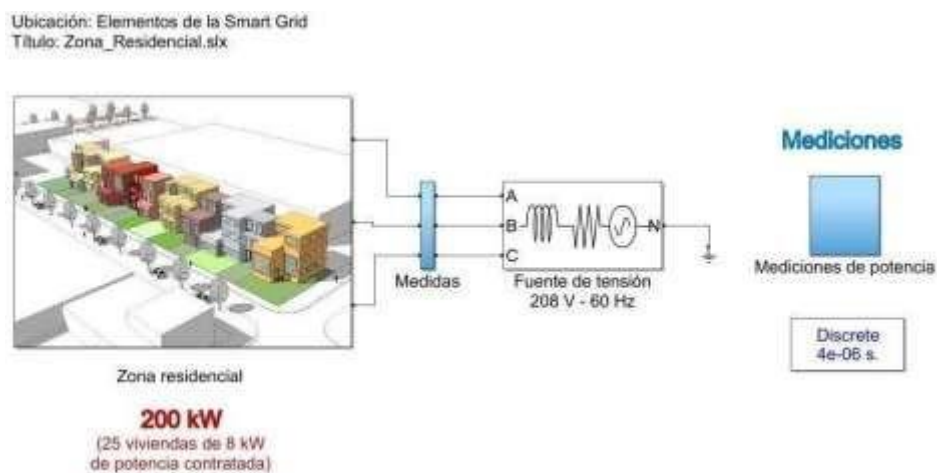


b)

**Figura 7-2.** Modelo de la red de distribución a) Bloque Three – Phase Source, a) Configuración de los parámetros.

Realizado por: Luna, G. 2021

### 2.8.2. Modelo de la carga



**Figura 8-2.** Modelo zona residencial

Realizado por: Luna, G. 2021

### Elección de la configuración de la red

De acuerdo con la normativa ecuatoriana se utiliza un voltaje monofásico de 120 V, un voltaje bifásico de 220 V y trifásico de 220 V o 208 V, siendo el voltaje más común para las viviendas el monofásico a  $120\text{ V} \pm 10\%$  de tensión nominal a una frecuencia de 60 Hz.

Sin embargo, el voltaje real medido en las viviendas por lo general no supera los 208 V, por lo que se ha mantenido este valor trifásico entre fases típicamente utilizada para instalaciones mayores a 10 kW de potencia contratada, y para esta aplicación en la MR no se tiene una vivienda individual si no que se tiene un bloque que modela un conjunto de ellas.

La fuente de tensión se modela de forma ideal, configurando la resistencia y la impedancia internas de muy bajo valor, suministra una tensión eficaz de 208 V entre fases ( $120\text{ V fase-neutro} \cdot \sqrt{3}$ ), a 60 Hz.

### Elección de la potencia de consumo

La potencia de consumo aplicada a una vivienda individual se elige realizando el cálculo aproximado de la demanda indicada en la Tabla 4-2, por la cual la potencia media contratada por hogar es de 8 kW.

**Tabla 4-2:** Cálculo de la demanda energética para una familia de clase media

EQUIPO	Nº	CC/CA	POTENCIA [W]	TIEMPO ESTIMADO DE USO (h/día)	CAPACIDAD INSTALADA [W]	DEMANDA ELÉCTRICA (Wh/día)
Aspiradora	1	CA	1000,00	0,5	1000,00	500,00
Batidora	1	CA	200,00	0,25	200,00	50,00
Cargador de celular	5	CA	120,00	15	600,00	9000,00
Computadora de escritorio	1	CA	180,00	8	180,00	1440,00
Cargador de Laptop	2	CA	45,00	6	90,00	540,00
DVD	1	CA	25,00	2	25,00	50,00
Equipo de sonido	1	CA	120,00	2	120,00	240,00
Focos ahorradores	3	CA	20,00	9	60,00	540,00
Focos led	3	CA	8,00	6	24,00	144,00
Focos incandescentes	5	CA	60,00	15	300,00	4500,00
Impresora	1	CA	17,00	0,25	17,00	4,25
Lavadora	1	CA	1000,00	1	1000,00	1000,00
Licuadora	1	CA	350,00	0,2	350,00	70,00
Microondas	1	CA	1500,00	0,3	1500,00	450,00
Secadora de cabello	1	CA	900,00	0,3	900,00	270,00



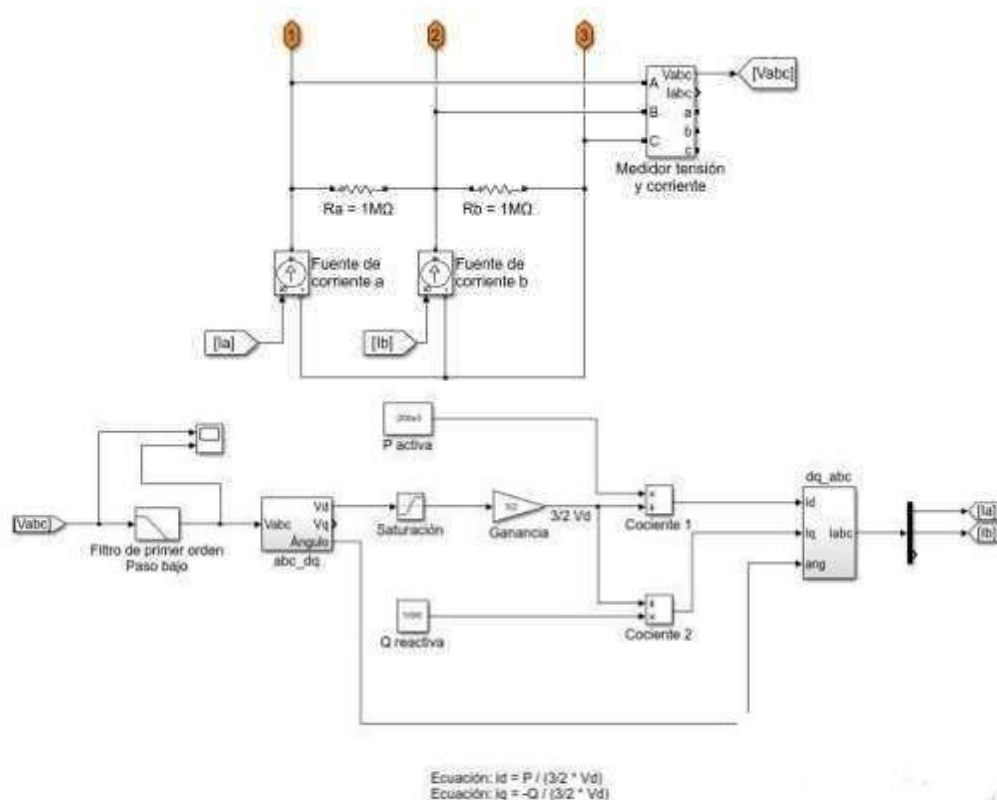
<b>Teléfono inalámbrico</b>	1	CA	25,00	24	25,00	600,00
<b>TV de 32" o más</b>	5	CA	150,00	5	750,00	3750,00
<b>TOTAL</b>					<b>7141,00</b>	<b>23148,25</b>

Realizado por: Luna, G. 2021

La potencia media instalada en una vivienda aproximadamente es de 7,141 kW, pero para el modelo de los paneles solares se le sobredimensiona con el 10% para un futuro en caso de que exista más cargas, dando una potencia de 7,8551 KW  $\approx$  8KW correspondiendo a la potencia activa, en cuanto a la potencia reactiva es una energía que no puede ser consumida o producida literalmente, esta energía no produce trabajo útil, sin embargo, es necesario transportarla para compensar la energía reactiva debido a que puede ocasionar variaciones en la intensidad eléctrica de los circuitos, produciendo sobrecarga en las líneas generadoras.

La energía reactiva se asocia a los aparatos que se requiere la utilización de bobinas, es decir que funcionen con motores o transformadores como los electrodomésticos. Sin embargo, las viviendas no cuentan con contadores que registren datos reales de consumo de energía reactiva. Por consiguiente, se decide que el valor de la potencia reactiva de cada vivienda suponga un valor estimado del 30 % del consumo total de la potencia activa.

### Submodelo



**Figura 9-2.** Zona Residencial submodelo

Realizado por: Luna, G. 2021

En la Figura 9-2 se presenta el modelo para la zona residencial y se ha diseñado en base al ejemplo de Matlab 24-hour Simulation of a Vehicle-to-Grid (V2G) System mostrado en el Anexo C.

El submodelo presentado se basa en un esquema fasorial, conformado por dos fuentes de corriente aisladas entre sí por dos resistencias de elevado valor, se lo diseña de esta manera para poder regular la tensión  $V_{abc}$  y la corriente  $I_{abc}$  en función de las referencias de potencia activa y reactiva que se quieran establecer como consumo de la carga. Para dicha regulación se realiza mediante las entradas de  $I_a$  e  $I_b$  las cuales controlan las fuentes de corriente, para  $I_c$  se configura automáticamente teniendo las otras dos componentes para tener un sistema equilibrado.

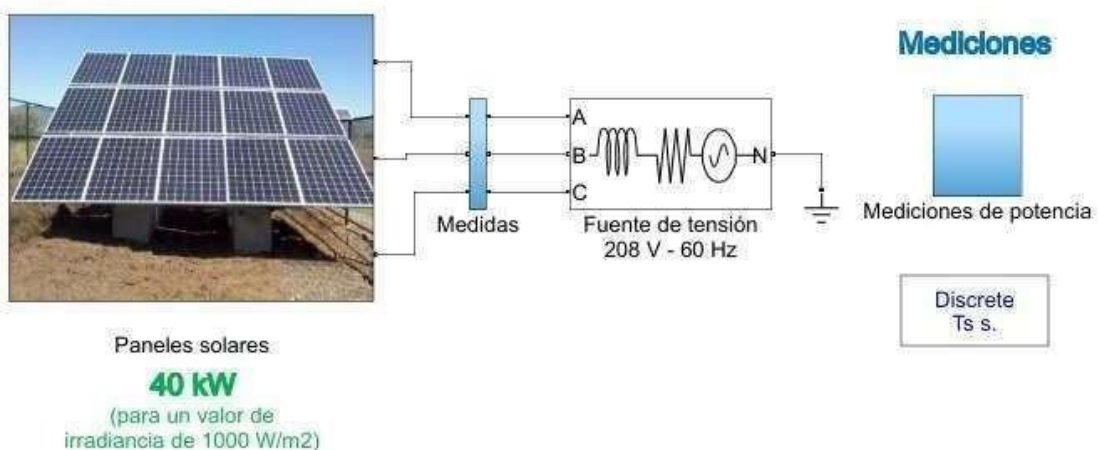
Ya que el modelo de la MR solo es para una zona residencial y en el caso de que se quiera incrementar cargas para este estudio, además de que se encuentran otros elementos y bloques debido al estado transitorio de cada uno para prevenir fallos en el modelo se incluye un filtro paso bajo para la señal  $V_{abc}$  introducida en las ecuaciones.

Se modelan las ecuaciones (15) y (16) para conseguir las entradas  $i_a$  e  $i_b$ , ya que relacionan estas corrientes con la potencia activa P y la reactiva Q. Estas ecuaciones se desarrollaron en el apartado 1.4.3.1. Control de corriente.

Para modelar una zona residencial con 25 viviendas de 8 kW de potencia contratada cada una, se establece una referencia de potencia activa en 200 kW para no obtener un valor pico de la corriente de red demasiado elevado, pensado para mantenerlo por debajo de los 900 A. Para la potencia reactiva se ingresa un valor de referencia que permita obtener el 30% del consumo de la potencia activa total.

### 2.8.3. Modelo de los paneles solares

Ubicación: Elementos de la Smart Grid  
Título: Paneles\_Solares.slx



**Figura 10-2.** Modelo paneles solares

Realizado por: Luna, G. 2021

Para este modelo se basa en el esquema “Control Corriente PanelesSolares” mostrado en el Anexo D, con algunos cambios en los valores utilizados y en la organización de los elementos, que se detallan a continuación.

### **Elección de la configuración de la red**

Para el esquema se cambia el valor de la tensión de la fuente trifásica de 110 Vrms a 208 Vrms fase-fase a 60 Hz diseñada para el modelo de la carga, para que exista un correcto funcionamiento del sistema se cambia el valor de la inductancia de 0.5mH a 6mH y del condensador de 3mF a 1mF este último ayuda a controlar la tensión VDC.

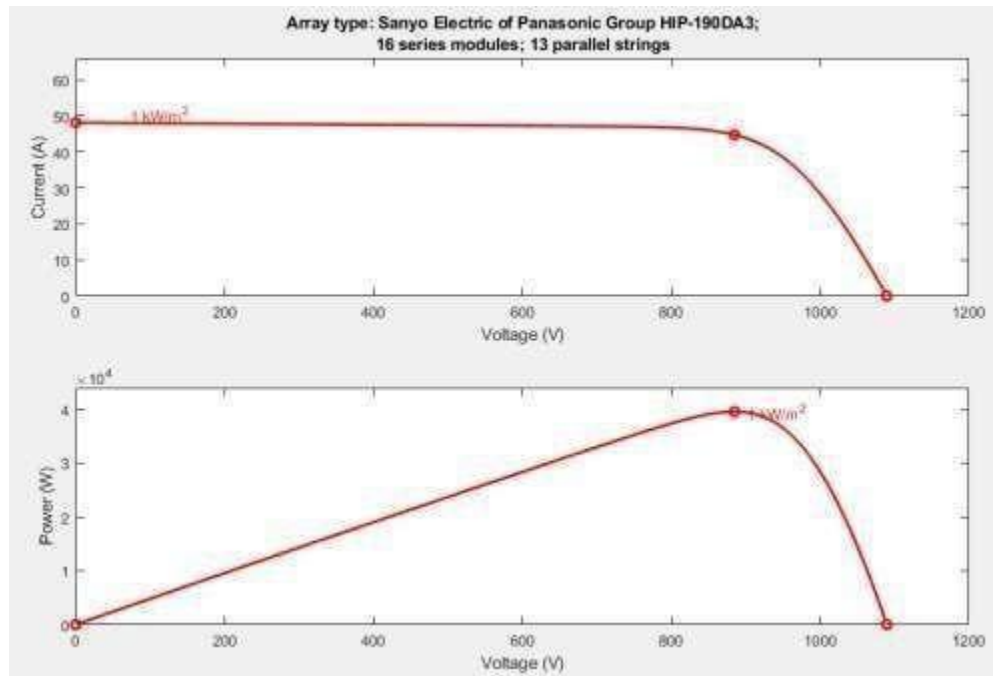
Se aumenta el valor de la bobina y se disminuye el del condensador con la finalidad de aumentar los valores de reactancia para limitar mejor esta tensión. La ecuación (22) corresponde a la expresión de la reactancia inductiva la cual es directamente proporcional al valor de la inductancia (bobina) por lo que se aumenta el valor de la bobina, mientras que la ecuación (23) se corresponde a la expresión de la reactancia capacitiva siendo inversamente proporcional al valor de la capacitancia por lo que se debe aumentar dicho valor.

$$X_L = 2\pi f L \quad (22)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (23)$$

### **Elección de la potencia de generación**

En base a la carga de consumo que se ha diseñado, sobre unos 200 kW, se escoge que la potencia que genere los paneles solares ronde dicho valor para la incidencia máxima de irradiancia. Para configurarlo, se utiliza como módulo solar el Sanyo Electric of Panasonic Group HIP-190DA3 de 190 W por módulo, utilizando las ecuaciones del apartado 1.2.5.3. Dimensionamiento del generador fotovoltaico se necesitan 987 matrices de paneles solares en total, cada una con 8 módulos en serie y 124 módulos en paralelo, pero debido a que la simulación ocupa memoria y para que no sea demasiado lenta, se trabaja con 5 matrices de paneles solares en total y cada bloque modele 16 módulos en serie y 13 módulos en paralelo, de forma que se obtiene la siguiente curva de potencia de la Figura 11-2.

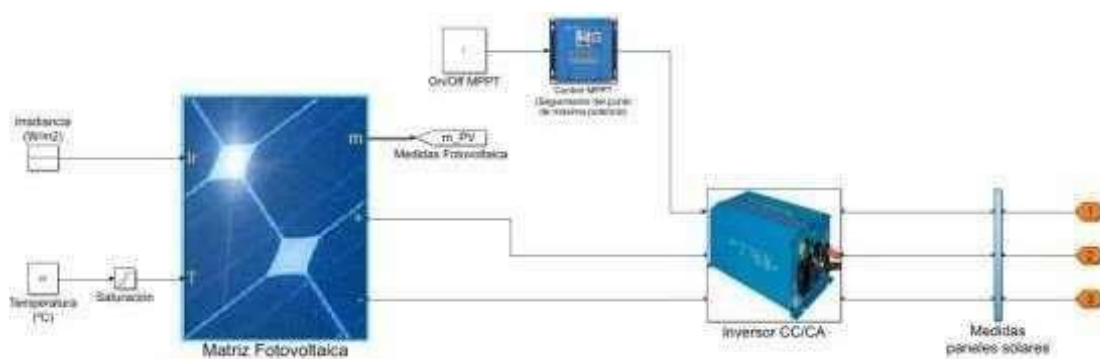


**Figura 11-2.** Paneles solares: curvas de corriente y potencia

Realizado por: Luna, G. 2021

Se puede observar de la Figura 11-2 que la matriz del panel solar puede generar casi 40 kW para valores de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, y se fija ese valor por ir acorde con el diseño y para mantener el control del inversor. Para la potencia reactiva se ajusta en torno a estos mismos valores de acuerdo con la necesidad de utilización. Por último, se configura los valores del bloque PI para acoplar a todos los cambios desarrollados.

### Submodelo

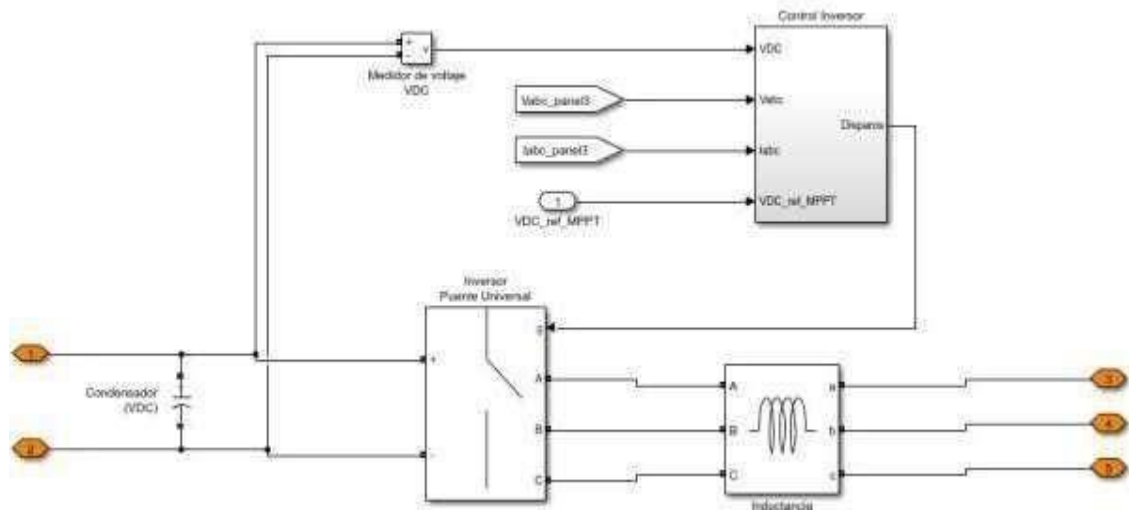


**Figura 12-2.** Paneles solares: submodelo

Realizado por: Luna, G. 2021

Además, en la matriz fotovoltaica se puede ingresar los valores de irradiancia y temperatura mientras que el inversor CC/CA controla la parte de red del panel. En la Figura 13-2 se indica el

modelo para la parte del inversor, conformado por un lado el puente universal junto con el condensador de entrada y la bobina, y por otro se recoge todo el control de los pulsos del inversor en un bloque único con el respectivo control por corriente.



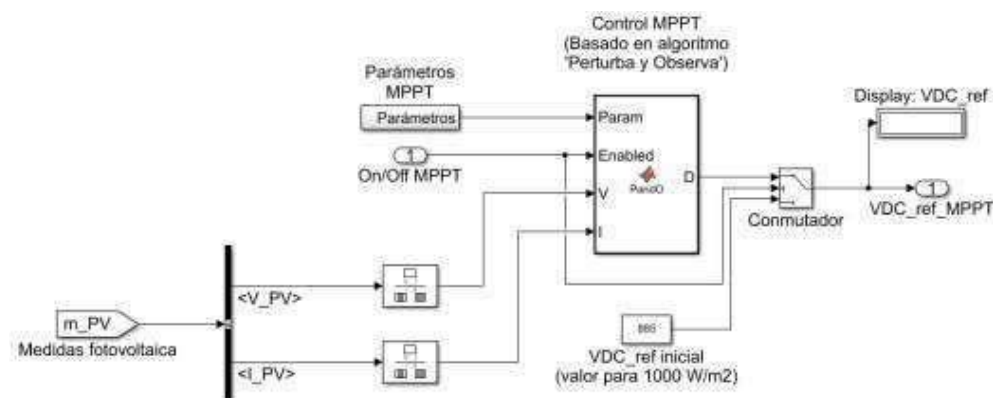
**Figura 13-2.** Inversor CC/CA paneles solares: submodelo

Realizado por: Luna, G. 2021

Además, se ha añadido un control del seguimiento del punto de máxima potencia MPPT que se detalla a continuación.

### Control MPPT: seguimiento del punto de máxima potencia

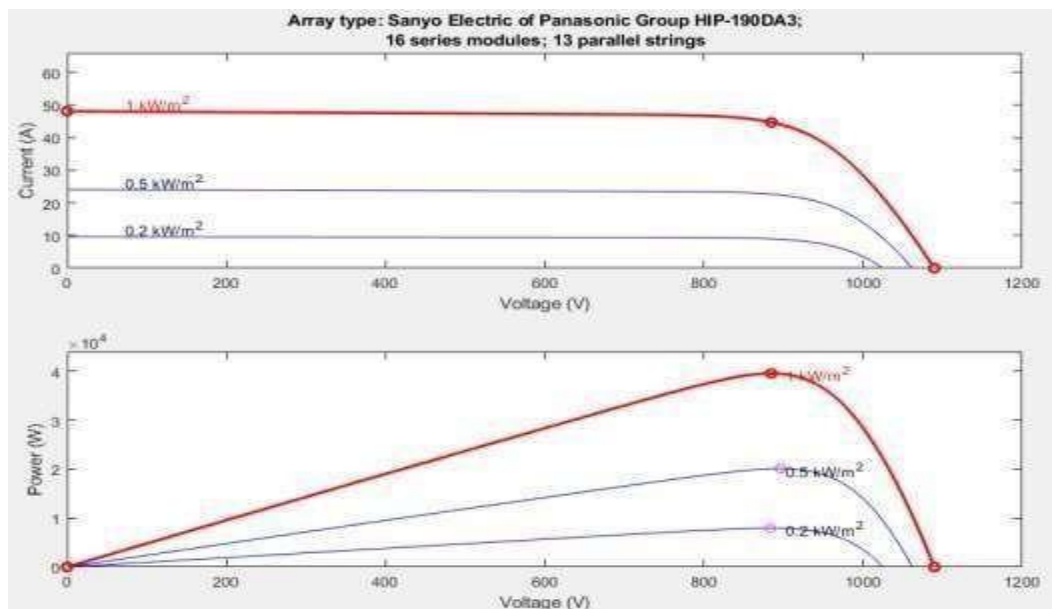
En la Figura 14-2, se indica el modelo desarrollado para el seguimiento del MPPT. Este bloque recibe las medidas de tensión y corriente extraídas del panel solar en cada momento. A partir de ellas y mediante un valor de referencia parametrizado, proporciona el valor de la referencia para VDC. Se ha incluido un conmutador para poder activar y desactivar este control. Mientras que en el Display se puede observar los valores de referencia que el control está generando durante la simulación.



**Figura 14-2.** Control de seguimiento del punto de máxima potencia MPPT

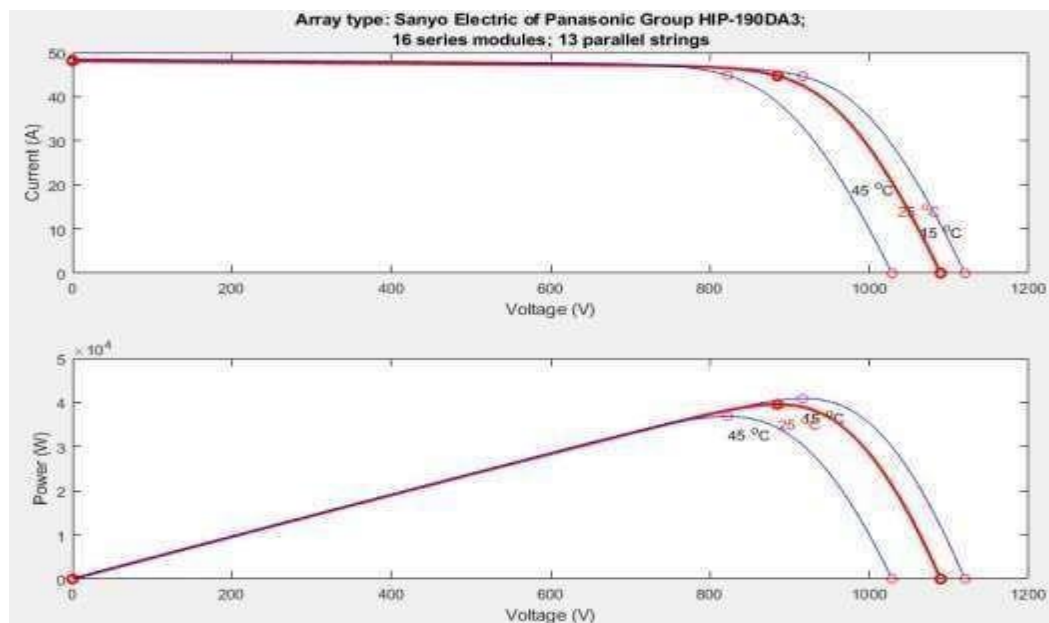
Realizado por: Luna, G. 2021

El regulador MPPT de sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracking, es un dispositivo electrónico que permite obtener un mayor rendimiento por parte de los paneles solares, pues como su nombre lo indica que en español significa Seguimiento de Máxima Potencia, hace que trabajen siempre en punto de máxima potencia de la curva, ante cambios en la irradiancia y la temperatura. En la Figura 15-2 se indica las curvas de potencia ante diferentes irradiancias mientras que en la Figura 16-2 se indica las curvas de potencia ante distintas temperaturas.



**Figura 15-2.** Control MPPT: variación del punto de máxima potencia para distintas irradiancias.

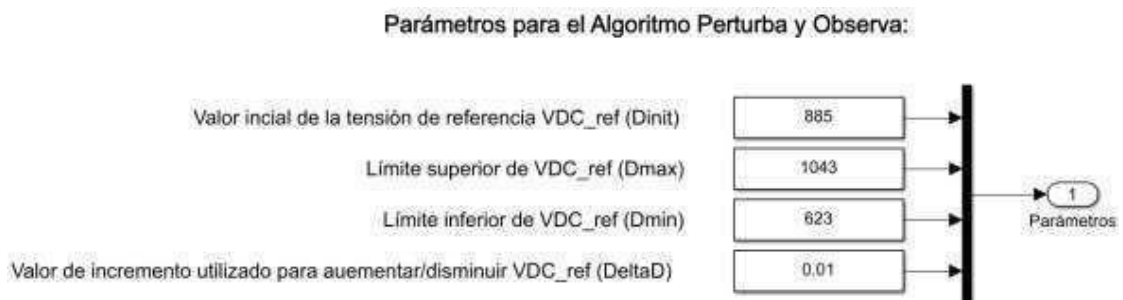
Realizado por: Luna, G. 2021



**Figura 16-2.** Control MPPT: variación del punto de máxima potencia para distintas temperaturas

Realizado por: Luna, G. 2021

Mediante el MPPT se regula la referencia de la tensión a controlar VDC, que viene siendo la tensión en el condensador del inversor. Sin seguimiento MPPT esta referencia está fija en 885 Vvalor de tensión para la máxima potencia a 1000 W/m2. Para el algoritmo P&O mostrado en el Anexo E su código, se introducen en el bloque un valor de tensión inicial, límites superior e inferior, y un valor de incremento para el voltaje de referencia (VDC). Estos parámetros se muestran en la Figura 17-2.

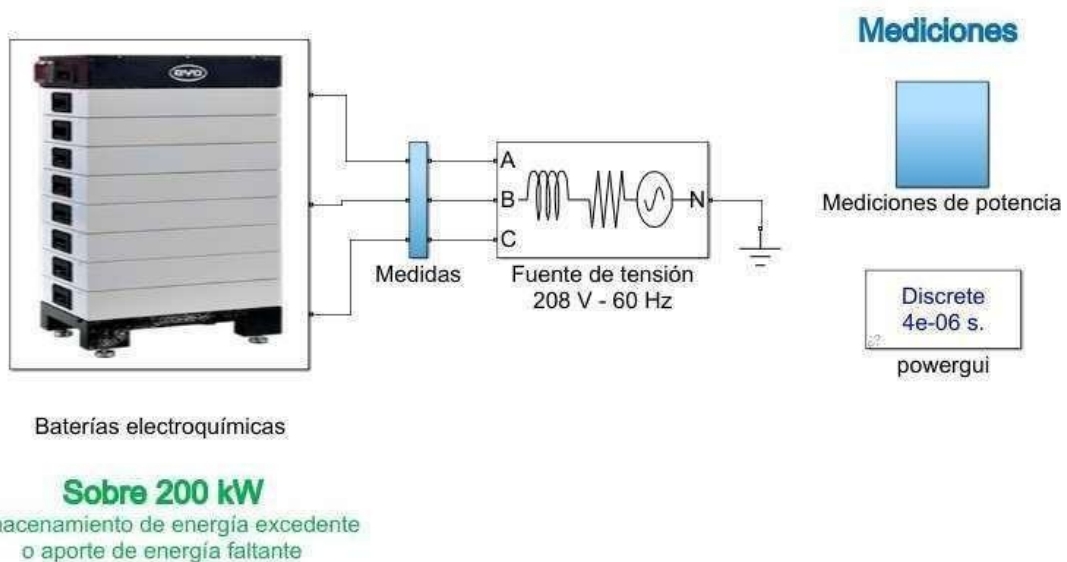


**Figura 17-2.** Control MPPT: parámetros

Realizado por: Luna, G. 2021

#### 2.8.4. Modelo de la batería electroquímica

Ubicación: Elementos de la Smart Grid  
Título: Baterias\_electroquimicas.slx



**Figura 18-2.** Modelo baterías electroquímicas.

Realizado por: Luna, G. 2021

En la Figura 18-2 se encuentra el modelo para las baterías electroquímicas de ion-litio, se basa en el esquema “Control Corriente FuentesDC” que se muestra en el Anexo F con algunos cambios en los valores utilizados y en la organización de los elementos, que se detallan a continuación.

### **Elección de la configuración de la red**

Para el esquema se tiene la fuente trifásica de 208 V eficaces entre fases a 60 Hz, se cambia las fuentes DC de 250 V cada una dando un total de 500 V, por un bloque de 26 baterías electroquímicas de Matlab conectadas en paralelo y 3 en serie de 409 V con una capacidad nominal de 25.037Ah cada uno, dando un total de 1227 V con una capacidad de carga de 650.962 Ah; pero para que no ocupe demasiada memoria se modela 9 baterías electroquímicas conectadas en paralelo y 3 en serie de 409 V con una capacidad nominal de 72.329Ah cada uno, dando un total de 1227 V con una capacidad de carga de 650.962 Ah.

Para la parte del inversor se tiene por un lado el inversor de puente universal, una inductancia de 0.5mH y el bloque de control del inversor que se lo realiza mediante el control por corriente.

### **Elección de la potencia de almacenamiento**

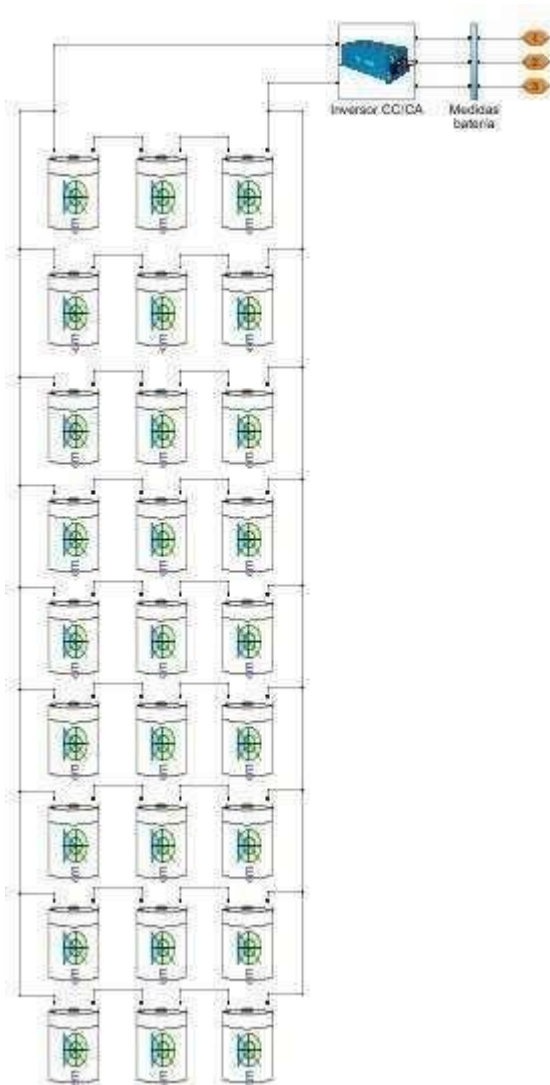
En base al resto de elementos diseñados para la MR, se establece un valor de 200 kW tanto para la carga de consumo como para la generación, y como también consume o genera potencia reactiva, se establece un valor de 20 kVAr. Se configura los valores del bloque PI de control para corregir los valores de potencia activa y reactiva.

El diseño del modelo de la batería electroquímica realiza el control del aporte o consumo de potencia a la red, y se logra cambiando las referencias de la potencia activa y reactiva de valores positivos a negativos para el consumo y viceversa para el aporte.

### **Submodelo**

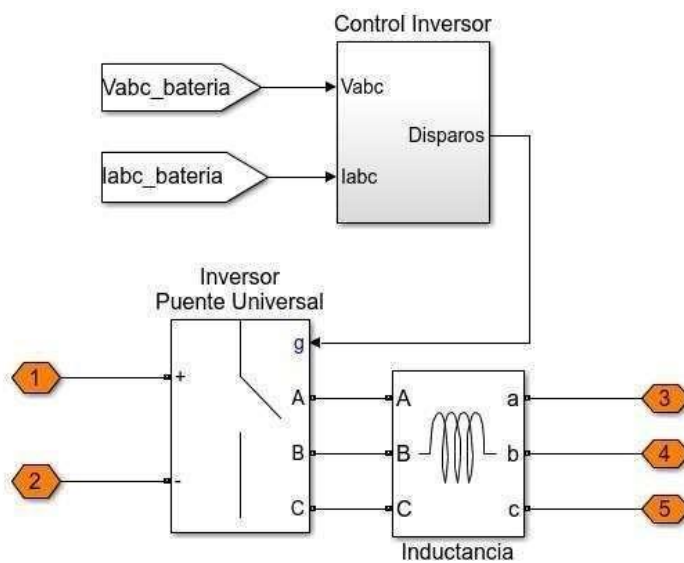
La estructura del submodelo se muestra en la Figura 19-2 y consiste en la conexión de ocho baterías conectadas en paralelo junto con el inversor, mientras que en la Figura 20-2 se observa el submodelo para la parte del inversor el cual ha sido adaptado el esquema que se diseñó para el control por corriente del modelo de paneles solares con la diferencia de que el control se realiza sobre la potencia activa P en lugar de VDC, por lo que solo es necesario introducir el valor de la tensión y corriente de carga.





**Figura 19-2.** Baterías electroquímicas: submodelo

Realizado por: Luna, G. 2021

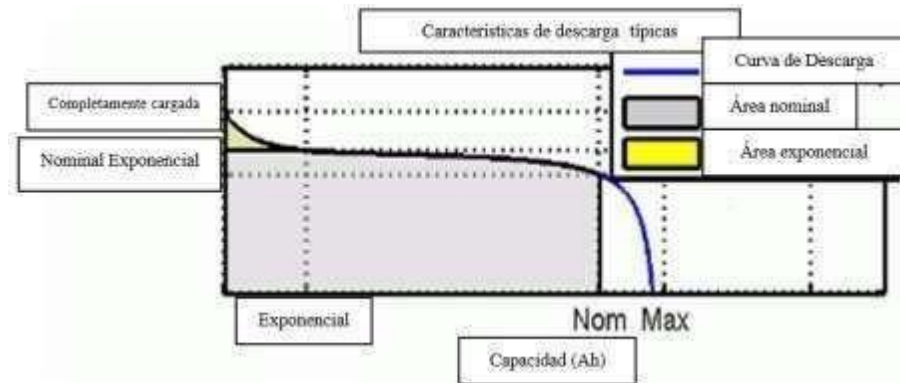


**Figura 20-2.** Inversor CC/CA baterías electroquímicas: submodelo

Realizado por: Luna, G. 2021

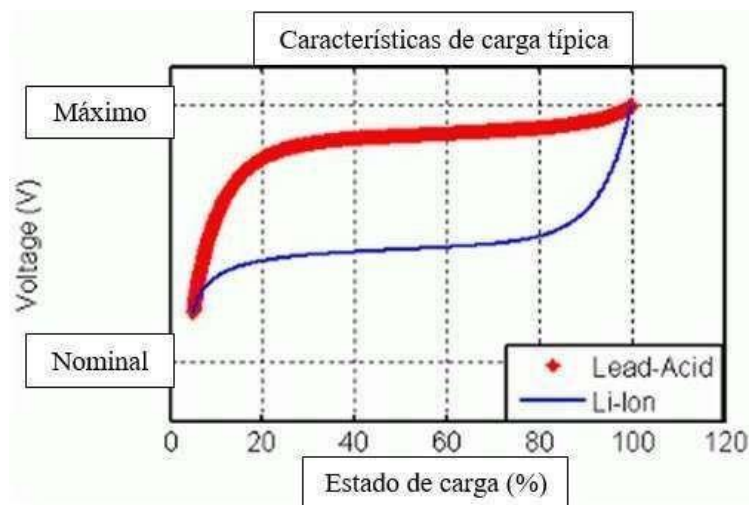
Por otra parte, es necesario adaptar los valores del bloque de la batería en función de tensión continua escogida, para poder modelar correctamente las curvas de carga y descarga que incluye el modelo de Simulink y que se muestran en la Figura 21-2 y Figura 22-2 correspondientes a la guía de ayuda de Matlab.

Claro está que para este bloque no se ha profundizado en las condiciones de carga y descarga de las baterías, ya que solo se va a simular unos instantes de tiempo y la finalidad solamente es el de controlar la potencia aportada o almacenada.



**Figura 21-2.** Baterías electroquímicas: curva de descarga típica.

Fuente: Mathworks



**Figura 22-2.** Baterías electroquímicas: curva de carga típica.

Fuente: Mathworks

### 2.8.5. Modelo de la microrred

Se desarrolla la microrred que pueda funcionar en modo de conexión a red; se realiza el proceso de configuración de red y la unión de los elementos a la red. El esquema completo se encuentra en la Figura 24-2.

Como elemento de generación renovable se incluye cinco matrices de paneles solares de lo que

se ha diseñado; como elemento de consumo se ha incluido una zona residencial de 25 viviendas; el modelo de las baterías electroquímicas diseñado controlará tanto el almacenamiento como el aporte de energía extra para la Microrred.

### **Elección de la configuración de red y acople de los elementos**

Para acoplar todos los elementos entre sí, se ha creado una red principal de distribución a la que se integrarán todos los elementos. Según un análisis para las características de las tensiones de red en función de su utilización a partir de la Tabla 5-2, se necesita una red de distribución de media tensión. El valor de 13.8 kV será suficiente para el diseño de la red completa.

**Tabla 5-2:** Tabla de configuración de media, alta, y muy alta tensión

<b>TIPO</b>	<b>VALOR</b>	<b>USO</b>
Media Tensión	6.3 kV	Producción y distribución de energía.
	13.8 kV	
	22 kV	
Alta Tensión	69 kV	Transporte y distribución de energía
	138 kV	
Muy Alta Tensión	138 kV	Transporte de energía
	230 kV	

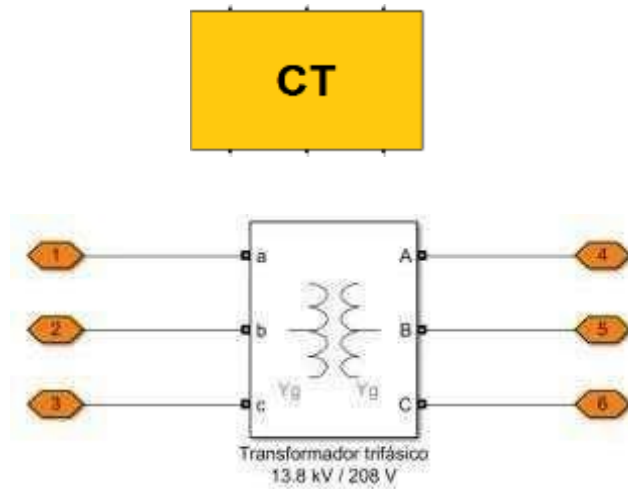
**Fuente:** Jaramillo, 2010

**Realizado por:** Luna, G. 2021

Para la integración de todos los elementos se utiliza centros de transformación (CT), y consiste en una instalación eléctrica que recibe energía en alta o media tensión y la entrega en media o baja tensión para su utilización por los usuarios finales, normalmente a 208 V en trifásica y 120 V en monofásica.

Para esta aplicación, se modela un centro de transformación para cada elemento que se integra, de forma que se pueda reducir la tensión de distribución de 13.8 kV a los 208 V trifásicos diseñados. Además, se realiza con la finalidad de aislar los bloques para su correcto funcionamiento y la toma de medidas de cada uno de ellos por separado.

El centro de transformación se muestra en la Figura 23-2, y se modela a partir de un transformador trifásico de dos bobinados configurado prácticamente como ideal (valores muy elevados de resistencia e inductancia de magnetización).



**Figura 23-2.** Microrred red fuerte: centro de transformación.

**Realizado por:** Luna, G. 2021

### **Elección de las funcionalidades de la Microrred**

Los resultados finales de simulación que muestran el funcionamiento del esquema, al ser un modelo final, se desarrollarán en el Capítulo 3: Resultados de simulación.

Las funcionalidades que se van a comprobar son cuando:

- La producción es menor al consumo por lo tanto la Microrred consume energía de la red.
- La producción es mayor que el consumo por lo que la Microrred vende energía a la red.
- La producción es menor al consumo, entonces la diferencia es suministrada por la batería para no consumir de la red (hipótesis de precio de compra elevado).
- La producción es mayor que el consumo, entonces la diferencia es acumulada en la batería para no vender a la red (hipótesis de precio de venta reducido o no rentable).

Ubicación: Smart Grid conectada a red fuerte  
Título: SmartGrid\_Red\_Fuerte.slx

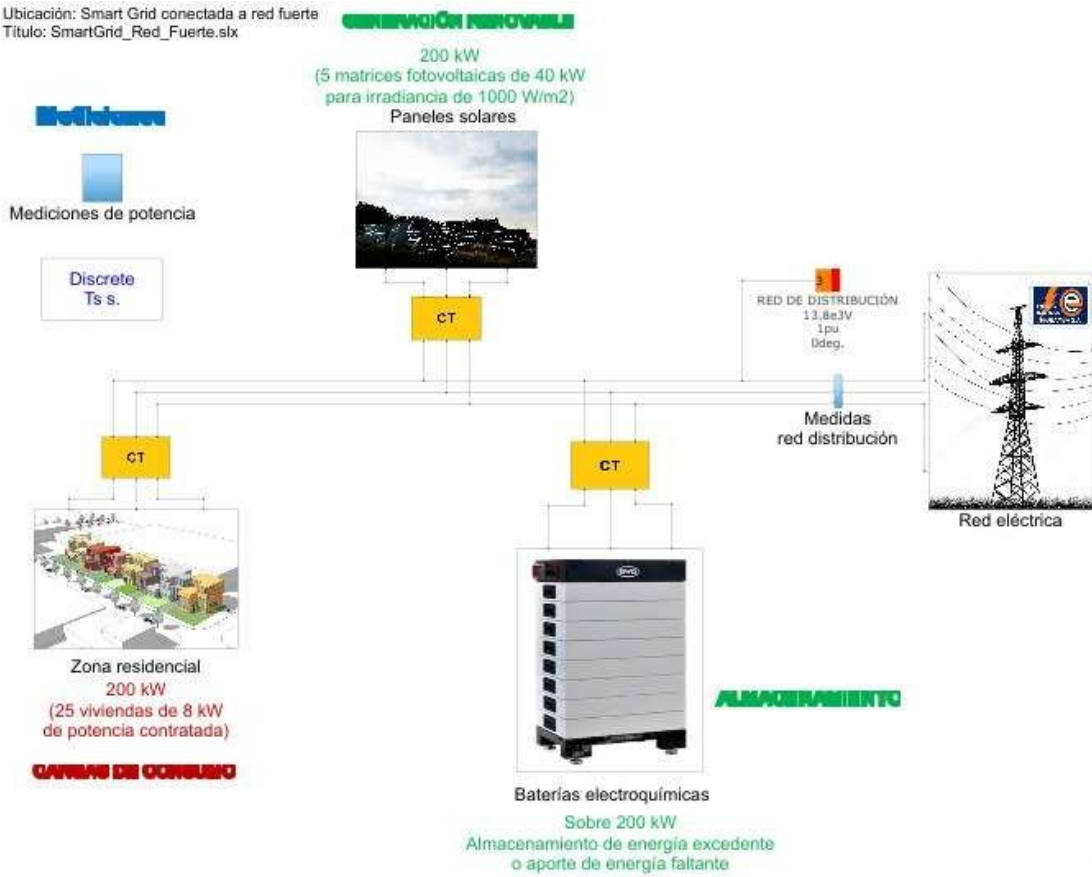


Figura 24-2. Modelo de la Microrred

Realizado por: Luna, G. 2021

## CAPÍTULO III

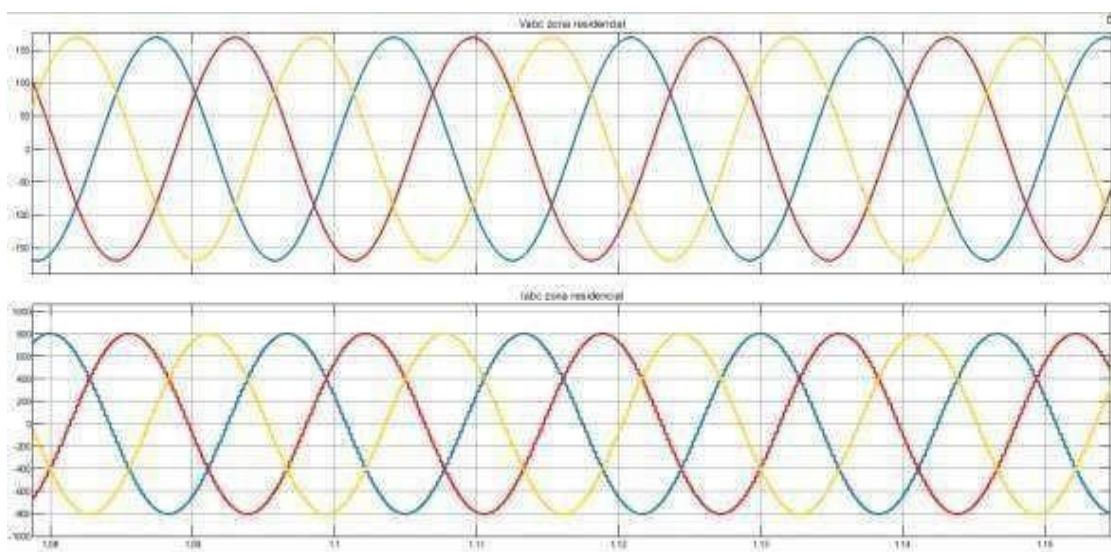
### 3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas a la simulación para garantizar el cumplimiento de los requerimientos planteados, se realizó pruebas al control por corriente a la carga de consumo (zona residencial), al control por corriente al inversor de los paneles solares, al controlador MPPT de los paneles solares y el control por corriente del inversor del banco de baterías y se realizó cuatro pruebas para la MR completa.

#### 3.1. Resultados de la carga de consumo con fuente trifásica

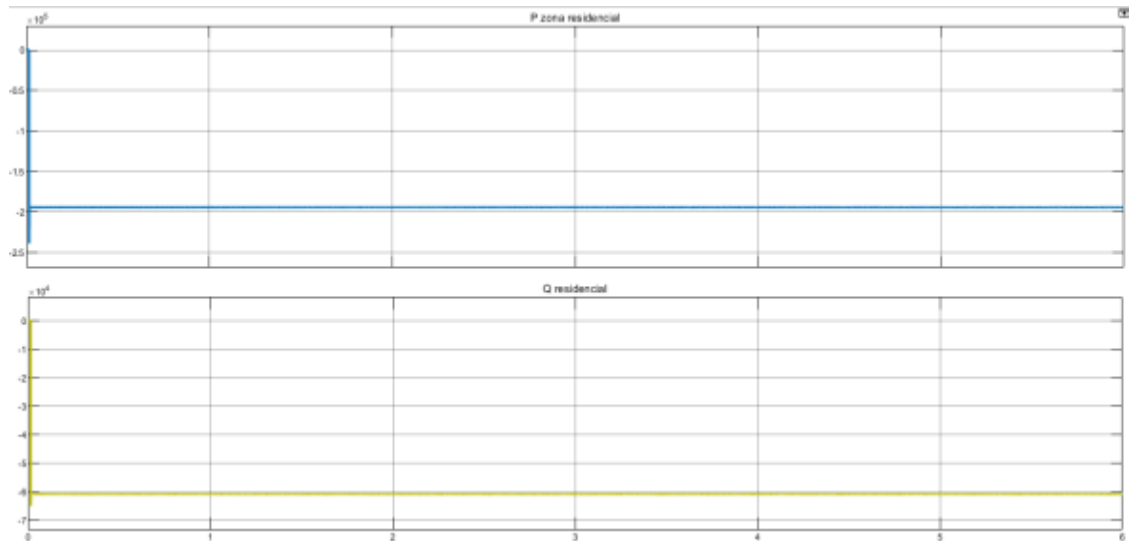
En la Gráfica 1-3 se observa que el resultado para la tensión de red fase neutro de pico se corresponde con el valor esperado de 169 V ( $120 \text{ Vrms} \cdot \sqrt{2} = 169 \text{ Vpico}$ ) ya que las viviendas no superan los 208 V; mientras que la corriente de red es una onda senoidal, lo que significa que el control por corriente funciona correctamente, tiene un valor pico alto de 802 A debido a que la potencia es elevada sin embargo es el valor esperado, acorde con la limitación planteada de no superar los 900 A.

Por otro lado, en la Gráfica 2-3 se puede ver que se obtiene el valor de 200 kW de potencia negativo y un poco por debajo de la referencia ya que significa que está consumiendo, mientras que para la potencia reactiva se puede ver que consume el 30% de la potencia activa, como fue diseñado.



**Gráfica 1-3.** Zona residencial: resultados de tensión y corriente de red.

**Realizado por:** Luna G. 2021



**Gráfica 2-3.** Zona residencial: resultados de potencia de consumo.

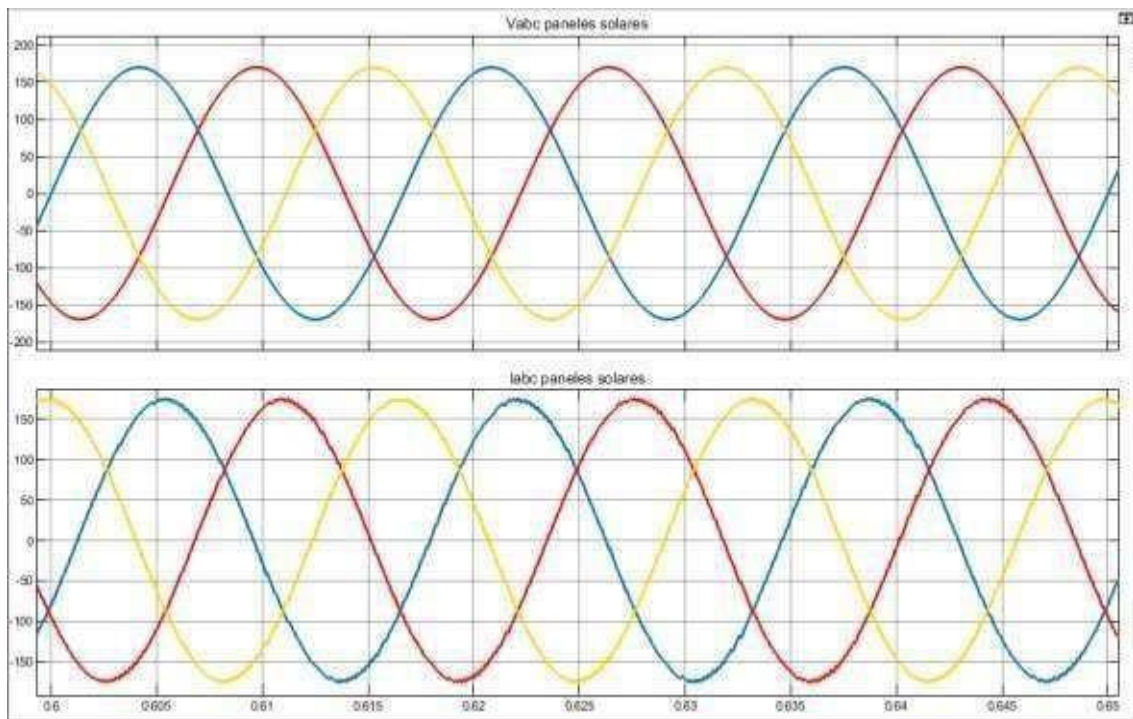
Realizado por: Luna G. 2021

### 3.2. Resultados del controlador MPPT de los paneles solares

*Resultados generales para  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$*

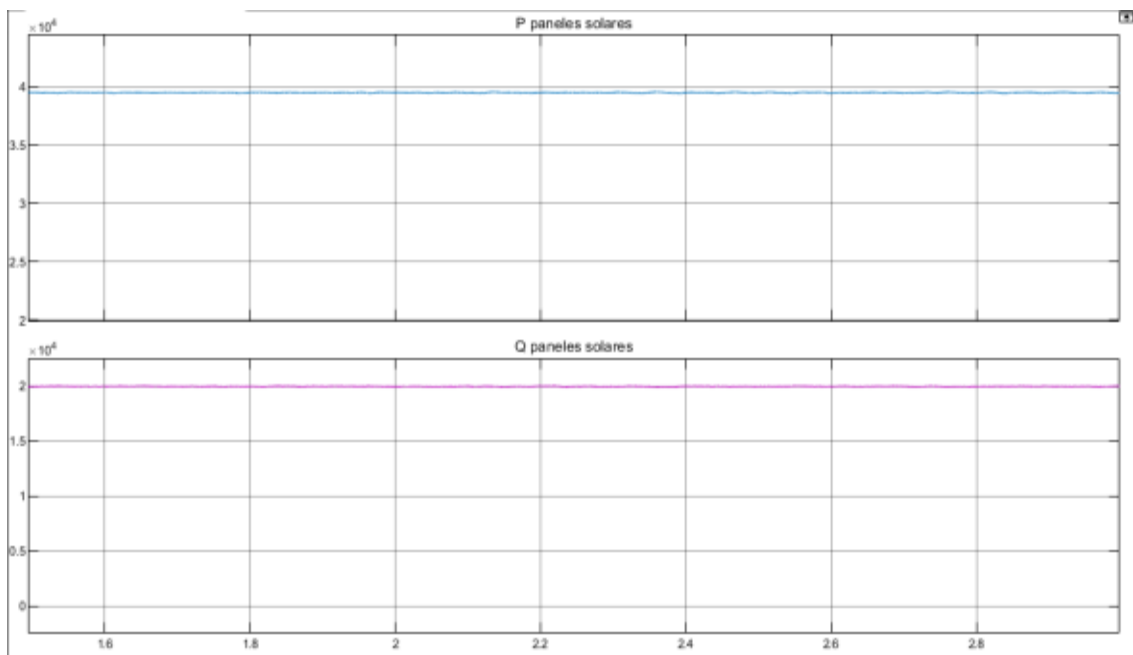
En la Gráfica 3-3 se puede observar que los resultados tanto de tensión como de corriente son senoidales, de muy poco rizado y buena forma de onda, implica que el control de corriente para los paneles solares funciona correctamente. Para los valores nominales de irradiancia y temperatura, se obtienen valores acordes a la potencia diseñada, para la potencia activa un valor de 39.5 kW mientras que para la potencia reactiva un valor de 20 kVAr. Estos valores son iguales o similares tanto si se no se emplea el control MPPT visualizada en la Gráfica 4-3 como si se activa mostrada en la Gráfica 5-3.

Resulta que como se fijó la referencia para VDC este corresponde al punto de máxima potencia para los valores nominales (885 V) cuando no se activa el control MPPT; mientras que cuando se activa el control MPPT se obtiene una señal un poco más oscilante ya que el algoritmo P&O no marca un valor fijo si no que se mantiene en un pequeño rango de variaciones cuando encuentra la máxima potencia para poder adaptarse a los cambios.



**Gráfica 3-3.** Paneles solares: resultados de tensión y corriente de red.

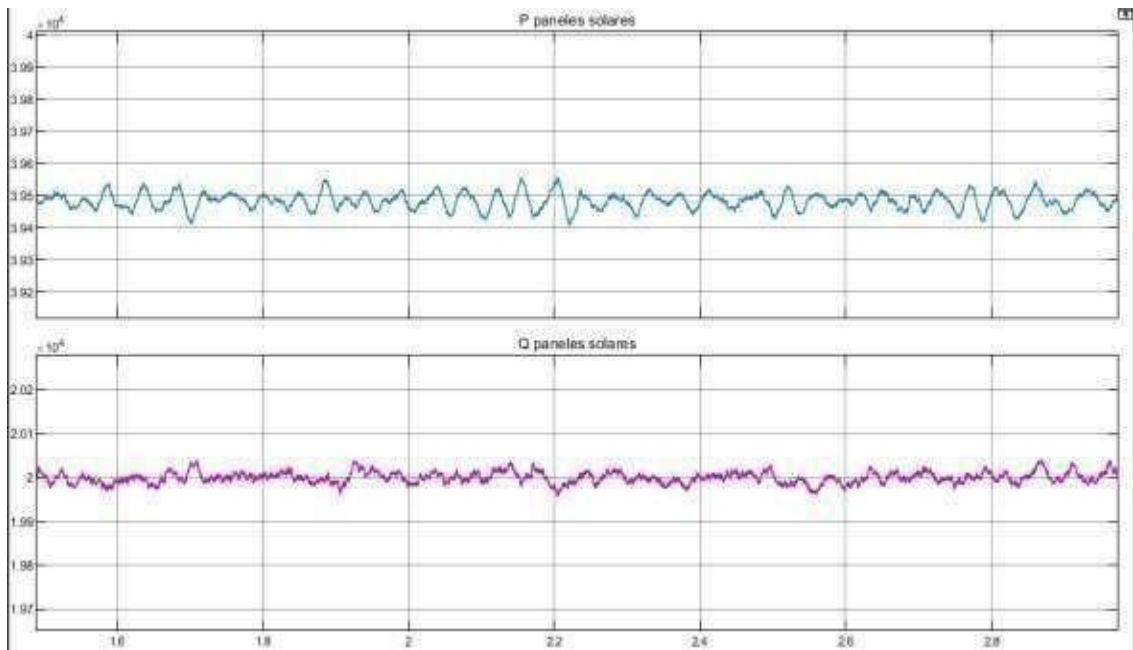
Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 4-3.** Paneles solares: resultados de potencias de generación sin control MPPT.

Realizado por: Luna G. 2021

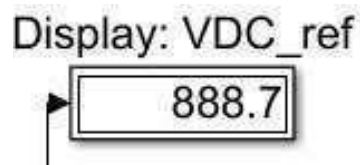




**Gráfica 5-3.** Paneles solares: resultados de potencias de generación con control MPPT.

**Realizado por:** Luna G. 2021

Se observa en la Figura 1-3 el valor de tensión que alcanza el MPPT cuando se estabiliza, se mantiene unos voltios (en torno a 4 V) por encima del valor de tensión para la máxima potencia.



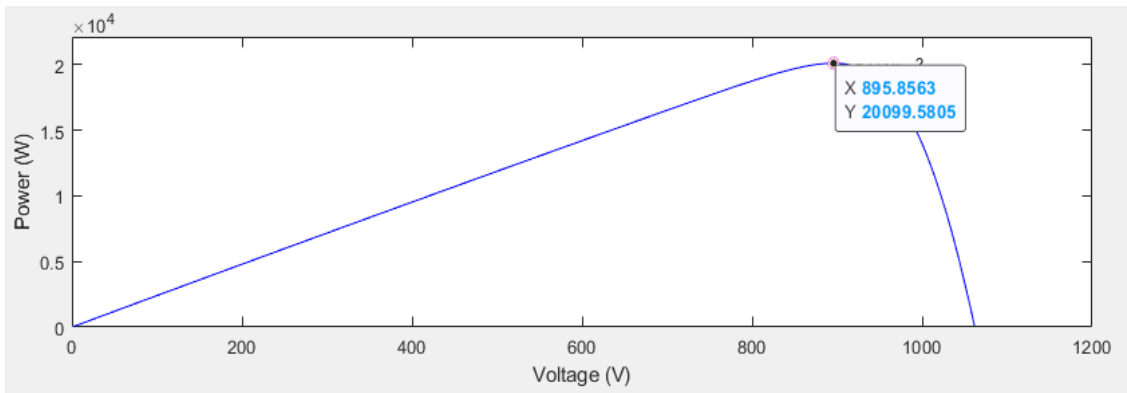
**Figura 1-3.** Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT.

**Realizado por:** Luna, G. 2021

A continuación, se realiza cambios en los valores nominales de irradiancia y temperatura, para comprobar con detenimiento el funcionamiento del control MPPT.

Resultados del MPPT: variación de la irradiancia

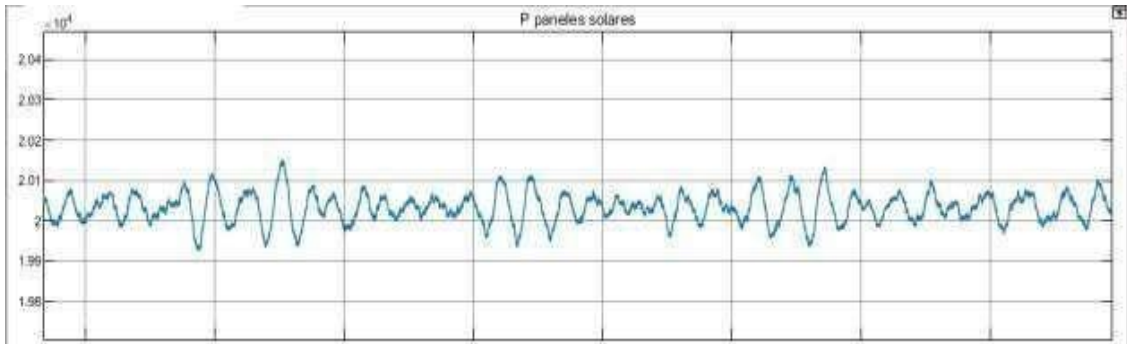
Se varió el valor de la irradiancia a 500 W/m<sup>2</sup>, se observa en la Gráfica 6-3 que el punto de máxima potencia es de 20 kW y corresponde al valor de tensión de 895.8 V.



**Gráfica 6-3.** Paneles solares: punto de máxima potencia para  $500 \text{ W/m}^2$ .

**Realizado por:** Luna G. 2021

Cuando se desactiva el control MPPT, la referencia (885 V) es inferior al valor óptimo, aunque se varíe la irradiancia a la mitad no hay gran diferencia, se obtiene un valor prácticamente óptimo rondando sobre los 20 kW como se muestra en la Gráfica 7-3.



**Gráfica 7-3.** Paneles solares: resultados de potencia activa para  $500 \text{ W/m}^2$  sin control MPPT.

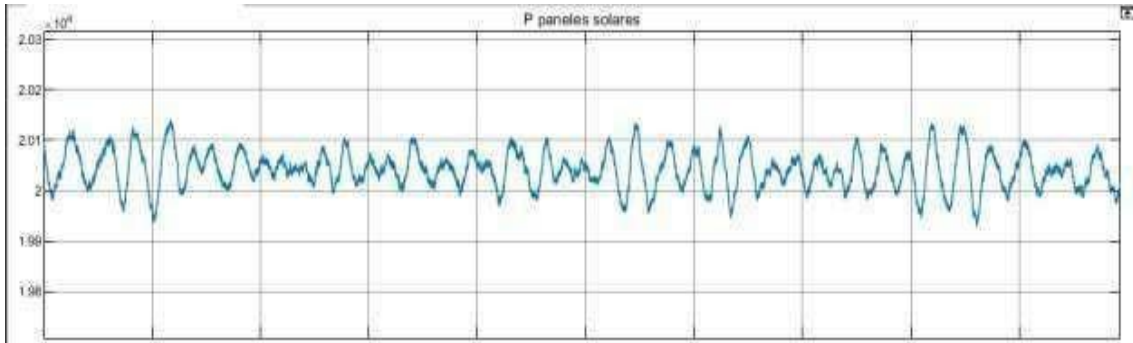
**Realizado por:** Luna G. 2021

En la Figura 2-3 se muestra en el Display el valor de tensión en el que el regulador MPPT se estabiliza, dando como resultado óptimo la señal de potencia que se indica en la Gráfica 8-3.



**Figura 2-3.** Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT para  $500 \text{ w/m}^2$ .

**Realizado por:** Luna, G. 2021



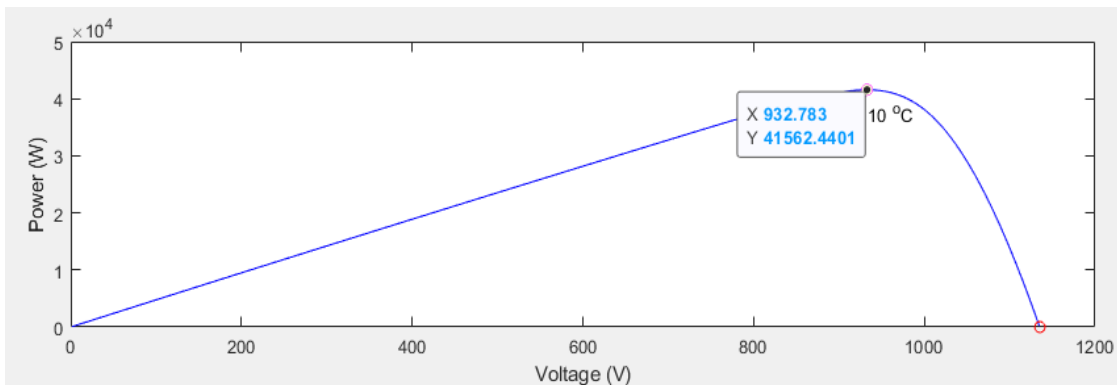
**Gráfica 8-3.** Paneles solares: resultados de potencia activa para  $500 \text{ W/m}^2$  con control MPPT.

Realizado por: Luna G. 2021

Resultados del MPPT: variación de la temperatura

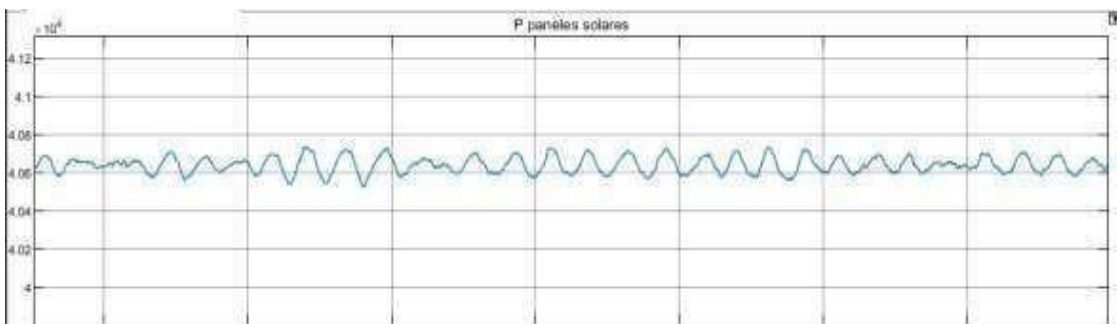
En la Gráfica 9-3 se observa que al variar la temperatura varía mucho más la tensión (eje x) y se mantiene casi igual el valor de la potencia (eje y) que ante variaciones en la irradiancia; que ocurre lo contrario, variaba la potencia y se mantenía igual la tensión. De modo que, este supone un mejor ejemplo para comprobar la eficacia del regulador MPPT.

La Gráfica 10-3 corresponde a los resultados de potencia en el caso de deshabilitar el MPPT, se observa que el panel ofrece una potencia de 40.6 kW, perdiendo aproximadamente 1 kW de potencia que podría aportar más.



**Gráfica 9-3.** Paneles solares: punto de máxima potencia para  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

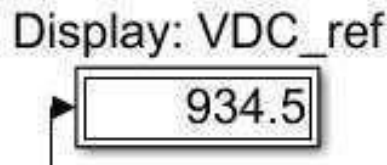
Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 10-3.** Paneles solares: resultados de potencia para  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  sin control MPPT.

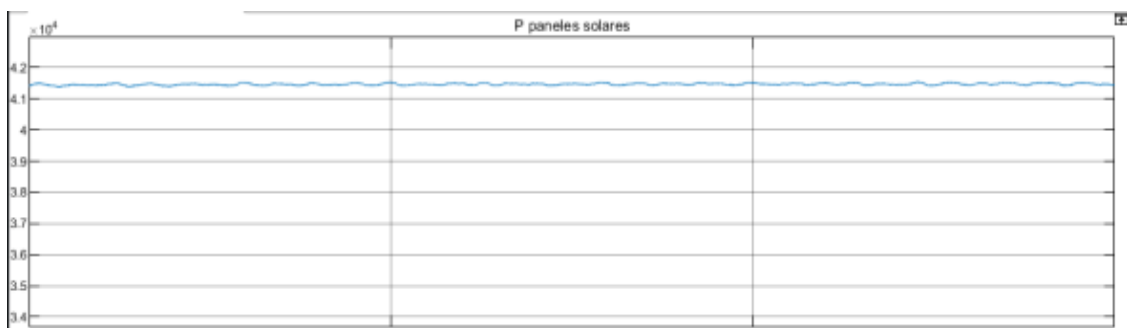
Realizado por: Luna G. 2021

En la Gráfica 11-3 se muestra la señal de la potencia en el caso de tener activo el MPPT, se alcanza aproximadamente la potencia máxima de 41.5 kW, por lo que se trabaja con mayor eficacia y el control MPPT supone una mejora considerable. Además, la Figura 3-3 muestra el valor que el que se estabiliza siendo el adecuado según la gráfica de potencia.



**Figura 3-3.** Paneles solares: valor estabilizado de referencia de VDC con MPPT para 10 °C.

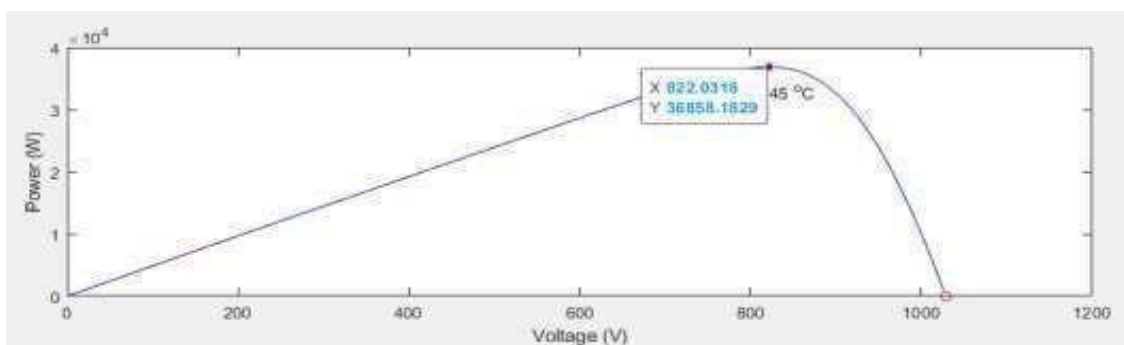
**Realizado por:** Luna, G. 2021



**Gráfica 11-3.** Paneles solares: resultados de potencia para 10 °C con control MPPT.

**Realizado por:** Luna G. 2021

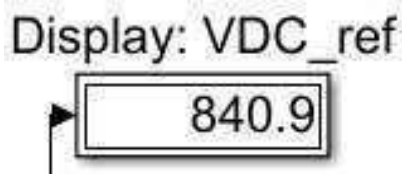
Se analizó el seguimiento unidireccional para el control MPPT, se planteó el caso en el que el punto de máxima potencia se desplaza hacia la izquierda ya que hasta este momento se desplazaba hacia la derecha. En la Gráfica 12-3 muestra la curva de potencia con relación al voltaje para una temperatura de 45°C que supone el desplazamiento hacia la izquierda del punto de máxima potencia del valor nominal.



**Gráfica 12-3.** Paneles solares: punto de máxima potencia para 45 °C.

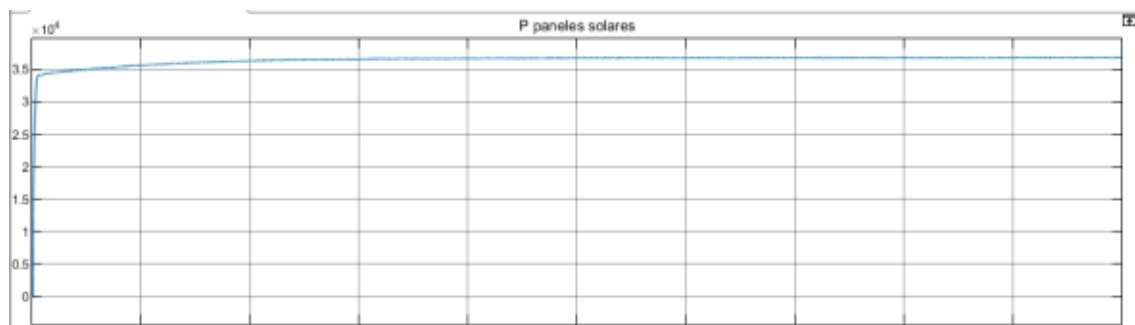
**Realizado por:** Luna G. 2021

Observando el resultado de simulación en la Gráfica 13-3 y en el Display de la referencia de la Figura 4-3, se concluye que el control MPPT desarrollado por el algoritmo de Matlab contempla este desplazamiento, el valor final obtenido es del límite inferior parametrizado sin embargo se mantiene completamente el control sobre la potencia. Por lo tanto, el regulador MPPT modelado en este bloque puede funcionar ante cambios unidireccionales hacia la derecha de la curva.



**Figura 4-3.** Paneles solares: resultados de potencia para 45 °C con control MPPT descendente.

Realizado por: Luna, G. 2021



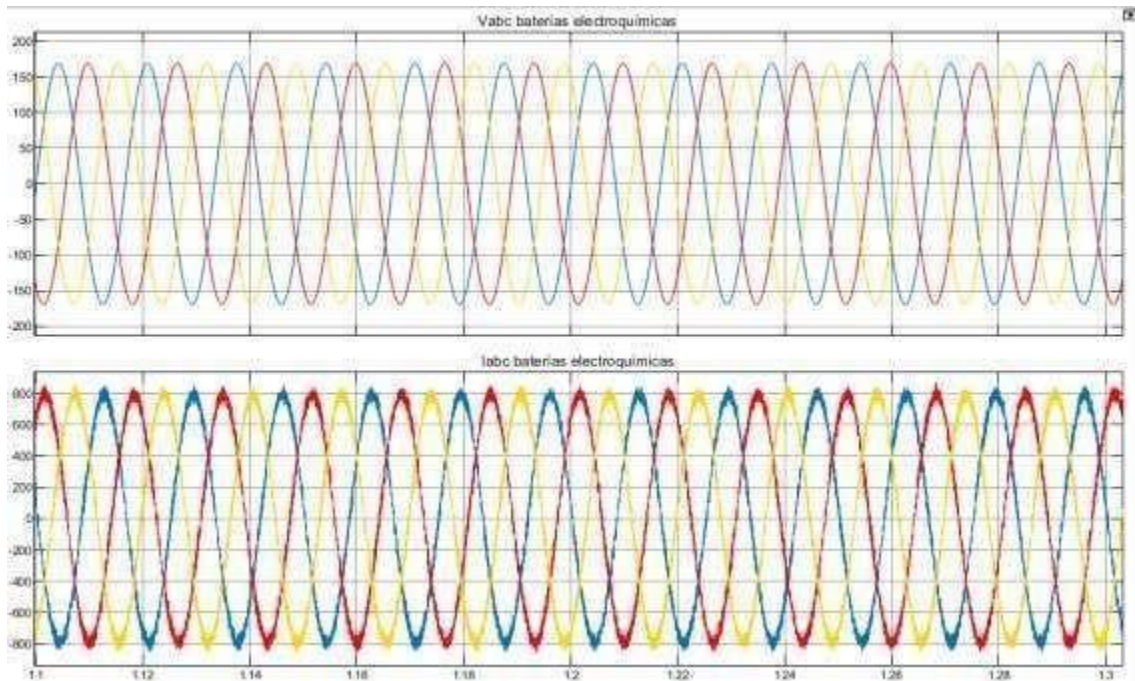
**Gráfica 13-3.** Paneles solares: resultados de potencia para 45 °C con control MPPT descendente.

Realizado por: Luna G. 2021

### 3.3. Resultados de las baterías con fuente trifásica

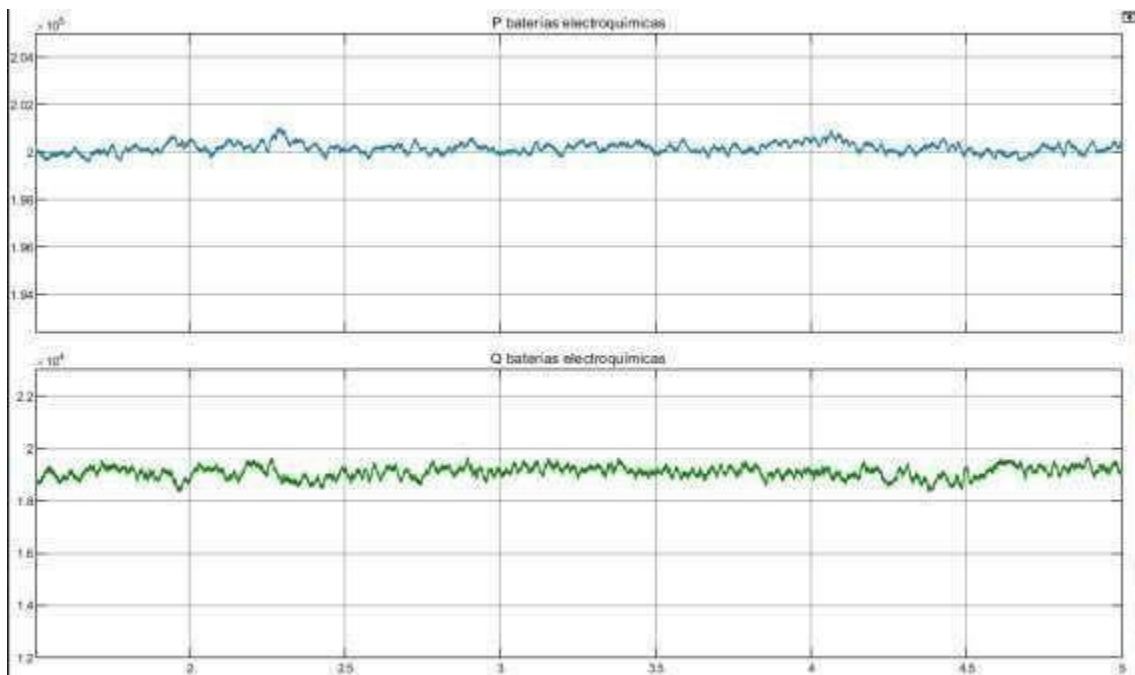
La Gráfica 14-3 muestra los resultados obtenidos para las tensiones y corrientes de red, y se puede ver que se adapta a los valores diseñados, además presenta una forma de onda adecuada por lo que el control del inversor funciona correctamente.

En la Gráfica 15-3 se muestran los valores de potencia activa y reactiva como aporte de energía a la red se lo aprecia ya que son valores positivos, mientras que en la Gráfica 16-3 se muestran los valores de potencia activa y reactiva como almacenamiento de esta energía si se requiere, está consumiendo de la red ya que toma valores negativos. Por lo tanto, el modelo del banco de baterías se puede adaptar al resto de elementos de la MR.



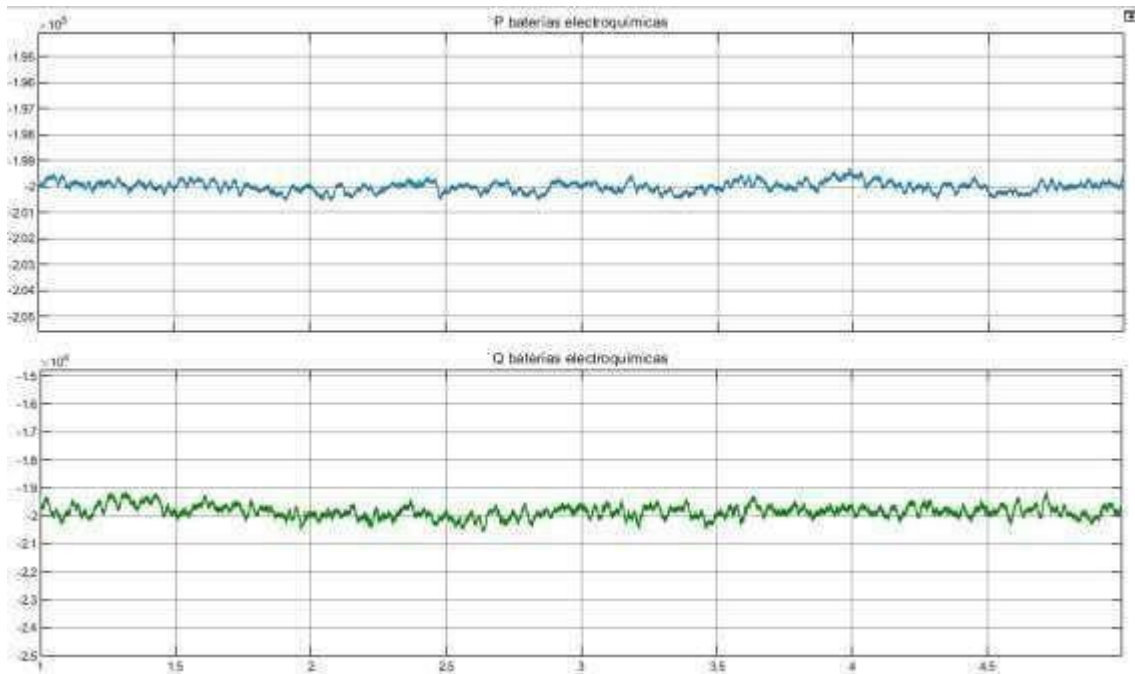
**Gráfica 14-3.** Baterías electroquímicas: resultados de tensión y corriente de red.

Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 15-3.** Baterías electroquímicas: resultados de potencias de almacenamiento. Aporte de energía.

Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 16-3.** Baterías electroquímicas: resultados de potencias de almacenamiento.

Almacenamiento de energía.

Realizado por: Luna G. 2021

### 3.4. Resultados del modelo de la Microrred conectada a la red

Al incorporar todos los elementos de la MR se realizó cuatro pruebas al modelo final para verificar su funcionamiento citadas en el CAPÍTULO II. Para cada prueba se analizó la eficiencia energética, tanto en el balance energético entre los elementos de la microrred como la verificación del cumplimiento de la demanda energética.

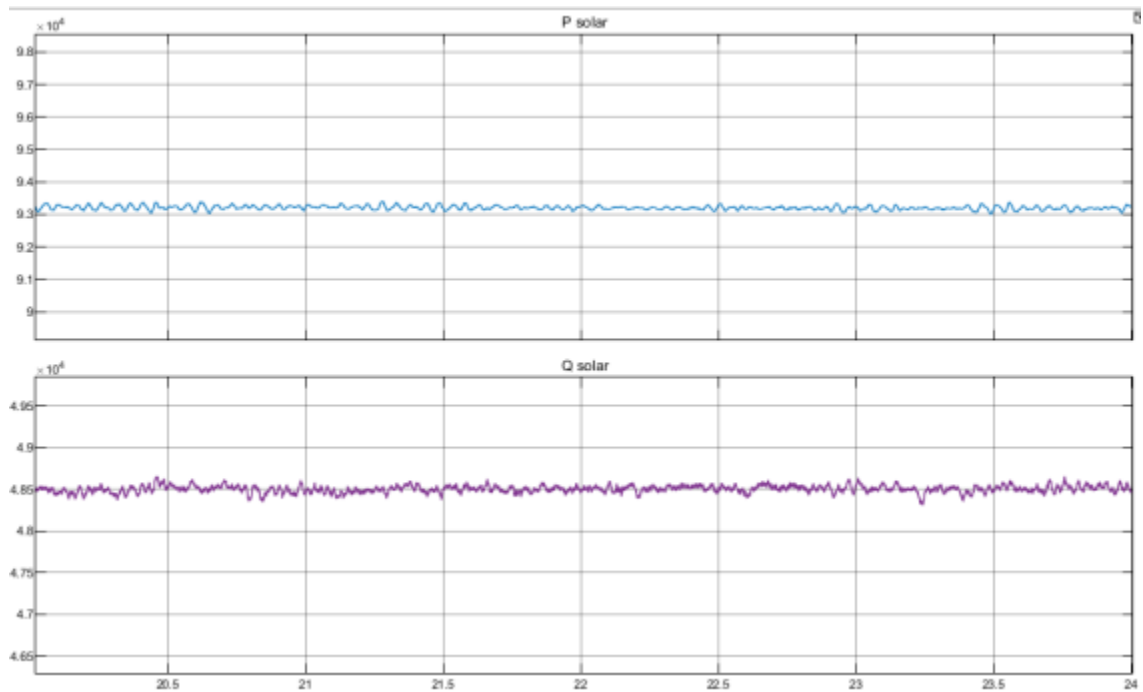
#### 3.4.1. Prueba 1: producción es menor al consumo y la microrred consume energía de la red.

Se produce esta situación cuando los paneles solares no cuentan con el recurso primario (energía solar) o es muy escaso para la generación. Tomando en cuenta lo escrito se realizó la simulación bajo los parámetros de irradiancia de 500 W/m<sup>2</sup> y a una temperatura de 45 °C.

Como no se quiere realizar el almacenamiento por parte de las baterías, una unidad de control podría desactivar el aporte energético de las baterías con la intención de consumir de la red la energía excedente. Así se puede ver el balance del resto de elementos.

En la Gráfica 17-3 se muestran los resultados para la generación solar, se puede observar que aporta 93 kW de los 200 kW que pueden generar las cinco matrices solares en condiciones óptimas. No se pierde demasiada generación debido al control MPPT. Además, aporta también 48.5 kVAr a la red.

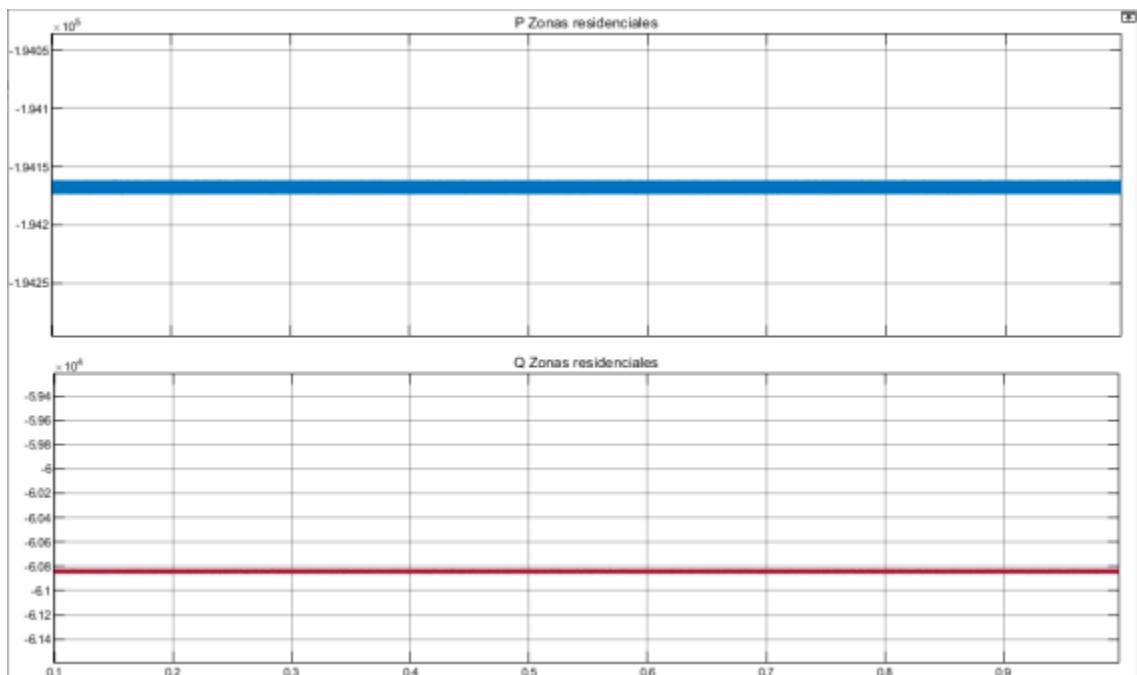




**Gráfica 17-3.** Potencia activa y reactiva entregadas por la generación solar.

Realizado por: Luna G. 2021

En la Gráfica 18-3, se representa el consumo de la carga mostrando un valor de 194.2 kW de potencia activa de los 200 kW y 60.8 kVAr de potencia reactiva conectada a la MR, ajustándose de forma muy precisa a los valores diseñados, aunque existe algunas ligeras variaciones.

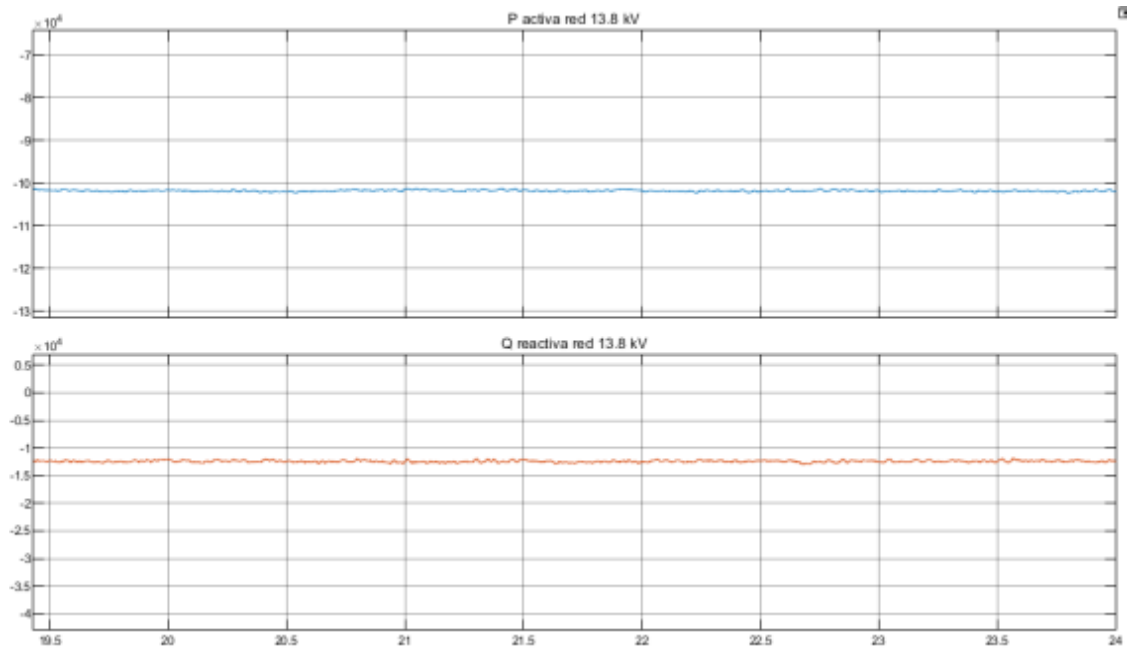


**Gráfica 18-3.** Potencia activa y reactiva consumida por la carga residencial.

Realizado por: Luna G. 2021



En cuanto a la red aporta 101.2 kW de potencia activa y 12.3 kVAr de potencia reactiva, debido al balance total entre generación y consumo, la red debe aportar en la MR la diferencia entre la generación renovable y las cargas.



**Gráfica 19-3.** Potencia activa y potencia reactiva entregadas por la red.

Realizado por: Luna G. 2021

Además, se verifica en la Tabla 1-3 que cumple con el balance de potencia energético para la prueba 1; se observa que la MR no abastece toda la demanda por parte de la carga.

**Tabla 1-3:** Balance de potencia para MR conectada a red prueba 1

ELEMENTO	POTENCIA ACTIVA (kW)	POTENCIA REACTIVA (kVAr)
Paneles solares	93	48.5
Zona residencial	194.2	60.8
Baterías electroquímicas	0 (sin utilizar)	0 (sin utilizar)
Red de distribución	101.2	12.3

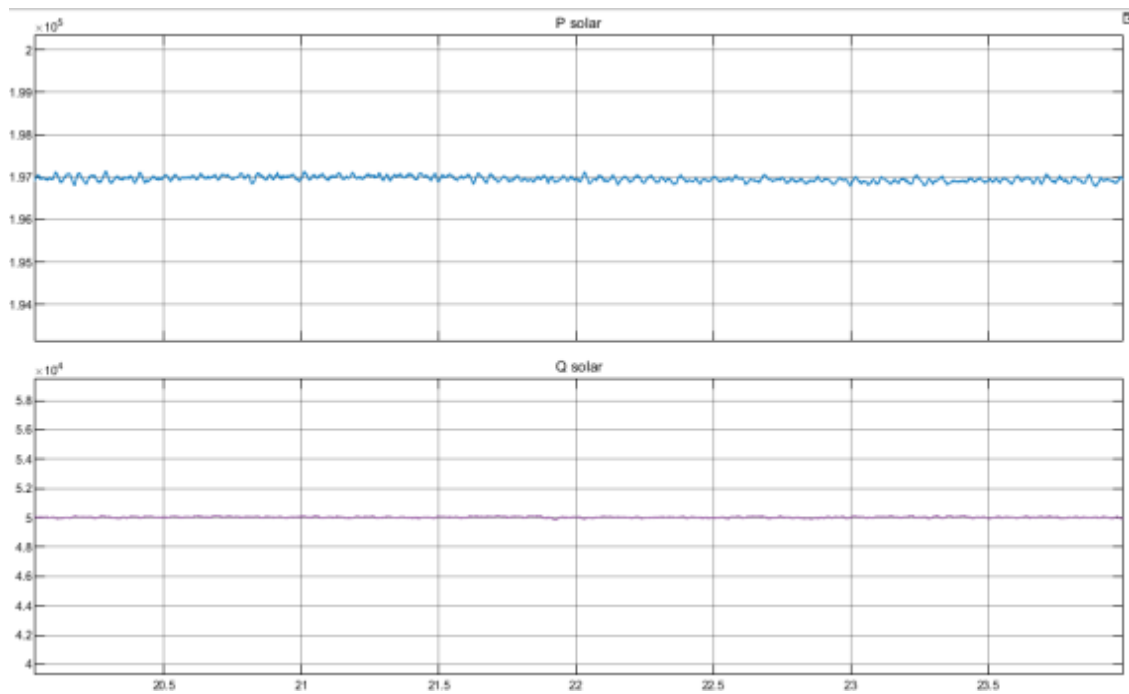
Realizado por: Luna, G. 2021

### 3.4.2. Prueba 2: producción es mayor al consumo y la microrred vende energía a la red.

Se produce esta situación cuando los paneles solares cuentan con la máxima presencia del recurso primario (energía solar) para una máxima generación. Tomando en cuenta esto se realizó la simulación bajo los parámetros de irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup> y a una temperatura de 25°C.

Como no se quiere utilizar el almacenamiento por parte de las baterías, una unidad de control podría desactivar dicha función de las baterías con la intención de vender a la red la energía excedente.

En la Gráfica 20-3 se muestran los resultados para la generación solar, se observa que aporta con 197 kW de potencia activa, siendo el resultado correcto para las condiciones óptimas. Además, aporta con 50 kVAr de potencia reactiva a la red.



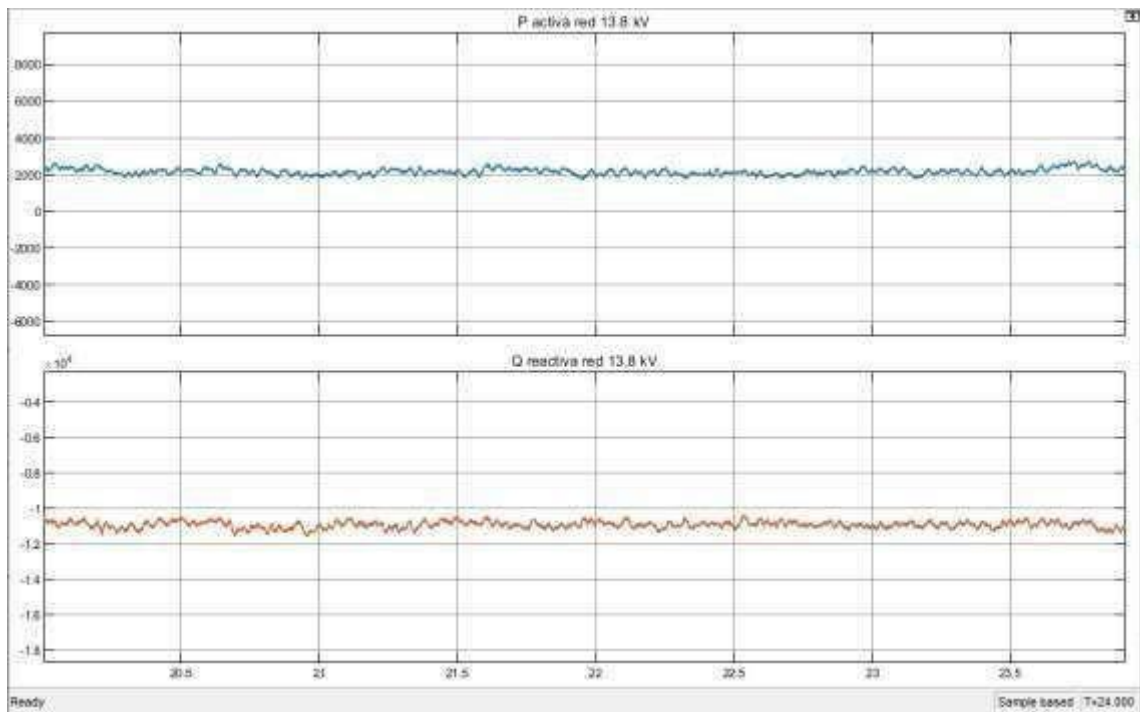
**Gráfica 20-3.** Potencia activa y potencia reactiva entregadas por la generación solar.

Realizado por: Luna G. 2021

El consumo de la carga se corresponde con el de la Gráfica 18-3 ya que es la misma.

En la Gráfica 21-3 se observa que la producción supera al consumo, pues se produjo una generación de 197 kW y la carga consume 194.2 kW; por lo que se inyecta el excedente a la red, concretamente se vende 2.8 kW de potencia a la red, se sabe que vende energía a la red porque es un valor positivo.

Para la señal de potencia reactiva se puede observar que consume de la red, puesto que el consumo supera la generación como es lo habitual en las redes eléctricas siendo 50 kVAr generados por los paneles mientras que el consumo por parte de las cargas es de 61 kVAr. Por lo tanto, se consume de la red 11 kVAr, cumpliendo con el balance de reactiva.



**Gráfica 21-3.** Potencia activa y potencia reactiva vendidas a la red.

Realizado por: Luna G. 2021

Por último, en la Tabla 2-3, se verifica que cumple con el balance de potencia para la prueba 2, observándose además que la producción generada por parte de los paneles abastece toda la demanda por parte de la carga y el excedente es vendida a la red de distribución.

**Tabla 2-3:** Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 2.

ELEMENTO	POTENCIA ACTIVA (kW)	POTENCIA REACTIVA (kVar)
Paneles solares	197	50
Zona residencial	194.2	61
Baterías electroquímicas	0 (sin utilizar)	0 (sin utilizar)
Red de distribución	2.8 (venta)	11 (consumo)

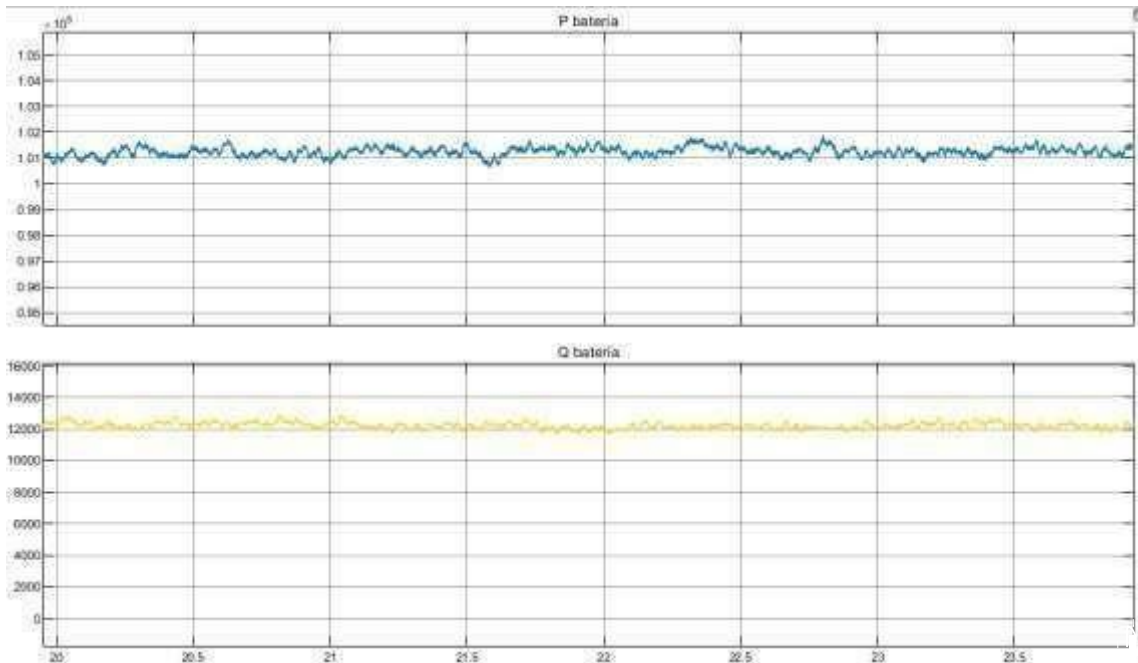
Realizado por: Luna, G. 2021

### 3.4.3. Prueba 3: producción es menor al consumo y la diferencia es suministrada por las baterías.

Para esta prueba se utilizó los mismos parámetros que para 3.4.1. Prueba 1: la producción es menor al consumo y la MR consume energía de la red. Se comparó únicamente los resultados de la batería y la red ya que se mantuvieron los mismos valores de generación renovable y la del consumo.

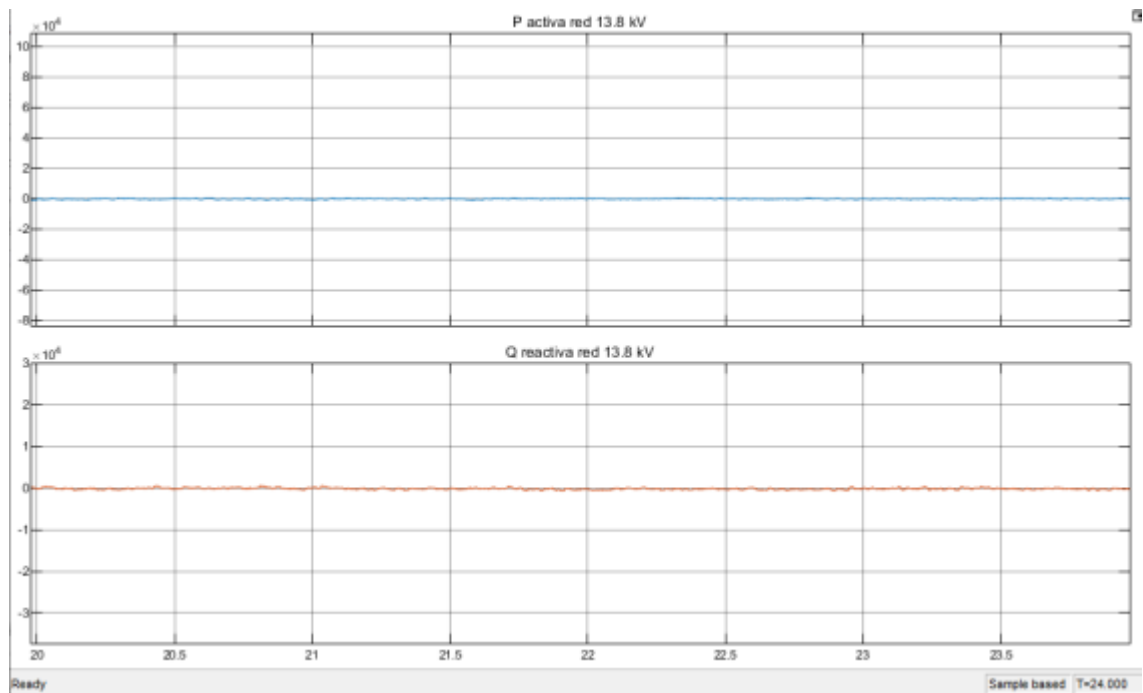
Como no se quiere consumir de la red, ya que la prueba se encuentra en una situación de compra elevado, el control de la batería se ajusta a la referencia para el control del inversor, así

la batería tendrá que aportar la diferencia consumida. Al observar en la Gráfica 22-3 se indica que la batería aporta con 101.2 kW de potencia activa y 12.3 kVAr para la reactiva y por ende la red no consume como se muestra en la Gráfica 23-3.



**Gráfica 22-3.** Potencia activa y potencia reactiva aportadas por la batería de almacenamiento.

Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 23-3.** Consumo nulo de activa y reactiva de la red.

Realizado por: Luna G. 2021

En la Tabla 3-3, se muestra que cumple con el balance de potencias para dicha prueba, donde la carga es abastecida por parte de los paneles y las baterías cumpliendo con la demanda energética.

**Tabla 3-3:** Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 3.

ELEMENTO	POTENCIA ACTIVA (kW)	POTENCIA REACTIVA (kVAr)
Paneles solares	93	48,5
Zona residencial	194.2	60,8
Baterías electroquímicas	101.2 (suministro)	12.3 (suministro)
Red de distribución	0	0

Realizado por: Luna, G. 2021

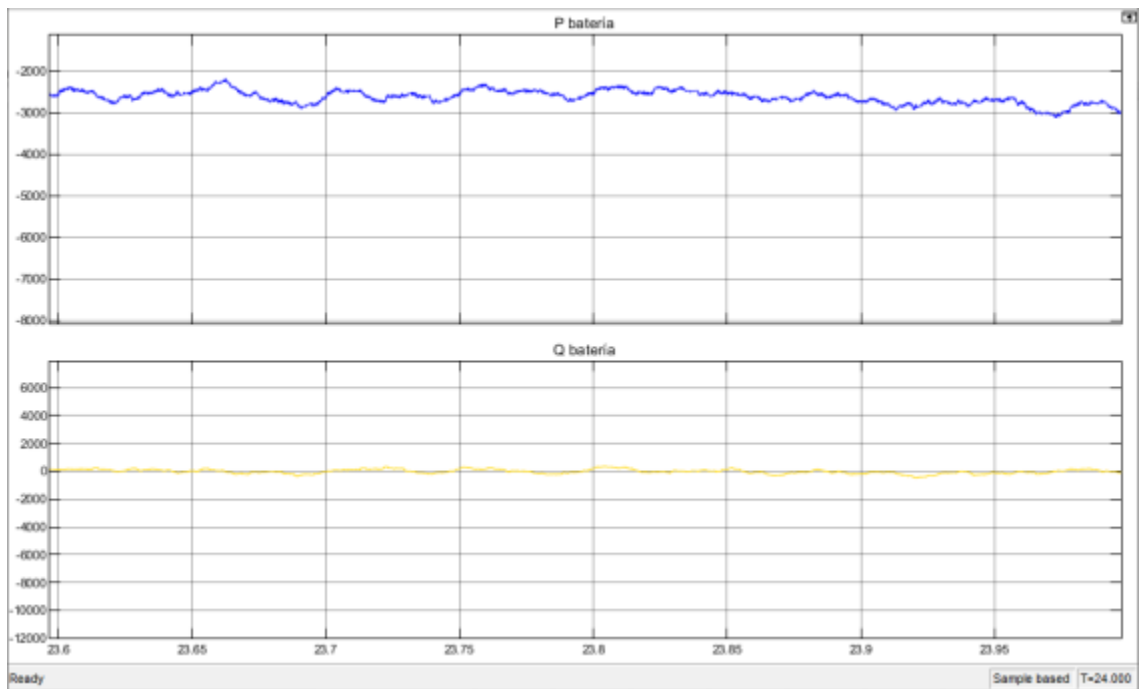
#### 3.4.4. Prueba 4: producción es mayor al consumo y la diferencia es acumulada por las baterías.

Ya que como la anterior prueba se utilizó los mismos parámetros para la prueba 1, en esta prueba en cambio se utilizó los mismos parámetros usados en la prueba 2: la producción es mayor al consumo y la MR vende energía a la red. Igualmente, solo se compara los resultados de la batería y la red.

Para esta prueba como no se quiere vender energía a la red, es decir no se inyecta potencia a la red, ya que la microrred se encuentra en una situación donde el precio de venta es muy bajo y no sería rentable, se almacena la producción excedente en las baterías, para ser utilizada posteriormente o bien para venderla a la red cuando el precio de venta sea superior.

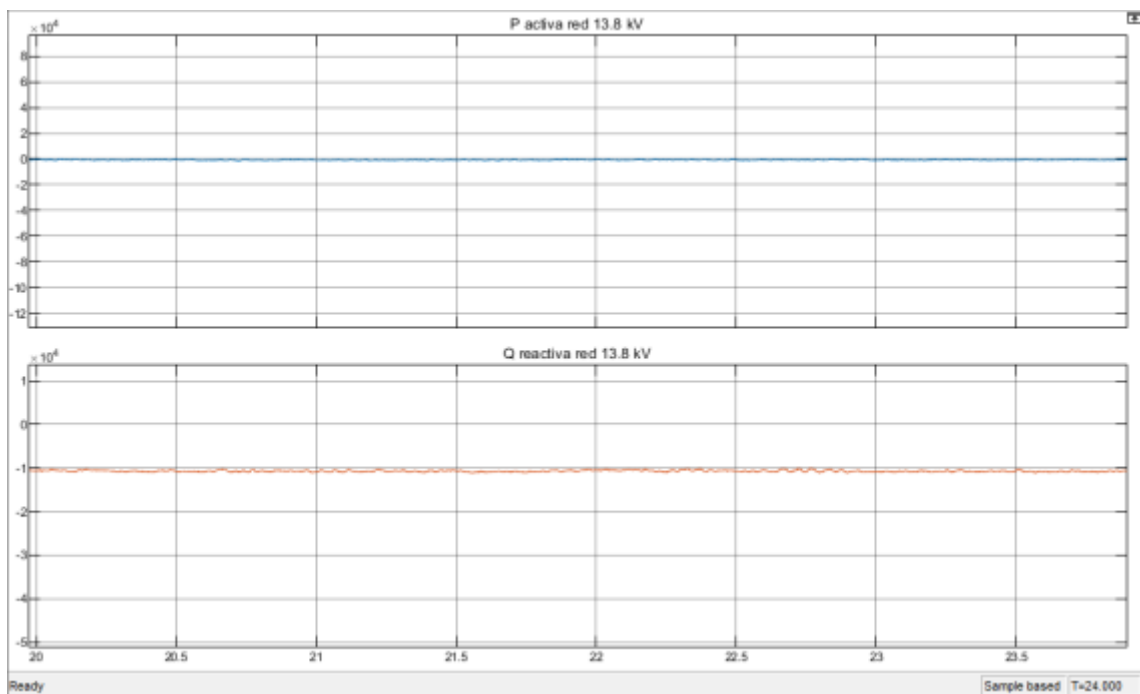
No se realizó el almacenamiento de la potencia reactiva por parte de las baterías debido a que se consume potencia reactiva de la red. Pero, por otro lado, en el caso de que exista una mayor generación renovable y se tenga un exceso de reactiva, el almacenamiento de reactiva en la batería se haría de forma análoga al de la potencia activa y podría utilizarse bajo las mismas condiciones.

En la Gráfica 24-3 se observa que la batería acumula los 2.8 kW excedentes de la producción por parte de los paneles solares, mientras que en la Gráfica 25-3 se observa que no existe la venta de energía de la potencia activa a la red.



**Gráfica 24-3.** Potencia activa almacenada en las baterías electroquímicas (sin almacenamiento de reactiva).

Realizado por: Luna G. 2021



**Gráfica 25-3.** Venta nula de potencia activa a la red y consumo de reactiva.

Realizado por: Luna G. 2021

Por último, en la Tabla 4-3, se muestra que cumple con el balance de potencia para la prueba 4, se observa además que los paneles abastecen la demanda por parte de la carga mientras que el excedente generado es almacenado en las baterías.

**Tabla 4-3:** Balance de potencia para MR conectada a red fuerte prueba 4.

<b>ELEMENTO</b>	<b>POTENCIA ACTIVA (kW)</b>	<b>POTENCIA REACTIVA (kVAr)</b>
<b>Paneles solares</b>	197	50
<b>Zona residencial</b>	194.2	60.8
<b>Baterías electroquímicas</b>	2.8 (almacenamiento)	0 (sin utilizar)
<b>Red de distribución</b>	0	10.8 (consumo)

Realizado por: Luna, G. 2021

Para cada prueba realizada, el beneficiado será tanto el consumidor final en su pago visualizada en su factura como el distribuidor al reducir sus costos de operación. Además de que ayudará a reducir la emisión de los elementos nocivos como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos incombustos, material particulado, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (N<sub>2</sub>O).

## CONCLUSIONES

- Se pudo realizar el modelado de una MR conectada a una red que integre todos sus elementos, y en base a los resultados obtenidos resulta ser un método eficaz para la gestión de la energía.
- Se ha conseguido crear un sistema en un entorno residencial con opción de almacenamiento que puede adaptarse a las necesidades de consumo y producción.
- Con los resultados obtenidos del control por corriente por parte del inversor ya sea para las baterías electroquímicas o los paneles solares funcionan correctamente.
- Se cumplió con cada uno de los objetivos definidos en este documento. Partiendo con el análisis de la arquitectura eléctrica y funcionamiento de las microrredes, seguido del análisis del funcionamiento de un sistema fotovoltaico con almacenamiento en banco de baterías basadas en la tecnología de ión-litio con su respectivo dimensionamiento, para poder modelar la MR con todos sus elementos con su respectivo control mediante la electrónica de potencia para finalmente validarlo mediante simulación en Simulink.
- Se ha adquirido más conocimientos acerca de las formas de energía alternativas, en la asignatura de Electrónica de Potencia y del uso de la herramienta Matlab Simulink.



## RECOMENDACIONES

- Desarrollar un control de la batería de forma autónoma, que pudiera tomar las decisiones de carga y descarga en función del estado de la red, lo que se acercaría un paso más al desarrollo de una Red Inteligente.
- Implementar otros Algoritmos más eficientes para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), como el algoritmo de conductancia incremental o el de tensión de circuito abierto fraccional.
- Incorporar más elementos de carga como una carga industrial, o un vehículo eléctrico, además de incorporar otra fuente renovable como la eólica.
- Una línea futura de investigación sería acoplar en la red de distribución un fallo además de incorporar un breaker al modelo de la MR para que en ese instante sea capaz de desconectarse y volverse a conectar.
- Adaptar el funcionamiento de la MR en base a la previsión de los precios, reduciendo el consumo en las horas punta donde la electricidad es más cara para aprovechar más las horas valle; es decir cuando se produzca un menor consumo.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALFAJARRÍN GARCÍA, Felix Ramón.** Instructivo Metodológico para la utilización del software Power Factory [En línea] (Tesis). (Pregrado) Instituto Superior Minero Metalúrgico, Facultad Metalurgia y Electromecánica. (Moa-Holguín). 2016. pp. 3. [Consulta: 2020-12-05]. Disponible en:

<http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1877/AlfajarrinGarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**ÁLVARO HERMANA, R & MENÉNDEZ SÁNCHEZ, J.** “Casos de Microrredes”. Orkestra [en línea], 2020, (España) 1(73), pp. 2-3. [Consulta: 06 diciembre 2020]. ISSN 2340-7638. Disponible en:

[https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/200028\\_Casos\\_Microrredes.pdf?=&v](https://www.orkestra.deusto.es/images/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/200028_Casos_Microrredes.pdf?=&v)

**ARACIL, Javier & GÓMEZ-ESTERN, Fabio.** “Introducción a Matlab y Simulink”. Informe Inédito, 2006-2007. pp. 1-3. [Consulta: 13 diciembre 2020].

Disponible en: [http://www.esi2.us.es/~fabio/apuntes\\_matlab.pdf](http://www.esi2.us.es/~fabio/apuntes_matlab.pdf)

**BARBA NARANJO, David Fernando & RON SÁNCHEZ, Andrés David.** Construcción e implementación del sistema de control vectorial de orientación de campo directo (DFOC) para un motor trifásico de inducción. [En línea] (Trabajo de Titulación). (Pregrado) Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. (Quito-Ecuador). 2012. pp. 18. [Consulta: 2020-12-21]. Disponible en:

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4592/1/CD-4214.pdf>

**BERTUA RÍOS, Facundo.** Análisis y selección de un sistema de energía renovable híbrido en la zona de Valencia utilizando el proceso analítico jerárquico (AHP). [En línea] (Trabajo de Fin de Grado). (Pregrado) Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia. (Valencia-España). 2016-2017. pp. 13. [Consulta: 2020-11-26]. Disponible en:

[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83965/29211137X\\_TFG%20%282%29\\_14972555816782926409706516152124.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83965/29211137X_TFG%20%282%29_14972555816782926409706516152124.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

**BID.** *Ecuador electrificará a familias de zonas rurales y aisladas usando energía renovable* [Comunicado de Prensa]. 17 de Diciembre 2013. [Consulta: 23 Noviembre 2020].

Disponible en: <https://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2013-12-17/ecuador-utilizaran-energia-solar%2C10664.html>

**Cambio Energético.** *Baterías de litio para energía solar, comparativa de baterías BYD, LG, AXITEC y CEGAXA* [blog]. 24 de Julio 2018. [Consulta: 21 Diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.cambioenergetico.com/blog/baterias-de-litio-en-bajo-voltaje-y-alto-voltaje/>.

**CCAMA POLANCO, Carlos Alberto.** Análisis y aplicación de la técnica de modulación por anchura de pulsos aplicado al inversor fotovoltaico como solución al efecto de distorsión total armónica en la mejora de la eficiencia energética [En línea] (Tesis). (Pregrado) Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica. (Puno-Perú). 2018. pp. 47. [Consulta: 2020-12-21]. Disponible en:

[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9401/Ccama\\_Polanco\\_Carlos\\_Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9401/Ccama_Polanco_Carlos_Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**CEREZO ROMÁN, Jesús.** Evaluación de recursos energéticos en TRNSYS [En línea] (Trabajo de Titulación). (Posgrado) Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencia Aplicadas. (Cuernavaca-México). 2018. pp. 44. [Consulta: 2020-12-04]. Disponible en: <http://www2.ciicap.uaem.mx/rs/archivos/2018/RRE/TRNSYS.pdf>

**CHICA GALLARDO, Andrea Priscila & GUAMÁN ARGUDO, Juan Andrés.** Modelo de estado estacionario de la Microrred del Laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca [En línea] (Trabajo de Titulación). (Pregrado) Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. (Cuenca-Ecuador). 2017. pp. 50. [Consulta: 2020-12-20]. Disponible en: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28606/1/Trabajo%20de%20Titulaci3n.pdf>

**RODRÍGUEZ RAMIRO, Francisco José.** Esquema de Control. En: *Comparativa convertidores HVDC-VSC*. 12 de Septiembre de 2011. (Sevilla-España), [En línea]. pp. 50-67. [Consulta: 2020-12-21]. Disponible en:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/40062/fichero/CAPITULOS%252F12.-+ESQUEMA+DE+CONTROL.pdf>

**VARGAS , J & NAVIA, G.** “Desarrollo de un sistema de control para la captura y medición experimental de la eficiencia y curva característica I-V en tiempo real de un sistema fotovoltaico utilizando Labview® y Arduino”. SciELO [en línea], 2015, (Bolivia) 1(15), pp. 49-64. [Consulta: 2020-12-18]. ISSN 2518-4431. Disponible en:

[http://www.scielo.org.bo/pdf/riyd/v1n15/v1n15\\_a06.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/riyd/v1n15/v1n15_a06.pdf)

**DIRECCIÓN NACIONAL DE REGULACIÓN TÉCNICA.** *Proyecto de regulación: Marco Normativo para la participación de la Generación Distribuida.* [En línea] [Consulta: 2020-11-24]. pp. 12. Disponible en: [https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/04/21\\_Inf-Sust-Reg-Gen-Distrib\\_V6\\_Dir.pdf](https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/04/21_Inf-Sust-Reg-Gen-Distrib_V6_Dir.pdf)

**ECODIRECT.** *Sanyo HIP-190DA3 > 190 Watt Solar Panel* [En línea][Consulta: 2020-12-28]. Disponible en: <https://www.ecodirect.com/Sanyo-HIP-190DA3-190-Watt-40-Volt-p/sanyo-hip-190da3.htm>.

**FUSION ENERGÍA SOLAR.** *Batería de Litio BYD B-BOX H 10.2 kW* [En línea][Consulta: 2020-12-13]. Disponible en: <https://fusionenergiasolar.es/baterias-solares-de-litio/676-bateria-de-litio-byd-b-box-h-102-kw.html>

**GUAMÁN SÁNCHEZ, Cristian Fernando.** *Diseño de una Microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de conseción de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (Trabajo de Titulación).* (Maestría) Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia. (Valencia-España). 2017. pp. 14-16. [Consulta: 2020-12-14]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83964/P030153316\\_TFM\\_14867660672271275997430684805011.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83964/P030153316_TFM_14867660672271275997430684805011.pdf?sequence=2)

**HERRERO DE LUCAS, L; & MARTÍNEZ RODRIGO, F.** “Control del STATCOM”. *Energies* [En línea], 2017, (España) 10 (1709), pp. 1-26. [Consulta: 2020-12-15]. ISSN 1011-1709. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1709>

**HERRERO DE LUCAS, L; & MARTÍNEZ RODRIGO, F.** *Control vectorial de corriente de un inversor conectado a red.* España. Oficina Española de Patentes y Marcas. 2 616 274. 2017-06-12. [Consulta: 2020-12-15]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/56/f5/33/be473fd85bfd11/ES2616274A1.pdf>

**HP.** Support Assistant, 2018.

**ITSENERGIASOLAR.** *Battery-Box HV – ITS Energía Solar* [En línea][Consulta: 13 de Diciembre de 2020]. Disponible en: <https://itsenergiasolar.es/wp-content/uploads/2019/12/Ficha-t%C3%A9cnica-BYD.pdf>.

**LACUEVA, Antonio.** Capítulo 4: Convertidores CC/CC directos. 2011. pp. 3. [En línea] [Consulta: 2020-12-21]. Disponible en: <https://antoniolacueva.files.wordpress.com/2011/01/tema-4-ep-v1.pdf>

**LEAL FERNÁNDEZ, Raquel.** Smart Grid para integración de generación renovable y almacenamiento en un entorno industrial (Tesis). (Pregrado) Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática. (Valladolid-España). 2018. pp. 16-17; 72-74; 82-91. [Consulta: 2020-12-21]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31197>

**MÁRTIL, Ignacio.** *Funcionamiento de una batería de ion – litio* [blog]. [Consulta: 21 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras/>.

**MÁRTIL, Ignacio.** La energía solar fotovoltaica, en la vanguardia frente al cambio climático [blog]. [Consulta: 15 diciembre 2020]. Disponible en: <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2015/11/30/la-energia-solar-fotovoltaica-en-la-vanguardia-frente-al-cambio-climatico/>.

**MARTÍNEZ RODRIGO, F; RAMIREZ, D; REY-BOUE, A; SANTIAGO DE PABLO & HERRERO DE LUCAS, L. C.** “Voltage Modulators for Modular Multilevel Converters in HVDC Transmission”. *Energies* [En línea], 2017, (España) 10 (11), pp. 1-26. [Consulta: 20 diciembre 2020]. ISSN 1011-1709. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1709>

**MATHWORKS.** *if, elseif, else* [En línea] [Consulta: 30 diciembre 2020]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/if.html#:~:text=Descripción,-ejemplo&text=if%20expression%20%2C%20statements%20%2C%20end%20evalúa,contrario%2C%20la%20expresión%20es%20falsa..>

**MATHWORKS.** *Persistent* [En línea] [Consulta: 30 diciembre 2020]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/persistent.html>

**MEDINA, Ricardo David.** “MICRORREDES BASADAS EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA: CARACTERÍSTICAS, OPERACIÓN Y ESTABILIDAD”. *INGENIUS* [En línea], 2014, (Ecuador) (12), pp. 15-23. [Consulta: 23 noviembre 2020]. ISSN: 1390-650X. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/276465445\\_Microrredes\\_basadas\\_en\\_Electronica\\_de\\_Potencia\\_Caracteristicas\\_Operacion\\_y\\_Estabilidad](https://www.researchgate.net/publication/276465445_Microrredes_basadas_en_Electronica_de_Potencia_Caracteristicas_Operacion_y_Estabilidad)

**MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA.** *NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN NEC-11 CAPITULO 14 ENERGÍAS RENOVABLES* [En línea], 2011, (Quito-Ecuador), pp. 38-59. [Consulta: 11 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-14-energic3adas-renovables-021412.pdf>

**MOSQUERA TELLO, Pablo Miguel.** Operación confiable de una Microrred aislada con generador principal diesel, aplicando un sistema de control difuso en el deslastre de sus cargas [En línea] (Tesis). (Posgrado) Universidad Politécnica Salesiana Ecuador. (Cuenca-Ecuador). 2014. pp. 14-15. [Consulta: 2020-11-25]. Disponible en:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7290/1/UPS-CT004221.pdf>

**ORIO, Planas.** *Efecto fotovoltaico* [En línea][Consulta: 13 diciembre 2020]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/efecto-fotovoltaico>.

**PÉREZ FERNANDEZ, Pablo.** Descripción e infraestructura de una Microrred para un entorno residencial [En línea] (Tesis). (Pregrado) Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales. (Valladolid-España). 2017. pág. 13. [Consulta: 2020-11-24]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24085/TFG-P-558.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**PILCO VALLADOLID, Franklin Medardo.** Análisis y modelado de baterías de Ion Litiopara vehículos eléctricos [En línea] (Trabajo de Titulación). (Pregrado) Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. (Cuenca-Ecuador). 2018. pp. 35. [Consulta: 2020-12-20]. Disponible en:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30316/1/Trabajo%20de%20titulación.pdf>

**RENOVAENERGIA.** Sistemas Solares Fotovoltaicos Conectados o de Conexión a Red Pública. [En línea] [Consulta: 16 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://www.renova-energia.com/energia-renovable/energia-solar-fotovoltaica-conexion-de-red/#:~:text=En%20resumen%20un%20sistemas%20solar.conexi%C3%B3n%20de%20red%20en%20corriente>.

**SANANGO FERNÁNDEZ, Juan Bautista.** Desarrollo de un algoritmo de interrelación para Microredes de distribución eléctrica [En línea] (Tesis). (Posgrado) Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica. (Cuenca-Ecuador). 2015. pp. 37-38. [Consulta: 2020-12-05]. Disponible en:

<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22762/1/TESIS%20DESARROLLO%20DE%20UN%20ALGORITMO%20DE%20INTERRELACIÓN%20PARA%20MICROREDES%20DE%20DISTRIBUCIÓN%20ELÉCTRICA.pdf>

**SANTILLÁN TITUAÑA, Alberto.** Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos [En línea] (Tesis). (Posgrado) Universidad de Barcelona. (Barcelona-España). 2015-2016. pp. 5-6. [Consulta: 2020-12-24]. Disponible en:

[http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/101966/1/TFM\\_MERSE\\_Alberto%20Santillán.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/101966/1/TFM_MERSE_Alberto%20Santillán.pdf)

**SDE.** *Tipos de Celdas Solares* [En línea] [Consulta: 18 diciembre 2020]. Disponible en:

<http://www.sde.mx/tipos-de-celdas-solares/>.

**SELECTRA.** *Tier 1 de placas solares: mejores fabricantes de paneles solares* [En línea]

[Consulta: 18 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://selectra.es/autoconsumo/info/componentes/placas-solares/tier1>.

**SUNFIELDS.** *Boletín Solar Fotovoltaica Autónoma SunFields Europe* [En línea] [Consulta: 21 diciembre 2020]. Disponible en: [https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/08/Sunfields\\_Manual-Calculo\\_Fotovoltaica\\_Autonomas.pdf](https://www.sfe-solar.com/wp-content/uploads/2011/08/Sunfields_Manual-Calculo_Fotovoltaica_Autonomas.pdf)

**VILLA ENDARA, Víctor Alfonso.** Óptima gestión y regulación de voltaje en Microredes de distribución con generación distribuida y almacenamiento de energía [En línea] (Trabajo de Titulación). (Pregrado) Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Escuela Ingeniería Eléctrica. (Quito-Ecuador). 2017. pp. 19. [Consulta: 2020-12-28]. Disponible en:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14360/4/UPS-KT01399.pdf>

**YUMPU.** *Bifacial Photovoltaic Module* [En línea] [Consulta: 13 diciembre 2020]. Disponible en:

<https://www.yumpu.com/en/document/read/39434613/bifacial-photovoltaic-module>.

# ANEXOS

## Anexo A. Ficha técnica de Panel Solar Sanyo de Panasonic Grupo HIP-190DA3.



**Sanyo HP-190DA3 • 190 Watt Solar Panel**

**Warranty:** 25 Years  
**Components:** 25 Years  
**Availability:** This product has been discontinued

Connectors: MC4

**Reference:**

**Sanyo 190 Watt HIT DOUBLE Solar Panel**

Model	HP-190DA3
Series	HIT Double
Manufacturer	Sanyo / Panasonic

**Material:**

Type	Monocr.
Dimensions	62.2" x 16.39" x 1.38"
Weight	69.7 lbs
Connector	MC4

**Technical:**

Cells (PTC)	144cells
Cells (STC)	
Max Power Voltage (VMP)	32.2 V
Max Power Current (AMP)	5.91 A
Open Circuit Voltage (VOC)	38.1 V
Short Circuit Current (SCC)	5.7 A
Max System Voltage	500VDC

**Warranty**

- 2 years performance
- 25 years power output

**IMPORTANT**

HIT Double bifacial solar panels' Rated Power (Pmax) is measured at Standard Test Conditions (STC). STC does not include power produced from the bifacial effect of the panels. Bifacial panels may produce up to 100% of their STC rating, dependent upon installation design and location (tilt, the site's reflectivity, etc.). Use caution when selection, calculation and sizing system components to account for the increase in power.

**Technical Information**

Capable of generating electricity from the sun which is an abundant, clean source of energy, photovoltaic power generation has recently attracted a great deal of attention. As a pioneer in photovoltaic power-generating systems, Sanyo has consistently taken the lead in research and development. Sanyo is dedicated to contributing towards more sustainable living for all, and to providing convenience with the global environment.

More than 30 years of experience in solar technology has earned Sanyo a reputation for reliability among customers.

- Power that just adds value: these panels (not for conventional uses such as storage and stations)
- More power produced at higher temperatures than the competition
- Ultra-high efficiency to maximize what space you have

**Reference Technology**

SANYO HIT (hetero-junction with intrinsic thin layer) solar cells are hybrids of single crystalline silicon surrounded by ultrathin amorphous silicon layers.

**Thin but Not Just Thin**

The back side of a SANYO HIT Double solar panel generates electricity from ambient light that has passed through the panel or is reflected off surrounding surfaces, while the front side captures structurally, which results in higher power generation compared to standard single-sided HIT panels at any angle and direction.

**Temperature Advantage**

As temperature rises, SANYO HIT Double solar panels produce more electricity than conventional crystalline silicon solar panels at the same temperature, because of their low temperature coefficient.

**High Efficiency**

SANYO HIT Double solar maximize power within a fixed amount of space. Depending on your installation design and location's albedo, HIT Double solar panels can capture additional back side ambient light, increasing system performance. These powerful panels are ideal for grid-connected solar systems, areas with performance-based incentives, and renewable energy credits.

**Ultra-Maximum**

SANYO HIT Double solar panels have a double glass structure that enhances aesthetics and allows brilliant light and shadow to shine through the panels. The panels have a silver anodized aluminum, double-walled frame for extra strength. The panels come pre-equipped with a built-in cable junction box, rear wires, MC plug-in type connectors, and unique tabs - all of which help to minimize support DOG, minimize labor, installation time and costs.

**Installable Features**

SANYO HIT Double solar panels have no moving parts and weigh less than 70 pounds. The panels come with a 25-Year Limited Power Output Warranty and a 2-Year Limited Product Performance Warranty. Panels are UL 1703 safety listed for wind, fire and high-Class A. Unique pre-package minimizes cardboard waste deposited in customer's trash.

**Quality & Safety**

SANYO silicon wafers are manufactured in the USA, and the panels are assembled in Mexico at an ISO 9001 and 14001 certified factory. All panels undergo rigorous testing to ensure strict compliance with electrical, mechanical, environmental, and visual criteria. SANYO's conservative model ratings guard your kWh per rated kW, and assist with accurate predictions of performance and economics.

**Installation Power**

1. Elevate panels above a surface as much as possible to allow reflected and ambient light beneath the panels.
2. Place panels over light-colored surfaces.
3. Do not allow support rails to shade the panels' back face.

**Application Possibilities**

- Architectural, Awnings, Balconies, Bus Shelters, Bicycles
- Cars & Pkws, Carports, Canopies, Carports, Facades
- Ferries, Fishing, Trailers, Tracking Systems, Vertical

## Anexo B. Ficha técnica de Batería de Litio BYD Battery-Box H 10.2.

### Battery-Box HV

La Battery-Box HV es la primera batería de alto voltaje con diseño flexible y modular sin cables internos. Una Battery-Box HV contiene de 5 a 9 módulos 8 Plus H 1.28 conectados en serie para alcanzar hasta 11.52 kWh de capacidad (8).

La posibilidad de conectar hasta un máximo de 5 Battery-Box HV permitirá alcanzar una capacidad de 57.6 kWh.



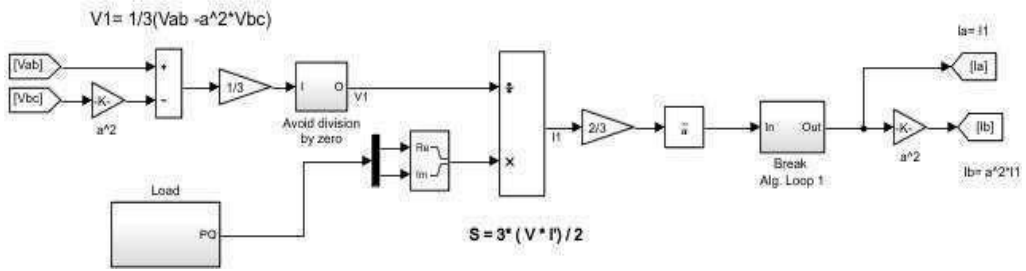
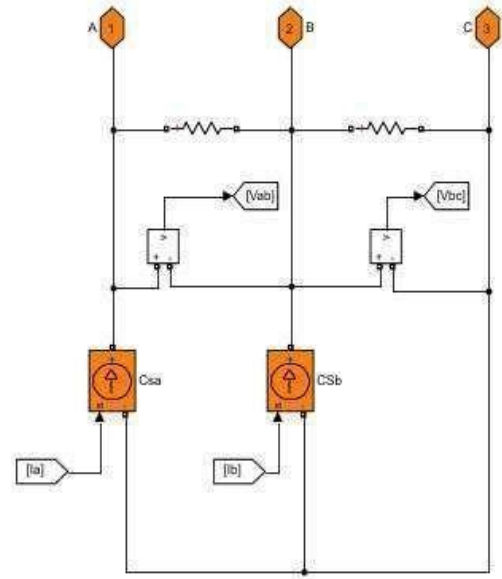
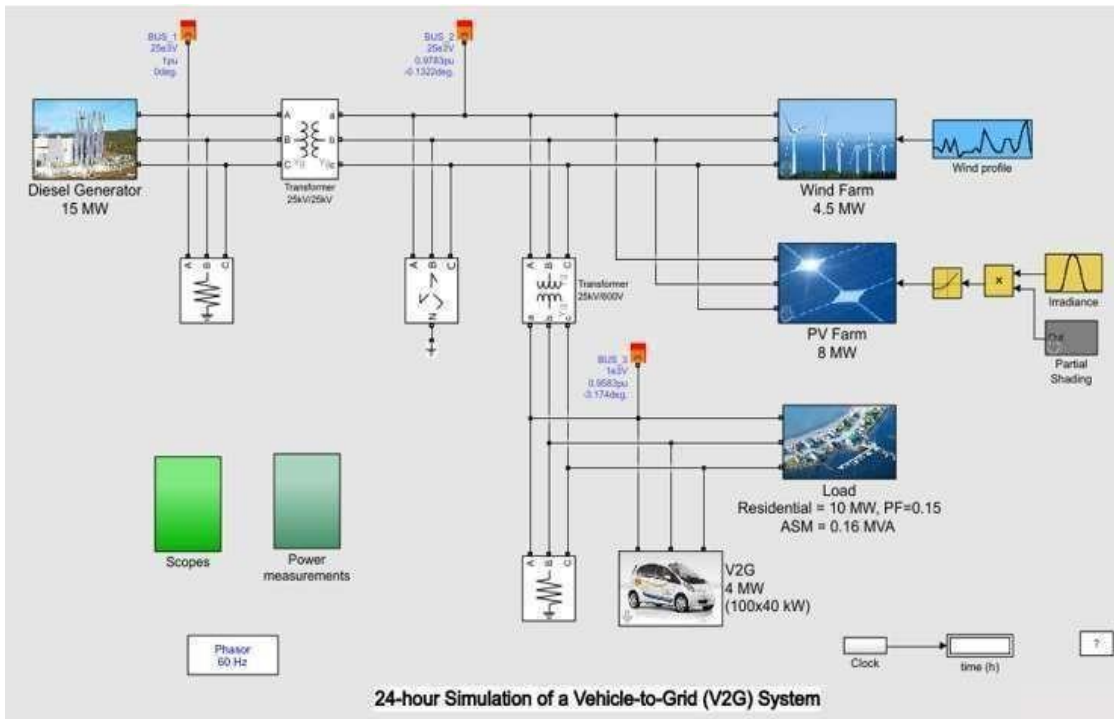


	Battery-Box H 1.28	Battery-Box H 1.28	Battery-Box H 1.28 (1,280Wh)	Battery-Box H 1.28	Battery-Box H 1.28
Módulos	5 módulos	6 módulos	7 módulos	8 módulos	9 módulos
Energía Disponible (kWh)	6,40 kWh	7,68 kWh	8,96 kWh	10,24 kWh	11,52 kWh
Potencia de Salida Máx.	6,40 kW	7,68 kW	8,96 kW	10,24 kW	11,52 kW
Potencia de Salida Pico	12,80 kW, 5 min	15,36 kW, 5 min	17,92 kW, 5 min	20,48 kW, 5 min	23,04 kW, 5 min
Autonomía Carga/Descarga			945,2 km/h		
Voltaje Nominal	328 V	337 V	346 V	355 V	364 V
Rango de Voltaje Operativo	200-382 V	240-330 V	280-300 V	320-41 V	360-100 V
Capacidad	164Ah / 1Ah				
Dimensiones (WxHxD)	380 x 398 x 280 mm	390 x 1014 x 330 mm	390 x 1134 x 380 mm	390 x 1254 x 380 mm	390 x 1374 x 380 mm
Peso	148 kg	174 kg	200 kg	226 kg	252 kg
Estado de Protección	IP54				
Gravidad	19,4kg/m				
Temperatura de Operación (C)	-10°C to +50°C				
Certificación	UL 1945 / FMVCS2119 / CE / IEC / UN38.3 / Sicherheitszertifikat Li-Ionen-Rechargeable				
Escalabilidad	Progresivamente				
Integración Compatibles	EMC (1) y pulso (2) / Kvasar / Protección (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)				
Aplicaciones	ON-Grid / ON-Grid + Backup (añadir la Lista de Configuración Maestra de BYD)				

(1) Combinación de los 100% DOD, SOC, carga y descarga +25 °C.  
 (2) -10 °C, reducción de potencia.

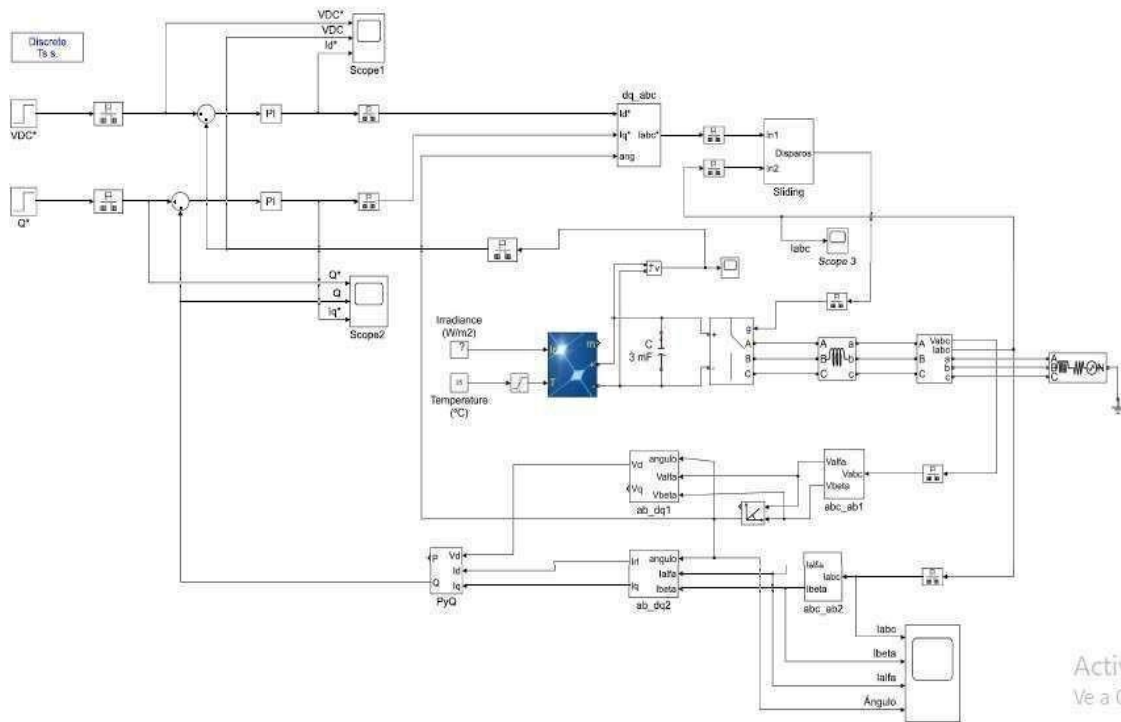


**Anexo C.** Modelo del ejemplo de Matlab: 24-hour Simulation of a Vehicle-to-Grid (V2G) System y el submodelo de la carga residencial.



## Anexo D. Control Corriente Paneles Solares.

Ubicación: Control del Inversor  
 Título: Control\_Corriente\_PanelSolar.slx



## Anexo E. Código del Algoritmo de Perturba y Observa.

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.

% D output = Reference for DC link voltage (Vdc_ref)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:|
Dinit = Param(1); %Initial value for Vdc_ref
Dmax = Param(2); %Maximum value for Vdc_ref
Dmin = Param(3); %Minimum value for Vdc_ref
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease Vdc_ref
%
```

```

persistent Vold Pold Dold:

dT      e = 'double':

if isempty(Vold)
    Vold=0:
    Pold=0:
    Dold=Dioit;
eod
P= VII:
dV= V - Vold:
dP= P - Pold;

:i fi dP -= 0 s Enabled -=0
    :i fi dP < D
        if dV < D
            D = Dold + deltaD:
        else
            D = Dold - deltaD:
        eod
    else
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD:
        else
            D = Dold + deltaD;
        eod
    eod
else D=Dold;
eod

D=Dold;
eod

Dold=D:
Vold=Y;
Pold=P:

```

## Anexo F. Control Corriente para Fuentes DC

Ubicación: Control del inversor  
Título: Control\_Corriente\_FuentesDC.six

