

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO  
AISLADO PARA ZONAS RURALES DEL ECUADOR**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN  
ELECTROMECAÁNICA**

**CRISTINA ELIZABETH OÑA PILLIZA**

**cristina.ona@epn.edu.ec**

**ISMAEL FABIAN SUQUILLO LUGMAÑA**

**ismael.suquillo@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: ING. ALAN DANIEL CUENCA SÁNCHEZ**

**alan.cuenca@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERRERA MSC.**

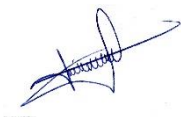
**carlos.romo@epn.edu.ec**

**Septiembre, 2020**

## DECLARACIÓN

Nosotros Cristina Elizabeth Oña Pilliza e Ismael Fabian Suquillo Lugmaña, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaremos toda la información técnica pertinente. En el caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



---

**Cristina Elizabeth Oña Pilliza**

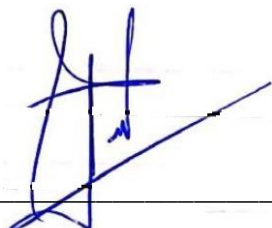


---

**Ismael Fabian Suquillo Lugmaña**

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Cristina Elizabeth Oña Pilliza e Ismael Fabian Suquillo Lugmaña, bajo nuestra supervisión.



---

**Ing. Alan Daniel Cuenca Sánchez**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**Ing. Carlos Orlando Romo Herrera**

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud, paciencia y fuerza para seguir adelante día tras días.

A mi madre Mercedes y a mi padre Manuel, quienes con su amor, paciencia y sabios consejos me han enseñado a superar cada una de las adversidades de la vida, también les agradezco por inculcar en mí, el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi hermano y a mi novio por brindarme siempre su apoyo incondicional en todo momento y por creer en mí.

Agradezco a mi tutor de tesis Ing. Alan Cuenca quien, con su dirección, conocimiento y sabiduría, me ha guiado durante todo el desarrollo de la tesis.

A todos mis amigos y compañeros que me han brindado su ayuda y apoyo durante mi carrera; en especial a Ismael que más que un compañero de tesis es un amigo incondicional con el que siempre he podido contar en las buenas y malas.

Finalmente, gracias a todas las personas que estuvieron a mi lado quede una u otra forma me brindaron su apoyo.

Cristina

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres Mercedes y Manuel por apoyarme durante toda mi vida, por guiarme en cada uno de mis pasos hacia el camino del bien, gracias, madre por enseñarme a luchar, logrando cumplir cada uno de mis sueños y a ser de mí una mejor persona, por siempre darme ánimos y fuerza para seguir adelante. A mi padre por brindarme en todo momento su apoyo incondicional, por hacer de mí una persona perseverante y valiente.

A mi hermano Dennis y a mis primos por estar en todo este tiempo presentes, por su cariño incondicional que me han brindado a lo largo de esta etapa de mi vida.

Finalmente quiero dedicar este proyecto a todas las personas que me han motivado y han hecho que este proyecto se realice.

Cristina

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme la salud, paciencia y sabiduría para cumplir con este objetivo.

A mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar y apoyarme siempre en los momentos más difíciles.

A mis hermanas, hermano y cuñado por compartir conmigo cada instante de esta maravillosa vida.

A Cristina, mi compañera tesis y amiga por todo el gran trabajo de equipo realizado durante toda la carrera.

Agradezco al Ing. Alan Cuenca por su apoyo incondicional para la realización de este proyecto.

Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional en especial a la Escuela de Formación de Tecnólogos por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios en sus aulas.

Ismael

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación está dedicado:

A mi familia, en especial para mis padres Rosa y Manuel, por todo el apoyo incondicional y la sabiduría que me brindaron para la culminación de mis estudios superiores.

Ismael

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del problema .....	1
1.2	Justificación .....	2
1.3	Objetivos .....	2
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Técnicas e instrumentos utilizados en la ejecución del proyecto. ....	3
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>4</b>
3.1	Requerimientos del sistema .....	4
	• Energía solar fotovoltaica .....	4
	• Radiación solar .....	4
	• Zonas rurales del Ecuador para casos de estudio .....	4
	• Recurso Solar en zonas rurales del Ecuador .....	5
	• Demanda eléctrica en zonas rurales del Ecuador .....	7
3.2	Dimensionamiento .....	7
	• Sistema fotovoltaico aislado (SFVA) .....	7
	• Estudio de cargas .....	8
	• Módulo fotovoltaico .....	9
	• Regulador de carga .....	13
	• Sistema de almacenamiento .....	17
	• Inversor .....	18
	• Conductores .....	25
	• Protecciones eléctricas .....	27
	• Desarrollo de la herramienta de dimensionamiento en Visual Basic.....	27
3.3	Algoritmo de control .....	35
	• Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT) .....	35
	• Control Proporcional Integral Discreto (PI).....	37
3.4	Pruebas de funcionamiento .....	39
	• Caso de estudio 1: sitio Pedernales .....	39
	• Caso de estudio 2: sitio Ibarra .....	42
	• Caso de estudio 3: sitio Cuyabeno .....	46
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>50</b>
4.1	Conclusiones .....	50
4.2	Recomendaciones .....	51
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>55</b>



## Índice de figuras

Figura 1 Componentes de un sistema fotovoltaico aislado.....	8
Figura 2 Conexión serie de módulos FV.....	11
Figura 3 Conexión paralelo de módulos FV .....	11
Figura 4 Conexión serie-paralelo de módulos FV .....	12
Figura 5 Curvas de I-V y P-V del arreglo fotovoltaico en Simulink. ....	12
Figura 6 Filtro pasa bajos a la salida del arreglo fotovoltaico. ....	13
Figura 7 Conexión del regulador de carga y sus componentes. ....	14
Figura 8 Convertidor reductor .....	15
Figura 9 Convertidor bidireccional. ....	16
Figura 10 Conexión del inversor monofásico y sus componentes. ....	18
Figura 11 Convertidor elevador.....	19
Figura 12 Inversor monofásico de puente completo. ....	21
Figura 13 Inversor monofásico de puente completo representado por interruptores. ....	21
Figura 14 Interruptores S1 y S3 cerrados.....	22
Figura 15 Generador de pulsos para obtener el semiciclo positivo de onda cuadrada.....	22
Figura 16 Interruptores S2 y S4 cerrados.....	23
Figura 17 Generador de pulsos para obtener el semiciclo negativo de onda cuadrada. ..	23
Figura 18 Interfaz desarrollada con Macros y Visual Basic. ....	31
Figura 19 Curva de máxima potencia de un panel fotovoltaico a 1 [kW/m <sup>2</sup> ].....	35
Figura 20 Algoritmo de Perturbar & Observar. ....	36
Figura 21 Diagrama de flujo del algoritmo de Perturbar & Observar. ....	37
Figura 22 Control PI discreto para control de IGBT's.....	37
Figura 23 Control PI discreto para control del voltaje de carga. ....	38
Figura 24 Control PI discreto para el control del voltaje de descarga.....	38
Figura 25 Voltaje del arreglo fotovoltaico de Pedernales.....	39
Figura 26 Corriente del arreglo fotovoltaico de Pedernales. ....	40
Figura 27 Potencia FV del arreglo fotovoltaico de Pedernales. ....	40
Figura 28 Voltaje AC del inversor de Pedernales.....	41
Figura 29 Corriente AC del inversor de Pedernales.....	41
Figura 30 Potencia AC del inversor de Pedernales.....	42
Figura 31 Voltaje del arreglo fotovoltaico de Ibarra.....	43
Figura 32 Corriente del arreglo fotovoltaico de Ibarra.....	43
Figura 33 Potencia del arreglo fotovoltaico de Ibarra.....	44
Figura 34 Voltaje AC del inversor de Ibarra.....	44
Figura 35 Corriente AC del inversor de Ibarra.....	45
Figura 36 Potencia AC del inversor de Ibarra.....	45
Figura 37 Voltaje del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.....	46
Figura 38 Corriente del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.....	47
Figura 39 Potencia del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.....	47
Figura 40 Voltaje AC del inversor del Cuyabeno.....	48
Figura 41 Corriente AC del inversor del Cuyabeno.....	48
Figura 42 Potencia AC del inversor del Cuyabeno.....	49

## Índice de tablas

<i>Tabla 1 Datos de radiación global Pedernales</i> .....	5
<i>Tabla 2 Datos de radiación global Ibarra</i> .....	6
<i>Tabla 3 Datos de radiación global Cuyabeno</i> .....	7
<i>Tabla 4 Cargas eléctricas</i> .....	8
<i>Tabla 5 Voltaje del sistema</i> .....	9
<i>Tabla 6 Módulo fotovoltaico</i> .....	10
<i>Tabla 7 Conmutación de interruptores</i> .....	21
<i>Tabla 8 Porcentaje de caída de tensión en conductores</i> . ....	25
<i>Tabla 9 Herramientas de Visual Basic utilizadas para el desarrollo de las interfaces</i> . ....	28
<i>Tabla 10 Tipo de datos utilizados para el desarrollo de los algoritmos</i> . ....	29
<i>Tabla 11 Estudio de cargas para tres zonas rurales del Ecuador</i> . ....	32
<i>Tabla 12 Datos del dimensionamiento</i> .....	33
<i>Tabla 13 Arreglo fotovoltaico</i> .....	33
<i>Tabla 14 Regulador de carga</i> .....	34
<i>Tabla 15 Inversor</i> .....	34
<i>Tabla 16 Baterías</i> . ....	35
<i>Tabla 17 Valores para los controles PI discretos de la batería</i> . ....	38
<i>Tabla 18 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para Pedernales</i> .....	42
<i>Tabla 19 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para Ibarra</i> . ....	46
<i>Tabla 20 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para el Cuyabeno</i> .....	49

## Resumen

El presente proyecto de titulación, SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO AISLADO PARA ZONAS RURALES DEL ECUADOR, pretende servir como base en el proceso de enseñanza y aprendizaje de Energías Alternativas. Además, permitirá el desarrollo de futuros estudios para la simulación e implementación de sistemas fotovoltaicos a nivel rural, en donde el escaso acceso a la energía eléctrica limita las posibilidades de desarrollo de estas poblaciones. En base al estudio realizado, el presente documento está conformado por cuatro capítulos que se detallan a continuación.

El capítulo uno contiene la introducción y características de la investigación, además del planteamiento del problema, que parte de la necesidad de disponer estudios que permitan conocer las zonas rurales del Ecuador en donde la energía solar fotovoltaica puede convertirse en el motor del desarrollo social; asimismo, se encuentra la justificación, que señala la razón de por qué y para qué se realizan estudios del comportamiento de la energía fotovoltaica y los objetivos que se refieren a la asignación de las tareas.

El capítulo dos describe las técnicas e instrumentos utilizados para el desarrollo del presente proyecto. Además, se exponen las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos.

El capítulo tres detalla el análisis de resultados de la simulación del sistema fotovoltaico aislado desarrollada en el entorno de Simulink, así como los resultados de la herramienta de dimensionamiento elaborada mediante Macros y Visual Basic de Excel.

Finalmente, el capítulo cuarto presenta las conclusiones y recomendaciones obtenidas del dimensionamiento y simulación del proyecto.

## Abstract

The present degree project, SIMULATION OF AN ISOLATED PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM FOR RURAL AREAS OF ECUADOR, intends to serve as a ground for the teaching and learning process of Renewable Energies. In addition, it will allow the development of future research for the simulation and implementation of photovoltaic systems at a rural level, where the lack of access to electric energy limits the possibilities of development of these populations. According to the study carried out, this document is made up of four chapters, which are detailed below.

Chapter one includes the introduction and characteristics of the research, as well as the approach to the problem, which is based on the need to have studies that allow us to know the Ecuadorian rural areas where photovoltaic solar energy can become the engine of social development; there is also the justification, which points out the reason why and for what purpose studies on the behavior of photovoltaic energy are carried out and the objectives that refer to the assignment of tasks.

Chapter two describes the methods and tools used for the development of the present project. In addition, the activities necessary for the accomplishment of the objectives are presented.

Chapter three details the analysis of the results of the simulation of the isolated photovoltaic system developed in the Simulink environment, as well as the results of the design tool developed using Macros and Visual Basic of Excel.

Finally, the fourth chapter presents the conclusions and recommendations got from the sizing and simulation of the project.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Planteamiento del problema

Las energías renovables son todo tipo de energía que puede producirse de forma continua y son inagotables a escala humana, es decir, se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles que existen en una cantidad limitada y que son agotables en un plazo más o menos determinado [1].

Las principales formas de energías renovables que existen son: la biomasa, eólica, hidráulica, solar, geotérmica y las energías marinas, las cuales, provienen directa o indirectamente de la energía del sol con excepción de las energías marinas y geotérmica [2].

En la actualidad, el uso de energías renovables se ha potencializado con el fin de contribuir al cuidado y preservación del medio ambiente [1]. El cambio climático provocado por la expulsión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera por industrias, vehículos, quema de combustibles fósiles, etc. Ha provocado que en diferentes regiones del mundo se desarrolle tecnología que permita obtener energía (eléctrica o térmica) a través de fuentes renovables como el sol.

El uso de la energía fotovoltaica se ha extendido en los últimos años a diferentes regiones del planeta y el Ecuador no es la excepción, ya que, es un país con características topográficas muy variadas, una gran diversidad climática y condiciones inigualables que le confieren un elevado potencial para el uso de energías renovables y limpias.

Por tal motivo, es necesario que en el Ecuador se realice estudios que permitan conocer las distintas zonas en donde la energía fotovoltaica puede convertirse en el motor de desarrollo social y económico, por tal razón, se propone la simulación de un sistema de generación fotovoltaico aislado para zonas rurales del Ecuador. El presente proyecto podrá ser utilizado como base para la implementación de sistemas fotovoltaicos aislados, con el fin de crear ciudades sustentables que contribuyan a la mitigación del impacto ambiental causado por la contaminación.

## 1.2 Justificación

Las tecnologías renovables ofrecen una energía moderna, limpia y de muy bajo impacto ambiental. Las mismas permiten la implementación de sistemas de generación eléctrica en las diferentes zonas rurales en donde las fuentes de energía convencional aún no se han implementado. Sin embargo, es necesario el desarrollo de estudios y casos de simulación que permitan conocer el comportamiento de la generación renovable en las diferentes zonas rurales del Ecuador.

Por tal motivo, mediante el presente proyecto se ha propuesto el desarrollo de un caso de estudio a nivel de simulación para generación fotovoltaica, a través del uso de software SIMULINK de MATLAB. Dicho software permite desarrollar diseños para conocer el comportamiento de la generación de energía eléctrica a través de la energía solar fotovoltaica. Además, se pueden desarrollar acciones de control que permitan obtener la máxima potencia de los sistemas fotovoltaicos, de tal manera que puedan satisfacer la demanda de energía eléctrica en cualquier momento. Garantizando de esta manera el acceso a una energía asequible, segura, sostenible, moderna y sobre todo amigable con el medio ambiente.

## 1.3 Objetivos

- **Objetivo general**

Simular un sistema de generación fotovoltaico aislado para zonas rurales del Ecuador.

- **Objetivos específicos**

- Determinar los requerimientos necesarios para la simulación del sistema fotovoltaico aislado.
- Dimensionar los componentes del sistema fotovoltaico aislado.
- Desarrollar el algoritmo de control para el regulador de carga.
- Realizar la simulación en el entorno MATLAB/SIMULINK.
- Elaborar un manual para utilización de la herramienta de simulación.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Técnicas e instrumentos utilizados en la ejecución del proyecto.

Para el desarrollo del proyecto de simulación se ha utilizado información técnica, la cual ha servido para dimensionar cada uno de los componentes de un sistema fotovoltaico aislado (SFVA).

La simulación se realizó en base a la demanda de potencia eléctrica y el recurso solar obtenido del software PVGIS, el cual permite obtener datos de radiación global. Además, para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado se tomó en cuenta informes técnicos elaborados por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) y la Corporación para la Investigación Energética (CIE). Por consiguiente, se desarrolló una herramienta de dimensionamiento basada en Macros y Visual Basic a través de Excel versión 2009, la cual facilitó el ingreso de los diferentes parámetros.

Una vez obtenidos los resultados a través de la herramienta de dimensionamiento, se procedió a desarrollar un algoritmo denominado seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT); para obtener el pico de potencia del arreglo fotovoltaico. Además, se incorporó un control proporcional integral discreto para la carga y descarga de las baterías.

Los parámetros y algoritmos antes mencionados se utilizaron para realizar la simulación y pruebas de funcionamiento en el entorno de SIMULINK/MATLAB versión R2020a, con el fin de obtener las curvas de voltaje, corriente y potencia generada por el SFVA, además, se verificó que la energía eléctrica sea la necesaria para satisfacer la demanda.

Finalmente, se realizó un manual de usuario que permita el uso de la herramienta de simulación.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Requerimientos del sistema

- **Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica busca la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica, esta conversión de energía se basa en el denominado efecto fotoeléctrico, que a través de semiconductores sensibles a la luz (celdas fotovoltaicas) se puede generar una pequeña diferencia de potencial (voltaje). La conexión en serie o serie-paralelo de estos dispositivos permite la obtención de módulos fotovoltaicos con diferentes valores de voltaje, corriente y potencia [3].

La energía fotovoltaica puede convertirse en una opción viable para la electrificación, en especial para zonas rurales del Ecuador en donde la instalación de la red eléctrica es muy costosa o técnicamente muy compleja [4].

- **Radiación solar**

La radiación solar que llega a la tierra constituye la principal fuente de energía renovable que se encuentra al alcance de todos. La unidad de medida es el  $[W/m^2]$ , y la máxima radiación sobre la superficie terrestre es de  $1000 [W/m^2]$  [5]. La radiación solar puede clasificarse en:

- a) **Radiación directa**

- Es aquella radiación que incide directamente sobre los objetos en forma de rayos paralelos y que no sufre ninguna distorsión.

- b) **Radiación difusa**

- Es la reflexión de la radiación solar producida por el aire y el polvo atmosférico.

- c) **Radiación global**

- Es el resultado de la sumatoria de la radiación directa y la radiación difusa sobre la superficie terrestre. Este tipo de radiación es la aprovechada por los módulos fotovoltaicos para producir energía eléctrica.

- **Zonas rurales del Ecuador para casos de estudio**

El Ecuador es un país que posee características topográficas muy variadas, por lo cual tiene un elevado potencial para el uso de la energía solar fotovoltaica. De acuerdo con [6], los valores de radiación global promedio en el Ecuador presentan homogeneidad, lo que se traduce en una reducción significativa en cuanto al problema de variaciones aleatorias de este



recurso. Además, de brindar confianza y rentabilidad para el uso de la tecnología fotovoltaica en el país.

Como se puede observar en el Anexo A (Mapa de radiación global), la radiación global promedio en el Ecuador es de 4574,99 [Wh/m<sup>2</sup>/día] y puede oscilar entre 5748,47 [Wh/m<sup>2</sup>/día] y 3634,38 [Wh/m<sup>2</sup>/día] para las regiones de la Costa, Sierra y Amazonía.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, para el estudio del recurso solar y dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado se ha seleccionado una zona rural de cada región:

- a) Región Costa: Pedernales
- b) Región Sierra: Ibarra
- c) Región Amazónica: Cuyabeno

- **Recurso Solar en zonas rurales del Ecuador**

Para el estudio del recurso solar en las zonas rurales antes mencionadas, se utilizó el software PVGIS (Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica) [7], para obtener los datos de irradiación global para cada una de las zonas. Con los datos obtenidos en el software se realiza el siguiente procedimiento:

- a) Se analizan los datos de irradiación global mensual de todo un año y se identifica el mes con menor producción.
- b) La irradiación global del mes con menor producción se divide para el número de días y de esa manera se obtiene la hora solar mínima.

La hora solar mínima obtenida en cada una de las zonas permitirá que el SFVA trabaje cuando el recurso solar sea insuficiente.

En la Tabla 1 se muestran los datos de radiación global de Pedernales y se analizan los datos, obteniendo una hora solar mínima de 4,23, correspondiente al mes de febrero del año 2015.

Tabla 1 Datos de radiación global Pedernales

<b>Latitud (grados decimales):</b>		0.070	
<b>Longitud (grados decimales):</b>		-80.051	
<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup>/mes</b>	<b>HSP</b>
2015	Enero	131,52	4,38
2015	Febrero	127,01	4,23
2015	Marzo	153,92	5,13
2015	Abril	167,89	5,60

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup>/mes</b>	<b>HSP</b>
2015	Mayo	152,6	5,09
2015	Junio	143,8	4,79
2015	Julio	129,78	4,33
2015	Agosto	135,15	4,51
2015	Septiembre	138,96	4,63
2015	Octubre	141,96	4,73
2015	Noviembre	135,46	4,52
2015	Diciembre	152,46	5,08

Fuente: PVGIS [7]

En la Tabla 2 se muestran los datos de radiación global de Ibarra y se analizan los datos, obteniendo una hora solar mínima de 4,89, correspondiente al mes de junio del año 2015.

Tabla 2 Datos de radiación global Ibarra

<b>Latitud (grados decimales)</b>		0.348	
<b>Longitud (grados decimales)</b>		-78.118	
<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup>/mes</b>	<b>HSP</b>
2015	Enero	165,39	5,51
2015	Febrero	162,6	5,42
2015	Marzo	152,76	5,09
2015	Abril	149,13	4,97
2015	Mayo	159,09	5,30
2015	Junio	146,79	4,89
2015	Julio	161,47	5,38
2015	Agosto	169,94	5,66
2015	Septiembre	190,47	6,35
2015	Octubre	168,17	5,61
2015	Noviembre	166,12	5,54
2015	Diciembre	188,56	6,29

Fuente: PVGIS [7]

En la Tabla 3 se muestran los datos de radiación global del Cuyabeno y se analizan los datos, obteniendo una hora solar mínima de 3,78, correspondiente al mes de junio del año 2015.

Tabla 3 Datos de radiación global Cuyabeno

<b>Latitud (grados decimales):</b>		-0.175	
<b>Longitud (grados decimales):</b>		-76.322	
<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>kWh/m<sup>2</sup>/mes</b>	<b>HSP</b>
2015	Enero	120,44	4,01
2015	Febrero	125,62	4,19
2015	Marzo	113,57	3,79
2015	Abril	122,67	4,09
2015	Mayo	120,43	4,01
2015	Junio	113,41	3,78
2015	Julio	119,78	3,99
2015	Agosto	143,79	4,79
2015	Septiembre	167,61	5,59
2015	Octubre	157,58	5,25
2015	Noviembre	141,67	4,72
2015	Diciembre	131,59	4,39

Fuente: PVGIS [7]

- **Demanda eléctrica en zonas rurales del Ecuador**

De acuerdo con [8], la demanda eléctrica por vivienda en zonas rurales del Ecuador se encuentra entre los 400 [W] y 2000 [W].

Sin embargo, el presente proyecto desarrollado esta diseñado para una demanda eléctrica de hasta 5000 [W], lo cual permitirá garantizar la conexión de un mayor número de cargas en AC con un voltaje de operación de 110 a 120 [VAC].

### 3.2 Dimensionamiento

- **Sistema fotovoltaico aislado (SFVA)**

Los sistemas fotovoltaicos aislados son exclusivamente para zonas rurales debido a que estas no cuentan con una red de electrificación. El funcionamiento de estos sistemas dependerá de la radiación solar para satisfacer la demanda.

Los elementos de un sistema aislado son los siguientes:

- Arreglo de módulos fotovoltaicos
- Regulador de carga
- Sistema de almacenamiento (baterías)

## d) Inversor

En la Figura 1, se puede observar la conexión de los elementos antes mencionados.

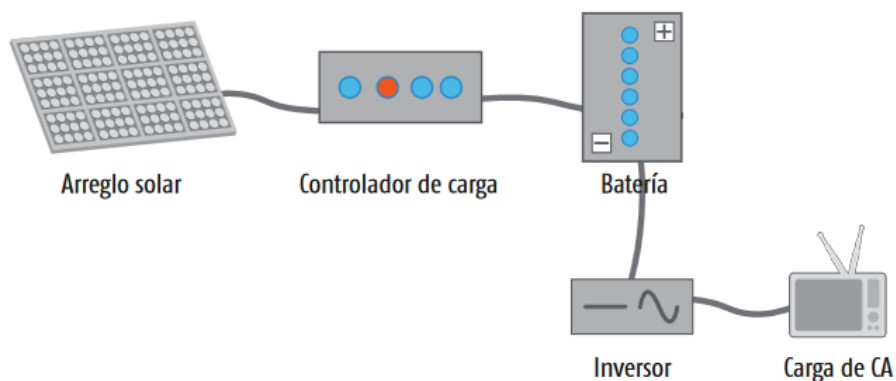


Figura 1 Componentes de un sistema fotovoltaico aislado  
Fuente: Alianza Energía y Ambiente con la Región Andina [3].

- **Estudio de cargas**

Las cargas eléctricas consideradas para el dimensionamiento del SFVA en las zonas establecidas se muestra en la Tabla 4, se tomaron en cuenta elementos básicos y necesarios de una vivienda ubicada en una zona rural.

Tabla 4 Cargas eléctricas

1	Equipo de sonido
2	Televisión
3	Luminarias
4	Cargador de celulares
5	Refrigeradora
6	Computador portátil
7	Modem internet
8	Licuada
9	Ventilador
10	Plancha

Para determinar el consumo diario en wattios-hora de cada carga, es necesario conocer:

- ❖ La cantidad de cargas (Q) del mismo tipo dentro de la vivienda,
- ❖ La potencia eléctrica [W],
- ❖ El número de horas de funcionamiento al día.

Con lo cual se puede aplicar en la Ecuación 1.

$$\text{Consumo diario (por carga)} = Q * \text{potencia de la carga} * \text{horas de uso [Wh]} \quad (1)$$

La demanda máxima es el mayor consumo de energía en un periodo de tiempo específico. Para determinar la demanda máxima de las cargas como motores, bombas o compresores se debe considerar un factor de seguridad de 3 veces su potencia eléctrica (Ecuación 2), debido a que estas cargas tienen una corriente de arranque de 4 a 8 veces la corriente nominal (In).

$$\text{Demanda máxima (carga)} = Q * 3 * \text{Potencia de la carga [W]} \quad (2)$$

El consumo diario total está determinado por la sumatoria de los consumos diarios de cada carga y de la misma manera la demanda máxima.

- **Módulo fotovoltaico**

El módulo fotovoltaico aprovecha la energía solar que incide sobre el mismo para convertirla en energía eléctrica en forma de corriente continua. El mismo se compone de un conjunto de células o celdas fotovoltaicas relacionadas entre sí para obtener valores concretos de voltaje continuo (6 [V], 12 [V], 24 [V] o 48 [V]) que permiten seleccionar la tensión del sistema fotovoltaico.

Para poder dimensionar el número de módulos FV, antes es necesario determinar el voltaje del sistema, para lo cual se utilizará el consumo diario con un factor de seguridad del 20% al 30% de acuerdo con la Ecuación 3.

$$\text{Consumo diario sobredimensionado} = \text{consumo total} * \text{Factor de seguridad [Wh]} \quad (3)$$

Con el consumo diario sobredimensionado se determinará el voltaje del sistema de acuerdo con la Tabla 5.

Tabla 5 Voltaje del sistema

Rango de consumo diario sobredimensionado	Voltaje del sistema	Unidades
1 a 2000 Wh	12	V
2001 a 4000 Wh	24	V
>= 4001 Wh	48	V

Fuente: Energías Alternativas, MsC Alan Cuenca Sánchez.

La potencia FV es la relación entre el consumo diario sobredimensionado y la hora solar mínima, como se presenta en la Ecuación 4.

$$\text{Potencia FV} = \frac{\text{Consumo diario sobredimensionado}}{\text{Hora solar mínima}} [\text{Wp}] \quad (4)$$

El número de módulos FV estará determinado por la relación entre la potencia FV y la potencia pico [Wp] del módulo, de acuerdo con la Ecuación 5.

$$\# \text{Módulos FV} = \frac{\text{Potencia FV}}{\text{Potencia pico del módulo}} \quad (5)$$

La selección del módulo FV será de libre elección, sin embargo, se debe tener en cuenta que su potencia pico afectará directamente a la cantidad de módulos requeridos para satisfacer la demanda eléctrica.

Los parámetros para la selección de un módulo fotovoltaico se presentan en la Tabla 6, y deben ser tomados de la hoja de datos del fabricante, considerando los resultados de las pruebas realizadas en condiciones estándar (STC).

Tabla 6 Módulo fotovoltaico

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>
Potencia pico	<b>W</b>
Voltaje en circuito abierto Voc	<b>Vdc</b>
Corriente de corto circuito Isc	<b>Adc</b>

Fuente: Fichas técnicas Fabricantes.

Además, se recomienda que el número de paneles sea siempre un número par, para facilitar la conexión del arreglo fotovoltaico, las conexiones que se pueden realizar de los módulos son las siguientes:

- **Conexión en serie**

En esta conexión, los módulos FV se conectan sucesivamente, es decir, el terminal negativo de un panel se conecta al terminal positivo de otro. Para este caso, el voltaje de salida se incrementará, mientras que la corriente producida no sufrirá ningún cambio, como se presenta en la Figura 2.

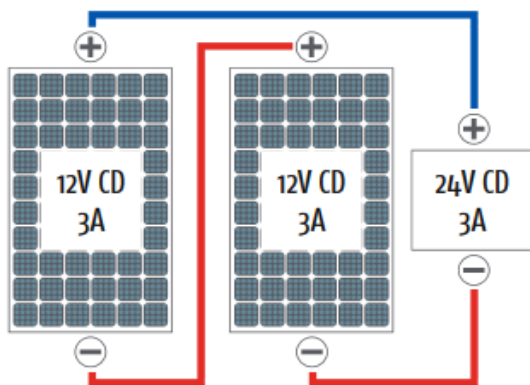


Figura 2 Conexión serie de módulos FV

Fuente: Alianza Energía y Ambiente con la Región Andina [3].

- **Conexión en paralelo**

La conexión de módulos se realiza entre los terminales positivo a positivo y negativo a negativo. Con lo cual, se obtiene un incremento en la corriente del sistema mientras que el voltaje se mantiene igual, como se muestra en la Figura 3.

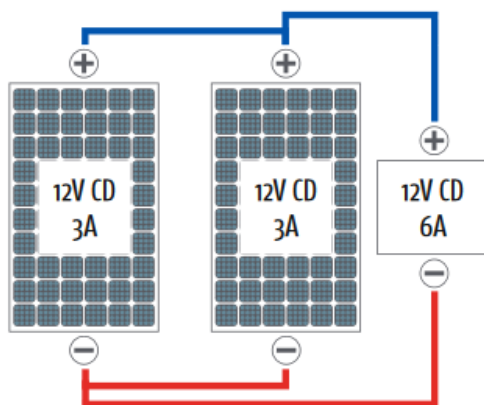


Figura 3 Conexión paralelo de módulos FV

Fuente: Alianza Energía y Ambiente con la Región Andina [3].

- **Conexión en serie-paralelo**

Esta conexión suele ser la más utilizada en sistemas fotovoltaicos, ya que permite obtener voltajes y corrientes en función de la demanda eléctrica a satisfacer. La conexión se puede observar en la Figura 4.

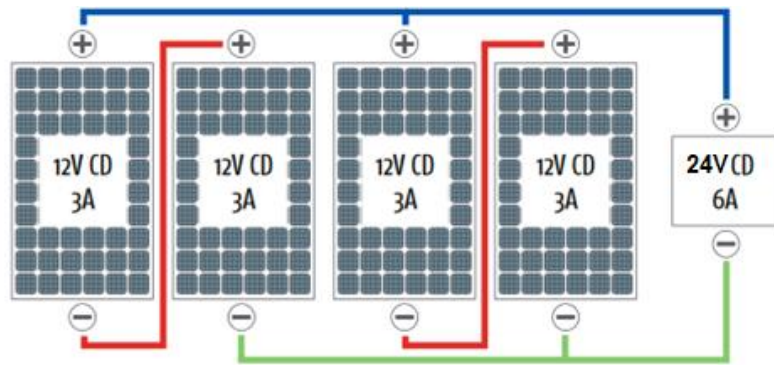


Figura 4 Conexión serie-paralelo de módulos FV

Fuente: Alianza Energía y Ambiente con la Región Andina [3].

Una vez seleccionada la conexión del arreglo, en el entorno de Simulink se utilizó la herramienta PV Array, que se puede encontrar en la librería Simscape. En el cuadro de dialogo de esta herramienta se ingresó el número total de módulos en paralelo y serie, así como los datos técnicos del módulo fotovoltaico elegido, de esta manera se obtuvieron las curvas de Corriente (A) respecto al Voltaje (V) y Potencia (W) respecto al Voltaje (V) como se muestran en la Figura 5.

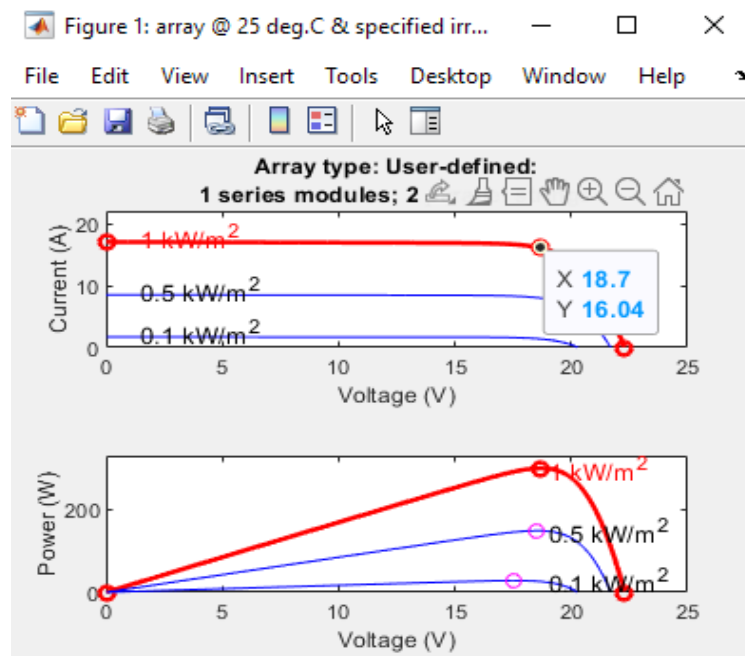


Figura 5 Curvas de I-V y P-V del arreglo fotovoltaico en Simulink.

De la figura anterior en la curva de Corriente (A) respecto al Voltaje (V) se determinaron los valores de voltaje total en circuito abierto ( $V_{total_{V_{oc_{Simulink}}}}$ ) y corriente total de cortocircuito ( $I_{total_{I_{sc_{Simulink}}}}$ ). Además, únicamente para la simulación se debe colocar un capacitor y resistencia (Figura 6) para estabilizar el voltaje y la corriente de salida del arreglo de paneles, lo cual permitirá conectar en paralelo el regulador de carga.



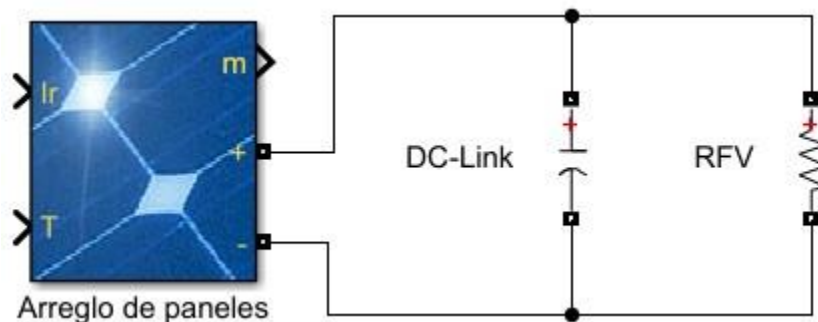


Figura 6 Filtro pasa bajos a la salida del arreglo fotovoltaico.

La resistencia (RFV) se obtiene al aplicar la Ecuación 6:

$$RFV = \frac{V_{total_{Voc\_Simulink}}}{I_{total_{Isc\_Simulink}}} \text{ [ohms]} \quad (6)$$

Para el cálculo del capacitor (DC-Link) se aplican las Ecuaciones 7, 8 y 9. En donde el voltaje máximo ( $V_{m\acute{a}x}$ ) y el voltaje mínimo ( $V_{m\acute{i}n}$ ) permiten mantener el rizado en el capacitor dentro del rango adecuado. Además, para el  $V_{m\acute{a}x}$  se consideró un factor de seguridad de 120%, mientras que para el  $V_{m\acute{i}n}$  solo se aplicará un factor del 20%.

$$V_{m\acute{a}x} = V_{total_{Voc\_Simulink}} * 1,20 \text{ [Vdc]} \quad (7)$$

$$V_{m\acute{i}n} = V_{total_{Voc\_Simulink}} - (V_{total_{Voc\_Simulink}} * 0,20) \text{ [Vdc]} \quad (8)$$

$$DC - Link = \frac{Potencia\ FV * \sqrt{2}}{(V_{m\acute{a}x}^2 - V_{m\acute{i}n}^2) * f_c} \text{ [F]} \quad (9)$$

Además, se debe considerar una frecuencia de corte ( $f_c$ ) de 100 Hz para el filtro pasa bajos de la Figura 6, con el objetivo de que el voltaje de salida del arreglo de paneles se establezca y alcance su valor máximo en un tiempo de 10 milisegundos (tiempo de respuesta).

- **Regulador de carga**

Es uno de los elementos más importantes dentro de un sistema fotovoltaico aislado, ya que su principal función es la de evitar situaciones de sobrecarga y sobre descarga de la batería, con el único fin de incrementar su tiempo de vida útil.

Para la selección del regulador, es necesario determinar:

- ❖ El voltaje total en circuito abierto.

$$V_{total_{Voc}} = Voc_{m\acute{o}dulo} * \#m\acute{o}dulos\ en\ serie \text{ [Vdc]} \quad (10)$$

- ❖ La corriente total de corto circuito.

$$I_{total_{Isc}} = I_{sc_{módulo}} * \#módulos \text{ en paralelo [Adc]} \quad (11)$$

❖ La potencia total del arreglo.

$$P_{total} = V_{total_{Voc}} * I_{total_{Isc}} [W] \quad (12)$$

Con los resultados obtenidos anteriormente se ha elegido un regulador de carga comercial. En este proyecto con la finalidad de realizar la simulación de este elemento del SFVA se ha considerado un convertidor reductor y un convertidor bidireccional. El reductor se encargará de generar la tensión para el sistema de almacenamiento (baterías), mientras que el bidireccional permitirá el cambio en la circulación de corriente para cargar y descargar las baterías. La Figura 7 representa la conexión del regulador de carga y sus componentes.

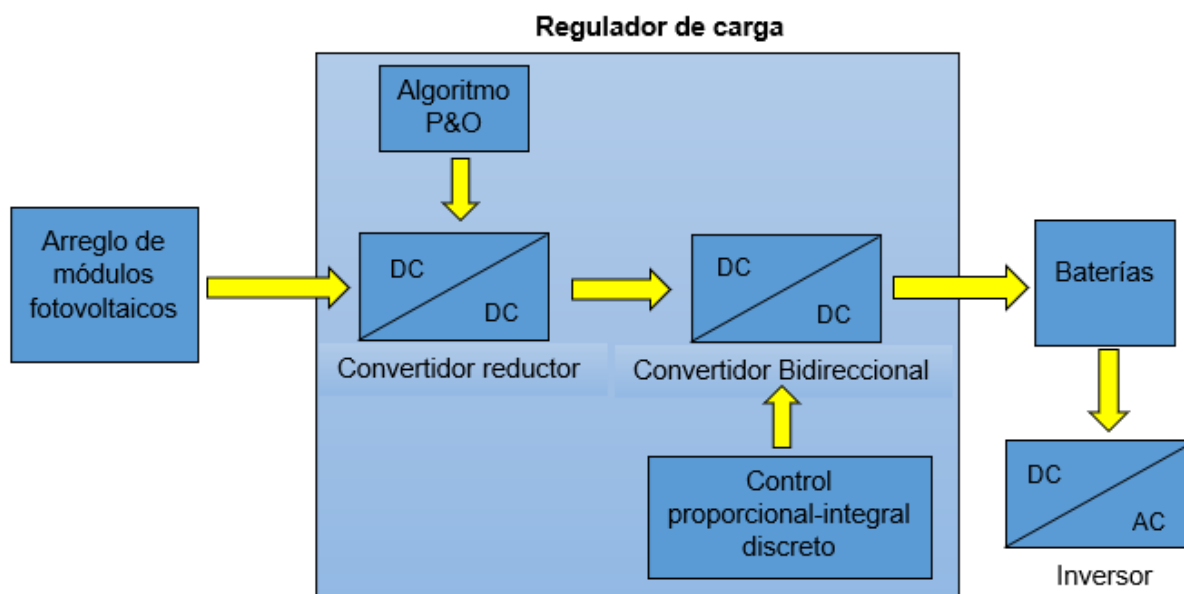


Figura 7 Conexión del regulador de carga y sus componentes.

#### ○ **Convertidor reductor**

Un convertidor reductor genera una tensión de salida menor que la entrada, esta tensión puede ser provista por paneles fotovoltaicos o generadores de corriente continua (CC).

El esquema eléctrico de esta topología de convertidor que más se adapta al sistema propuesto se muestra en la Figura 8, donde  $V_{in}$  es el voltaje de entrada;  $V_{out}$  es el voltaje de salida;  $I_{in}$  corriente de entrada;  $I_{out}$  es la corriente de salida y Q es un IGBT que funciona como interruptor. Se utiliza IGBT por su capacidad de soportar potencias relativamente altas, el modo de funcionamiento de este elemento le permite entrar en estado de conducción al

aplicarse una tensión en la compuerta G que no debe superar los 4V y se bloquea al retirar dicha tensión.

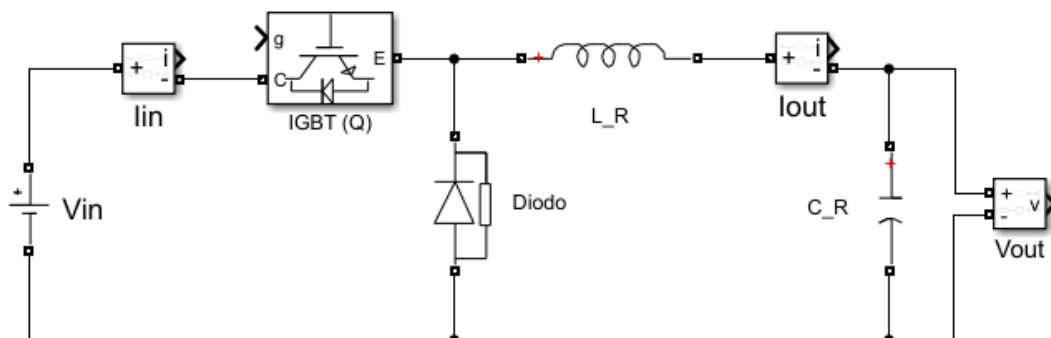


Figura 8 Convertidor reductor

Considerando que el convertidor trabaja en modo continuo, el ciclo de trabajo para el IGBT relaciona el voltaje de salida con el voltaje de entrada, lo cual se establece mediante la Ecuación 13.

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (13)$$

La corriente de salida máxima DC que puede entregar el regulador está asociada a la potencia máxima del regulador y al voltaje de salida del convertidor reductor, como se presenta en la Ecuación 14.

$$I_{out_{m\acute{a}x}} = \frac{P_{out_{regulador}}}{V_{out}} [A] \quad (14)$$

El factor de rizado (Ecuación 15) permitirá reducir la ondulación de la corriente en el inductor y calcular el valor del capacitor.

$$\Delta I_L = 0,015 * I_{out_{m\acute{a}x}} * D [A] \quad (15)$$

La Ecuación 16 permitirá el cálculo del inductor ( $L_R$ ), considerando una frecuencia de conmutación ( $f_s$ ) de hasta 20KHz.

$$L_R = \frac{V_{out} * (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L * f_s * V_{in}} [H] \quad (16)$$

Mediante los parámetros de la Ecuación 17, se calculó el valor del capacitor ( $C_R$ ), para estabilizar el voltaje de salida.

$$C_R = \frac{\Delta I_L}{8 * f_s * \Delta V_{out}} \text{ [F]} \quad (17)$$

○ **Convertidor bidireccional**

En la Figura 9, se muestra la topología de este convertidor, el cual permite la carga y descarga de las baterías. Para activar los IGBT's se necesita un control proporcional integral discreto descrito en el apartado 3.3 correspondiente al algoritmo de control.

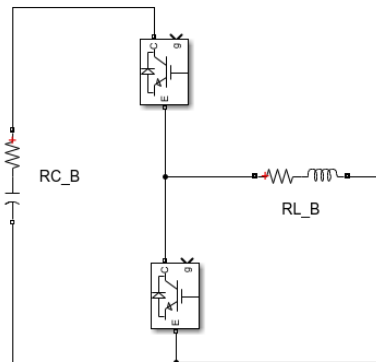


Figura 9 Convertidor bidireccional.

El valor del capacitor ( $C_B$ ) se relaciona con el voltaje del sistema ( $V_s$ ), la corriente del regulador, la frecuencia de conmutación de los IGBT's y un factor de rizado del 1%, dicho valor se puede obtener mediante la siguiente Ecuación 18:

$$C_B = \frac{1}{2 * 1\%} * \frac{I_{regulador}}{V_s * f_s} \text{ [F]} \quad (18)$$

La inductancia ( $L_B$ ) se relaciona con los mismos parámetros del capacitor, pero se considera un 5% del factor de rizado, su valor se obtiene con la Ecuación 19:

$$L_B = \frac{1}{2 * 5\%} * \frac{V_s}{I_{regulador} * f_s} \text{ [H]} \quad (19)$$

La resistencia en serie para el capacitor e inductor debe estar en el orden de los mili-ohmios para evitar las corrientes parásitas.

- **Sistema de almacenamiento**

Este sistema permite almacenar la energía eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico y utilizar esa energía en momentos en donde la irradiación recibida sobre los módulos FV no sea capaz de lograr la potencia fotovoltaica necesaria para satisfacer la demanda.

En el mercado actualmente existen diferentes tipos de baterías solares, entre las más utilizadas se encuentran:

- ❖ Baterías AGM
- ❖ Baterías de Gel
- ❖ Baterías de Litio
- ❖ Baterías de Plomo-Ácido

Para este proyecto se ha considerado baterías de plomo-ácido por ser las más utilizadas en sistemas fotovoltaicos aislados por su relación entre calidad – precio. De acuerdo con [4], el sistema de almacenamiento debe cumplir con las siguientes funciones:

- ❖ Almacenar energía durante un determinado número de días.
- ❖ Proporcionar una potencia instantánea elevada.
- ❖ Fijar la tensión de trabajo para el inversor.

Entre los parámetros más importantes que se debe tomar en cuenta para el dimensionamiento del sistema de acumulación se encuentra:

- ❖ **Capacidad de la batería:** Es la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener en una descarga completa partiendo de un estado de carga total del mismo.
- ❖ **Profundidad de descarga:** De acuerdo con [3], es la cantidad de energía en porcentaje que se puede obtener durante una determinada descarga, partiendo del acumulador totalmente cargado.
- ❖ **Días de autonomía:** Es recomendable que el sistema sea autónomo por 1 día, para disminuir el número de acumuladores.
- ❖ **Voltaje de la batería:** El valor comercial de las baterías solares es de 6 [V] o 12 [V], para conseguir valores de tensión superiores, se pueden conectar los acumuladores en serie.

Para determinar la cantidad de energía que el sistema de acumulación puede suministrar se utiliza la Ecuación 20:

$$\frac{\text{Ah}}{\text{día}} = \frac{\left( \frac{\text{Consumo diario}}{\text{Eficiencia del inversor}} \right)}{\text{Voltaje del sistema}} \quad (20)$$

Para conocer el número de baterías en paralelo aplica la Ecuación 21:

$$\text{Baterías en paralelo} = \frac{\left( \frac{\text{Ah}}{\text{día}} * (\text{Días de autonomía}) \right)}{\text{Profundidad de descarga}} \quad (21)$$

A partir de la Ecuación 22 se obtiene el número de baterías en serie.

$$\text{Baterías en serie} = \frac{\text{Voltaje del sistema}}{\text{Voltaje de la batería}} \quad (22)$$

La capacidad total del sistema de almacenamiento se expresa mediante la Ecuación 23.

$$\text{Ah}_{\text{total}} = \text{Capacidad de la batería} * \text{baterías en paralelo [Ah]} \quad (23)$$

- **Inversor**

Debido a que las cargas eléctricas seleccionadas para este proyecto se alimentan con una fuente de corriente alterna, se consideró un inversor que tiene la función de convertir la corriente continua en corriente alterna, igual a la que proporciona la red eléctrica para el sector residencial: 110 a 120 [VAC] y una frecuencia de 60 [Hz].

Para la selección del inversor se consideró la demanda máxima total con un factor de seguridad del 20% al 30%, con el fin de simular el inversor se ha tomado en cuenta: un convertidor elevador, un puente de IGBT's y un filtro LC como se muestra en la Figura 10.

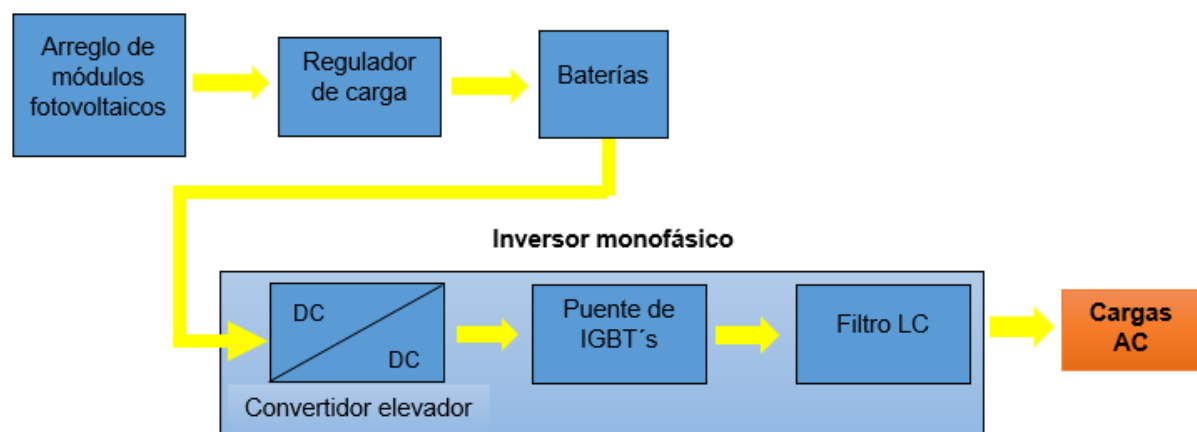


Figura 10 Conexión del inversor monofásico y sus componentes.

○ **Convertidor elevador**

El convertidor elevador genera una tensión de salida mayor que la entrada. El voltaje de entrada para el circuito elevador será del sistema de almacenamiento, mientras que la tensión de salida tiene un valor de 170 [Vdc] con la finalidad de obtener en la salida del puente de IGBT's el mismo valor pico en voltaje alterno.

En el esquema de la Figura 11, se muestran los elementos de potencia: inductor, capacitores, diodo, resistencia y un IGBT con una frecuencia de conmutación de hasta 20 [KHz], la cual será proporcionada por un generador de pulsos.

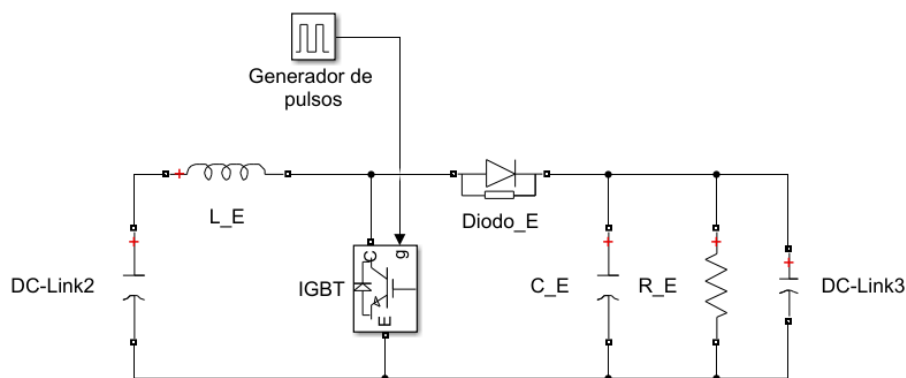


Figura 11 Convertidor elevador.

El convertidor elevador, trabaja en modo continuo. Por lo tanto, el ciclo de trabajo (D) para el IGBT se determina por la Ecuación 24. El resultado obtenido, se ingresa en Simulink en el parámetro ancho de pulso (Pulse With) del generador de pulsos.

$$D = \left[ 1 - \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \right] * 100 [\%] \quad (24)$$

El cálculo del inductor ( $L_E$ ) para disminuir la ondulación de la corriente se determina por medio de la Ecuación 25:

$$L_E = \frac{D * (1 - D)^2 * R_E}{2 * f_s} [H] \quad (25)$$

El capacitor ( $C_E$ ) que permitirá obtener un voltaje estable a la salida se determina por la Ecuación 26:

$$C_E = \frac{D}{R * f_s * \Delta V_o} [F] \quad (26)$$

Para el acople de las baterías con el inversor es necesario un capacitor denominado DC-Link2, su valor se obtiene mediante las Ecuaciones 27, 28 y 29. La frecuencia de corte ( $f_c$ ) para este caso, corresponde al 1% de la frecuencia de conmutación ( $f_s$ ) de los IGBT's del convertidor bidireccional.

$$V_{\text{máx}} = V_{\text{sistema}} * 1,20 \text{ [Vdc]} \quad (27)$$

$$V_{\text{min}} = V_{\text{sistema}} - (V_{\text{sistema}} * 0,20) \text{ [Vdc]} \quad (28)$$

$$\text{DC - Link2} = \frac{\text{Potencia regulador} * \sqrt{2}}{(V_{\text{máx}}^2 - V_{\text{min}}^2) * f_c} \text{ [F]} \quad (29)$$

Para el acople del convertidor elevador con el puente es necesario un capacitor denominado DC-Link3, su valor se obtiene mediante las Ecuaciones 30, 31 y 32. La frecuencia de corte ( $f_{c1}$ ) para este caso, corresponde al 1% de la frecuencia de conmutación ( $f_s$ ) del IGBT del convertidor elevador.

$$V_{\text{máx}} = V_{\text{salida}_{\text{inversor}}} * 1,20 \text{ [Vdc]} \quad (30)$$

$$V_{\text{min}} = V_{\text{salida}_{\text{inversor}}} - (V_{\text{salida}_{\text{inversor}}} * 0,20) \text{ [Vdc]} \quad (31)$$

$$\text{DC - Link3} = \frac{\text{Potencia inversor} * \sqrt{2}}{(V_{\text{máx}}^2 - V_{\text{min}}^2) * f_{c1}} \text{ [F]} \quad (32)$$

- **Inversor monofásico de puente completo**

Para la simulación, se utiliza el inversor monofásico de puente completo por la gran ventaja de obtener un mayor voltaje de salida. Este inversor está compuesto por cuatro IGBT's como se muestra en la Figura 12, el cual tiene la finalidad de convertir la corriente continua proporcionada por las baterías en corriente alterna.



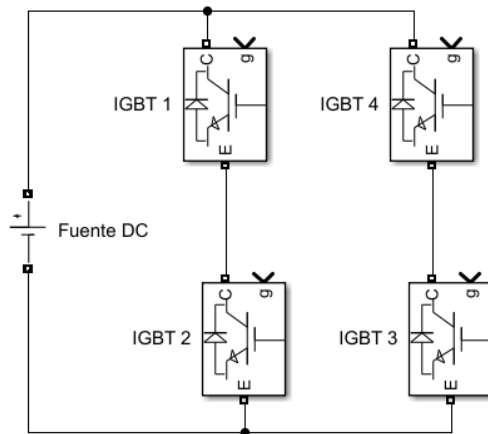


Figura 12 Inversor monofásico de puente completo.

### ❖ Principio de funcionamiento

El tipo de inversor seleccionado se puede representar por cuatro interruptores S1, S2, S3, y S4 y una fuente de corriente continua (Figura 13). Por medio de la conmutación de los interruptores se obtendrá una señal en corriente alterna de onda cuadrada.

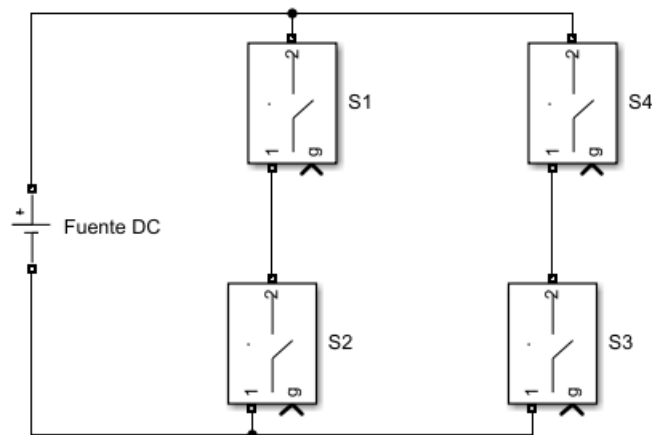


Figura 13 Inversor monofásico de puente completo representado por interruptores.

La secuencia de conmutación de los interruptores se presenta en la Tabla 7, y permite obtener una tensión de salida ( $V_o$ ) con ciclo positivo y negativo.

Tabla 7 Conmutación de interruptores

Interruptores Cerrados	Tensión de salida $V_o$
S1 y S3	+Vdc
S2 y S4	-Vdc

De acuerdo con la Tabla 7, para lograr una tensión de salida  $V_o$  igual a  $+V_{dc}$ , es necesario que los interruptores S1 y S3 permanezcan cerrados y los interruptores S2 y S4 abiertos. En la Figura 14, se presenta el circuito equivalente para este caso.

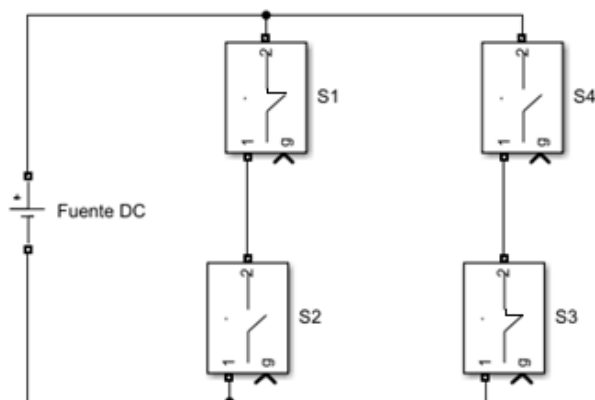


Figura 14 Interruptores S1 y S3 cerrados.

Para automatizar el cierre de los interruptores S1 y S3, se coloca un generador de pulsos configurado en Simulink, como se muestra en la Figura 15.

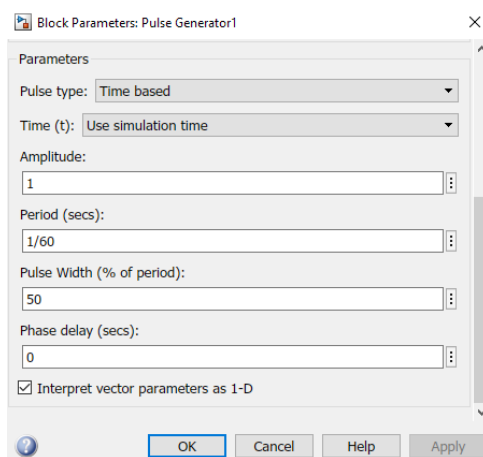


Figura 15 Generador de pulsos para obtener el semiciclo positivo de onda cuadrada.

Por otra parte, para obtener una tensión negativa  $V_o$  igual a  $-V_{dc}$ , los interruptores S2 y S4 deben permanecer cerrados y los interruptores S1 y S3 abiertos. En la Figura 16, se presenta el esquema eléctrico equivalente para este caso.

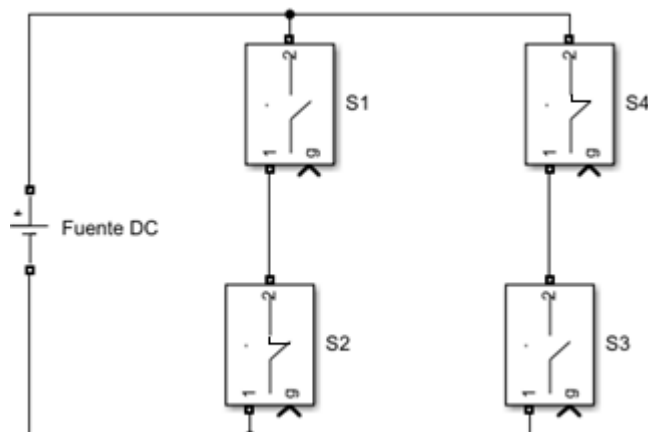


Figura 16 Interruptores S2 y S4 cerrados.

Para automatizar el cierre de los interruptores S2 y S4, se coloca un generador de pulsos configurado en Simulink, como se muestra en la Figura 17.

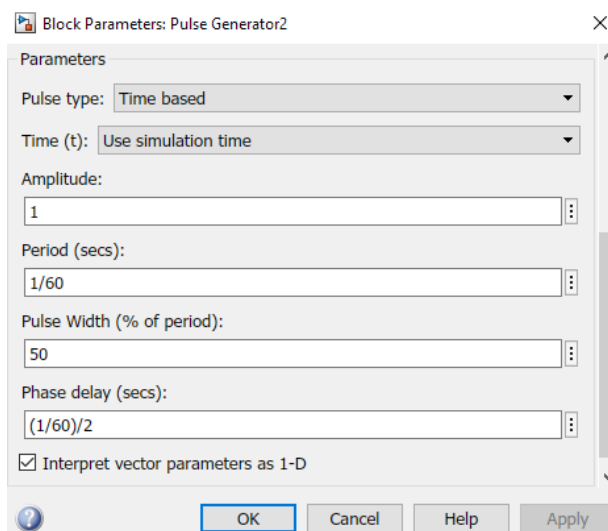


Figura 17 Generador de pulsos para obtener el semiciclo negativo de onda cuadrada.

De esta manera, se obtendrá una onda cuadrada que a través de un filtro a la salida del puente inversor se convertirá en una señal senoidal de voltaje y frecuencia deseables.

#### ○ Filtro

El filtro siempre debe colocarse al final del inversor de esta manera ayudará a reducir los armónicos producidos por altas frecuencias de conmutación. Los filtros más utilizados son:

- ❖ Inductancia-capacitancia (LC)
- ❖ Inductancia-capacitancia- inductancia (LCL)

El filtro utilizado en este proyecto es LC debido a la alta frecuencia de conmutación del puente inversor. Para el cálculo del filtro definido anteriormente, primero se determina la corriente de salida del inversor a través de la siguiente Ecuación 33:

$$I_{inv} = \frac{P_{inv}}{V_{inv}} \text{ [Aac]} \quad (33)$$

La impedancia de salida del inversor está determinada por la Ecuación 34:

$$Z_o = \frac{V_{inv}}{I_{inv}} \text{ [ohms]} \quad (34)$$

Los valores de la inductancia y del capacitor deben ser escogidos de tal forma que la frecuencia de corte sea lo suficientemente menor a la frecuencia de conmutación ( $f_s$ ) de 60 [Hz] de los IGBT's, esta frecuencia está determinada por la Ecuación 35:

$$f_c = f_s * 14,59\% \text{ [Hz]} \quad (35)$$

El factor de amortización debe ser mayor al 0,707 para evitar oscilaciones elevadas y desfases en la frecuencia eléctrica.

$$\zeta \geq 0,707 \quad (36)$$

Para el cálculo del capacitor, se considera la Ecuación 37:

$$C = \frac{1}{4 * \pi * f_c * Z_o} \text{ [F]} \quad (37)$$

La frecuencia de corte para el cálculo de la inductancia debe ser igual al 13,89% de la frecuencia de conmutación de los IGBT's, de acuerdo con la Ecuación 38.

$$f_c = f_s * 13.89\% \text{ [Hz]} \quad (38)$$

Por lo tanto, el valor de la inductancia esta dado por la Ecuación 39.

$$L_{ref} = \frac{1}{(2\pi * f_c)^2 * C} \quad (39)$$

Para evitar una atenuación en la señal de voltaje, considérese un valor mayor al 3% de la  $L_{ref}$ .

$$L \geq L_{ref} * 3\% \quad (40)$$

- **Conductores**

Los conductores son elementos indispensables dentro de la instalación de un SFVA, ya que transportan la energía eléctrica producida por módulos FV hacia los distintos componentes hasta llegar a las cargas de consumo.

De acuerdo con [9], para la selección de los cables de conexión de un sistema fotovoltaico se deben considerar los siguientes aspectos:

- ❖ El nivel de corriente.
- ❖ La protección del conductor, debido a las condiciones climáticas adversas a las que se expondrán.
- ❖ La caída de tensión entre la entrada y la salida debe estar en el orden del 1 al 5%.

- **Dimensionamiento de conductores**

El dimensionado de los cables de conexión es muy importante al momento de realizar la implementación de un SFVA, debido a que una correcta selección de estos ayudará a evitar pérdidas de energía por las caídas de tensión.

Todos los conductores seleccionados deberán ser capaces de soportar como mínimo un 125% de la corriente nominal de circulación y la caída tensión en estos no deberá sobrepasar los límites de establecidos en la Tabla 8.

Tabla 8 Porcentaje de caída de tensión en conductores.

Línea	% caída de tensión
Generador – Regulador	<3%
Batería – Regulador	<1%
Batería – Inversor	<1%

Fuente: Universidad de Cuenca [9].

- **Cálculo de la sección transversal de conductor**

**Línea Generador – Regulador:** la corriente nominal que circulará por este conductor está determinada por la corriente total de corto circuito de todos los módulos FV que se encuentren conectados en paralelo. Entonces, la corriente máxima de circulación estará dada por la Ecuación 41:

$$I_{nom} = \#módulos\ FV\ en\ paralelo * I_{sc} [A_{dc}] \quad (41)$$

$$I_{máx} = I_{nom} * 1.25 [A_{dc}] \quad (42)$$

Para determinar la caída de tensión en el conductor se utilizará la Ecuación 43.

$$\Delta V = V_{sistema} * 3\% [V_{dc}] \quad (43)$$

Por consiguiente, la sección del conductor estará determinada mediante la Ecuación 44, donde la longitud será de libre elección dependiendo de la instalación.

$$S = \frac{\text{Resistividad de conductor} * \text{Longitud} * I_{máx}}{\Delta V} [mm^2] \quad (44)$$

**Línea Batería – Regulador:** para obtener la corriente nominal se aplica la regla del C20 debido a que las baterías tendrán como máximo un día de autonomía.

$$I_{nom} = \frac{\#baterías\ en\ paralelo * \text{Capacidad de la batería} [Ah]}{20[h]} [A_{dc}] \quad (45)$$

Para obtener la corriente máxima de esta línea se aplica la Ecuación 42.

La caída de tensión para esta línea de conexión debe ser del 1% del voltaje del sistema, como se presenta en la Ecuación 46.

$$\Delta V = V_{sistema} * 1\% [V_{dc}] \quad (46)$$

Para la sección del conductor aplíquese la Ecuación 44.

**Línea Batería – Inversor:** la corriente nominal que circulará por esta línea de conexión estará determinada por la potencia del inversor y su voltaje de salida, tal como se presenta en la Ecuación 47.

$$I_{nom} = \frac{\text{Potencia del inversor} [W]}{\text{Voltaje de salida} [V_{ac}]} [A] \quad (47)$$

Para el valor de la corriente máxima aplíquese la Ecuación 42.

Los valores de caída de tensión y sección del conductor están determinados por las Ecuaciones 46 y 44 respectivamente.

- **Protecciones eléctricas**

Las protecciones deben proteger cada uno de los componentes del SFVA, y deberán ser capaces de soportar al menos el 125% de la corriente máxima presentada en la Ecuación 42, de cada línea de conexión. Este parámetro está dado para el dimensionamiento de fusibles o breaker's.

$$I_{\text{fusible o I}_{\text{breaker}}} = I_{\text{max del conductor}} * 1.25 \text{ [A]} \quad (48)$$

La elección del fusible o breaker se realizará de acuerdo con la disponibilidad de valores comerciales de las protecciones, considerando siempre un valor superior al calculado.

- **Desarrollo de la herramienta de dimensionamiento en Visual Basic**

### **Macros en Excel**




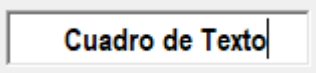

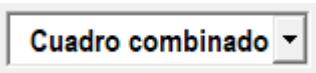

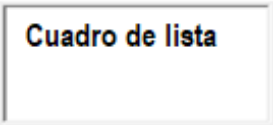





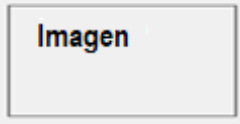

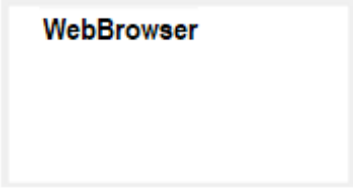

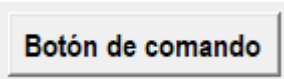
Las macros en Excel permiten automatizar tareas que se realizan reiteradamente, por lo tanto, una macro es una acción o conjunto de acciones que puede ser ejecutada las veces que se requiera; utilizando el lenguaje de programación de Visual Basic [10].

Para realizar el estudio de cargas y determinar cada uno de los parámetros que componen el SFVA se desarrolló un entorno de dimensionamiento a través de Macros y Visual Basic en Excel, utilizando las ecuaciones y criterios mencionados anteriormente.

En el desarrollo de la herramienta de dimensionamiento se debe seguir los siguientes pasos:

- a) Habilitación de la opción de **Programador** en Excel.
- b) Seguidamente, se accede a la herramienta de **Microsoft Visual Basic para Aplicaciones**, en la cual se insertará una cierta cantidad de formularios (interfaz) dependiendo de la aplicación a desarrollar.
- c) Se añaden hojas al libro de Excel con un nombre específico, dependiendo de la necesidad del formulario.
- d) Se procede a realizar el diseño de cada interfaz con el cuadro de herramientas proporcionadas por Visual Basic, como se muestra en la Tabla 9.
- e) Una vez realizado el diseño de cada interfaz, estas tendrán una ventana de programación en la cual se puede desarrollar el algoritmo para cada elemento que consta en el formulario.

Tabla 9 Herramientas de Visual Basic utilizadas para el desarrollo de las interfaces.

HERRAMIENTA	REPRESENTACIÓN	FUNCIÓN
		Permite la escritura de texto en la interfaz y la visualización de resultados de operaciones matemáticas.
		Se utiliza principalmente para el ingreso de datos numéricos y texto.
		Permite la visualización de una lista de datos, que se encuentran en una hoja de Excel.
		Permite la observación de datos de una tabla de Excel.
		Le permite al usuario seleccionar varias opciones.
		Permite seleccionar una opción de varias.
		Permite agregar imágenes a los formularios.
		En caso específico, permite visualizar y navegar a través de archivos pdf.
		Realizan una acción específica de acuerdo con el algoritmo asignado.

Fuente: Microsoft Excel Versión 2009 [10]

Además, se debe tomar en cuenta que para el desarrollo de cada algoritmo es necesario declarar variables de acuerdo con el lenguaje de programación de Visual Basic. El tipo de datos que se utilizó para declarar las variables se presenta en la Tabla 10.



Tabla 10 Tipo de datos utilizados para el desarrollo de los algoritmos.

TIPO DE DATO	FUNCIÓN	SINTAXIS
Integer	Almacena valores numéricos en un rango de -32768 a 32767.	Dim <b>NombreVariable</b> As <b>Integer</b>
Double (decimal doble)	Almacena número de 64 bits y 16 decimales.	Dim <b>NombreVariable</b> As <b>Double</b>
String	Almacena valores de cadenas de texto, es decir, uniones de cualquier tipo de carácter ya sea numérico o no numérico.	Dim <b>NombreVariable</b> As <b>String</b>

Fuente: Microsoft Excel Versión 2009 [10]

El tipo de datos que se mencionan en la Tabla 10, fueron utilizados en todos los algoritmos para almacenar los datos numéricos tanto de los campos de entrada como de los resultados obtenidos. Además, cada uno de los algoritmos desarrollados difieren en el nombre de la variable dependiendo de las ecuaciones a utilizarse.

A continuación, se presenta un corto ejemplo de asignación del tipo dato a una variable, para lo cual es necesario colocar la instrucción “**Option Explicit**” la cual permitirá colocar todas las variables necesarias a utilizar en el algoritmo. Dicha instrucción, debe ser utilizada en todos los algoritmos desarrollados de cada interfaz.

#### ***Option Explicit***

***Dim NombreVariable*** As ***Double***

***Dim NombreVariable1, NombreVariable2*** As ***String***

***Dim NombreVariable3*** As ***Integer***

Para visualizar los resultados en la interfaz se utiliza la herramienta etiqueta la cual se debe configurar con la siguiente línea de código.

***Me.NombreEtiqueta.Caption = NombreVariable***

Los cuadros de textos permiten ingresar datos numéricos y utilizarlos al momento de la programación, también se puede cambiar sus propiedades fondo y texto, como se muestra en la siguiente línea de código.

```

NombreVariable = Me.NombreCuadrodeTexto.Text
NombreCuadrodeTexto.BackColor = vbRed 'Fondo del cuadro de texto
NombreCuadrodeTexto.ForeColor = vbWhite 'Color de texto

```

Para configurar el botón de opción se debe utilizar sentencias condicionales como If e Elseif, como se muestra en el siguiente ejemplo:

```

If NombreBotondeOpcion1 = True Then
Instrucción1
Elseif NombreBotondeOpcion2 = True Then
Instrucción2
Elseif NombreBotondeOpcion3 = True Then
Instrucción3
End If

```

El botón comando **f(x)** permite ejecutar todas las líneas de código antes mencionadas cuando se dé un clic sobre él y realizar las operaciones matemáticas asignadas a cada interfaz. Los demás de botones de comando permitirán realizar las siguientes funciones:

- ❖ Salir de la interfaz
- ❖ Guardar los datos ingresados y resultados obtenidos.
- ❖ Eliminar el texto ingresado.
- ❖ Desplazarse de una interfaz a otra.

Para cargar la lista de nombre en el cuadro combinado, es necesario realizar el siguiente algoritmo:

```

Private Sub UserForm_Initialize()
'muestra la lista de nombres en el cuadro combinado.
Dim Ultimafile As Integer
Dim i As Integer
Dim Nombre As String
Ultimafile = Application.WorksheetFunction.CountA(Sheets("HojaExcel").Range("A:A"))
For i = 2 To Ultimafile
Nombre = Sheets("HojaExcel").Cells(i, 1).Value
Me.CuadroCombinado.AddItem Nombre
Next
End Sub

```

El código antes mencionado se utiliza para leer y seleccionar el nombre de las fichas técnicas que se encuentran en una hoja de Excel específica. Para poder visualizar la ficha técnica elegida se debe realizar el siguiente código:

**Private Sub CuadroCombinado\_Change()**

*'muestra el contenido de la ficha técnica en el WebBrowser*

*Dim Nombre As String*

*Dim RangoMatriz As Range*

*Set RangoMatriz = Sheets("DataInversor").Range("A:B")*

*Nombre = Application.WorksheetFunction.VLookup(Me.ComboBox1.Value, RangoMatriz, 2, 0)*

*Me.WebBrowser1.Navigate Nombre*

**End Sub**

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se han desarrollado catorce ventanas las cuales permiten ingresar parámetros necesarios para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico aislado. En la Figura 18, se presenta la ventana para la realización del estudio de cargas, de la misma manera en el Anexo E (Manual de Usuario) se detallan todas las ventanas que componen la herramienta de dimensionamiento.

Estudio de cargas ×

**ESTUDIO DE CARGAS**

Localidad :

Código	Carga	Cantidad	Potencia [W]	Voltaje [V]	Horas de uso
1	Televisión	1	52	110	3
2	Ventilador	1	65	110	3
3	Equipo de so	1	100	110	1,3
4	Luminarias	5	9	110	4
5	Cargador de c	2	10	110	2
6	Computador p	1	75	110	2
7	Modem	1	18	110	3

Código   
 Carga   Factor de seguridad para cargas pesadas.  
 Cantidad   
 Potencia [W]   
 Voltaje [V]   
 Horas de uso

Consumo diario [Wh]    Demanda máxima [W]  
 Carga =       
 Total =    

Figura 18 Interfaz desarrollada con Macros y Visual Basic.

○ **Resultados de la herramienta de dimensionamiento**

En la Tabla 11, se presentan las cargas eléctricas para cada una de las zonas rurales seleccionadas en el apartado 3.1, por lo que cada aparato eléctrico está considerado para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes tomando en consideración el medio ambiente en el que se ubican sus viviendas y la necesidad de acceso a nuevas tecnologías como las de la información y comunicación. Por otra parte, los resultados presentados en la Tabla 11 demuestran la funcionalidad de la interfaz de dimensionamiento desarrollada para un SFVA.

Tabla 11 Estudio de cargas para tres zonas rurales del Ecuador.

<b>Pedernales</b>					
<b>Cargas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Potencia [W]</b>	<b>Horas de uso</b>	<b>Consumo diario [Wh]</b>	<b>Demanda máxima [W]</b>
Televisión	1	52	3	156	52
Equipo de sonido	1	100	1,3	130	100
Ventilador	1	65	3	195	65
Luminarias	5	9	4	180	9
Cargador de celular	2	10	2	40	10
Computador portátil	1	75	2	150	75
Modem	1	18	3	54	18
Licuada	1	300	0,3	90	900
<b>Ibarra</b>					
Televisión	1	52	1	52	52
Refrigeradora	1	150	24	3600	150
Computador	1	74	3	222	74
Luminarias	6	9	5	270	9
Cargador de celular	1	10	2	20	10
Plancha	1	1200	0,3	360	1200
Licuada	1	600	0,3	180	1800
<b>Cuyabeno</b>					
Televisión	1	52	1	52	52
Equipo de sonido	1	100	3	300	100
Cargador de celular	1	10	2	20	10
Computador portátil	1	75	2	150	75
Módulo internet	1	18	4	72	18
Luminarias	4	9	5	180	36

En la Tabla 12, se muestran los resultados obtenidos de la herramienta de dimensionamiento. En donde se puede observar que para cada una de las zonas rurales

elegidas existe un consumo diario y una demanda máxima distinta, debido a que las cargas eléctricas se han considerado de acuerdo con las necesidades de las viviendas.

Tabla 12 Datos del dimensionamiento

<b>Datos del dimensionamiento</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>Pedernales</b>	<b>Ibarra</b>	<b>Cuyabeno</b>	<b>Unidades</b>
	<b>Valores</b>			
Consumo diario	905	2004	774	Wh
Demanda máxima	375	3340	291	W
Consumo diario sobredimensionado	1086	2404,8	928,8	Wh
Demanda máxima sobredimensionada	450	4008	349,2	W
Voltaje del sistema	12	24	12	Vdc
Hora solar mínima	4,23	4,89	3,78	h
Potencia FV	256,74	491,78	245,71	W

En la Tabla 13, se presentan los resultados de uno de los componentes más importantes dentro de un SFVA, el arreglo fotovoltaico, el cual se encargará de transformar la radiación solar en energía eléctrica. Para cada zona se ha elegido un módulo fotovoltaico de distinta potencia, con el objetivo de reducir el número de paneles. Además, también se muestran los valores reales de voltaje, corriente y potencia que generará el arreglo FV, así como la resistencia y capacitancia necesaria para obtener estos valores en el entorno de Simulink.

Tabla 13 Arreglo fotovoltaico

<b>Arreglo fotovoltaico</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>Pedernales</b>	<b>Ibarra</b>	<b>Cuyabeno</b>	<b>Unidades</b>
	<b>Valores</b>			
Potencia del módulo FV	150	365	270	W
Voltaje en circuito abierto Voc	22,30	47,30	38,45	Vdc
Corriente de corto circuito Isc	8,51	9,62	9,03	Adc
Número de paneles en paralelo	2	2	1	-
Número de paneles en serie	1	1	1	-
Total, de módulos FV	2	2	1	-
<b>Datos obtenidos del Simulink</b>				
Voltaje del Arreglo FV	18,70	39,46	31,44	Vdc
Corriente del Arreglo FV	16,04	18,5	8,59	Adc
Potencia del Arreglo FV	299,95	730,01	270,07	W
Resistencia	1,17	2,13	3,66	Ohms
Capacitor	0,015163	0,008288	0,00483	F

En la Tabla 14, se destaca los parámetros más importantes del regulador de carga, así como también los valores de cada uno de los componentes internos que lo forman y que serán utilizados en el entorno de Simulink de acuerdo con cada zona rural.

Tabla 14 Regulador de carga

<b>Regulador de carga</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>Pedernales</b>	<b>Ibarra</b>	<b>Cuyabeno</b>	<b>Unidades</b>
	<b>Valores</b>			
Voltaje máximo de entrada	150	120	150	Vdc
Corriente de carga nominal	60	40	45	Adc
Potencia nominal	800	1120	600	W
<b>Convertidor reductor</b>				
Ciclo de trabajo	0,64	0,61	0,38	-
Frecuencia de conmutación	20000	20000	20000	Hz
Inductancia	0,000335	0,001104	0,001296	H
Capacitor	0,0000802	0,0000532	0,0000358	F
<b>Convertidor bidireccional</b>				
Frecuencia de conmutación	10000	20000	20000	Hz
Inductancia	0,000194	0,000286	0,0002666	H
Capacitor	0,0258333	0,004166	0,004687	F

En la Tabla 15, se muestran los diferentes parámetros y valores de tres inversores de distinta potencia correspondientes a cada zona rural. Se puede observar, que los valores de los componentes del inversor varían de acuerdo con su potencia pico.

Tabla 15 Inversor

<b>Inversor</b>				
<b>Parámetros</b>	<b>Pedernales</b>	<b>Ibarra</b>	<b>Cuyabeno</b>	<b>Unidades</b>
	<b>Valores</b>			
Potencia de salida	500	5000	400	W
Voltaje de salida	120	120	120	Vac
Eficiencia	93	95	93	%
<b>Convertidor elevador</b>				
Frecuencia de conmutación	20000	20000	20000	Hz
Voltaje de Salida	170	170	170	Vac
Inductancia	0,000006	0,0000214	0,000006	Hz
Capacitor	0,0000186	0,0000172	0,0000186	F
<b>Convertidor elevador</b>				
DC-Link	0,09821	0,01719	0,03683	F
DC-Link1	0,00015	0,00153	0,000120	F
<b>Filtro LC</b>				
Frecuencia del sistema	60	60	60	Hz
Inductancia	0,05310	0,004917	0,06634	H
Capacitor	0,000223	0,002226	0,000178	F
Impedancia	57,80	5,78	72,25	ohms

En la Tabla 16, se refleja la capacidad en Ah/día que necesitan cada uno de los SFVA de las diversas zonas, así como la cantidad de baterías totales para satisfacer la demanda en un día de autonomía.

Tabla 16 Baterías.

Baterías				
Parámetros	Pedernales	Ibarra	Cuyabeno	Unidades
	Valores			
Ah/día	997,31	105,47	83,23	Ah/día
Días de autonomía	1	1	1	días
Profundidad de descarga	50	50	50	%
Capacidad de la batería	100	105	105	Ah
Voltaje de la batería	12	12	12	Vdc
Baterías en paralelo	2	2	2	-
Baterías en serie	1	2	1	-
Baterías totales	2	4	2	-
Sistema de almacenamiento - SIMULINK				
Voltaje nominal	12	24	12	Vdc
Capacidad del sistema	200	210	210	Ah
Estado de carga inicial	60	50	50	%

De acuerdo con los resultados obtenidos de la zona de Pedernales, Ibarra y Cuyabeno se puede observar en las Tablas que los valores de cada uno de los componentes que forman parte del SFVA se encuentran en función del estudio de cargas, es decir, del consumo diario total y la demanda máxima total.

### 3.3 Algoritmo de control

- **Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT)**

La carga recibirá la máxima potencia del módulo fotovoltaico, cuando este opere en su punto más alto de potencia, como se presenta en la Figura 19.

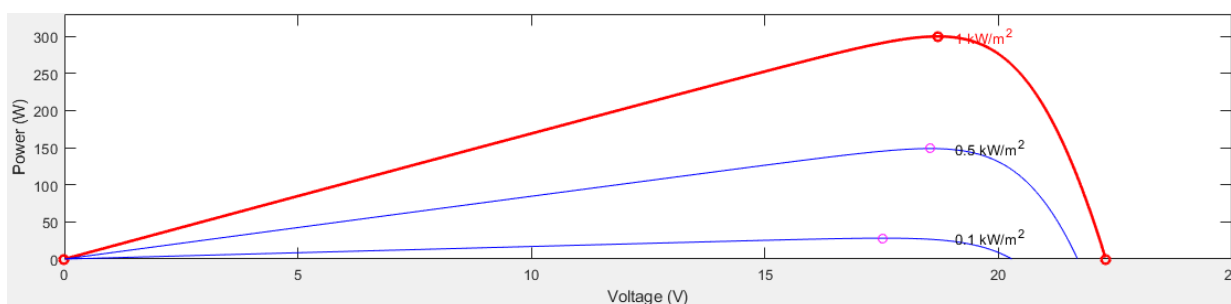


Figura 19 Curva de máxima potencia de un panel fotovoltaico a 1 [kW/m²].

Para obtener el punto de máxima potencia se realizan técnicas de control mediante algoritmos denominados MPPT (Seguidor del Punto de Máxima Potencia). Los algoritmos que pueden ser aplicados son:

- ❖ Algoritmo de Perturbar y Observar (P&O)
- ❖ Algoritmo de Conductancia Incremental (InCOnd)
- ❖ Control de Lógica Difusa (FLC)

Para la simulación del regulador de carga, se utilizará el algoritmo P&O por ser el uno de los métodos más efectivos [11], ya que utiliza sensores de voltaje y corriente para determinar la potencia exacta que entregan los módulos fotovoltaicos, como se muestra en la Figura 20.

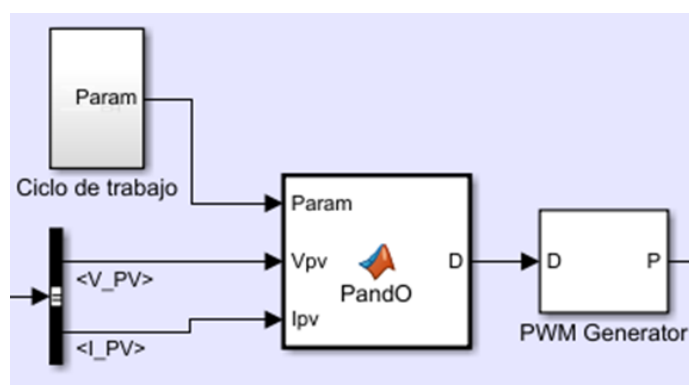


Figura 20 Algoritmo de Perturbar & Observar.

En la simulación, este algoritmo (Ver Anexo B) ajusta el ciclo de trabajo de un convertidor reductor con la finalidad de modificar los valores de voltaje y corriente para alcanzar el punto de máxima potencia.

En la Figura 21, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo P&O en donde los valores de tensión y corriente del arreglo FV permiten calcular la potencia de salida. De esta manera, si la potencia presenta perturbaciones por cambios en la temperatura o la radiación solar, el voltaje de los módulos se incrementará o disminuirá con el único fin de obtener siempre la máxima potencia.



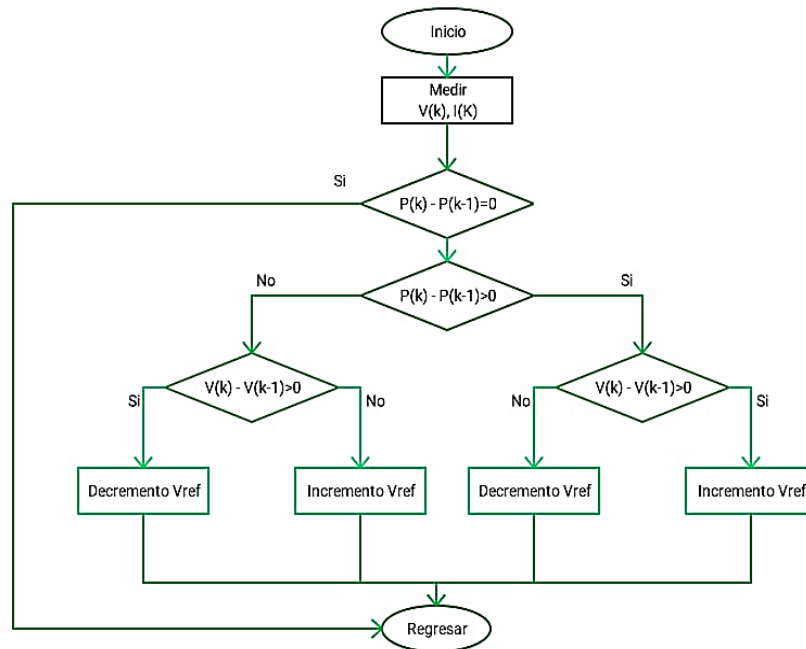


Figura 21 Diagrama de flujo del algoritmo de Perturbar & Observar.

- **Control Proporcional Integral Discreto (PI)**

Este tipo de control permite corregir y compensar las perturbaciones para mantener la variable de voltaje y corriente en los parámetros ya establecidos para la carga y descarga de la batería.

El sistema de almacenamiento está compuesto por tres controles proporcional integral, que cumplirán las siguientes funciones:

- El control de corriente gobernará la acción de los IGBT's del convertidor bidireccional presentado en el apartado 3.2 correspondiente al regulador, para la carga y descarga de la batería, como se muestra en la Figura 22.

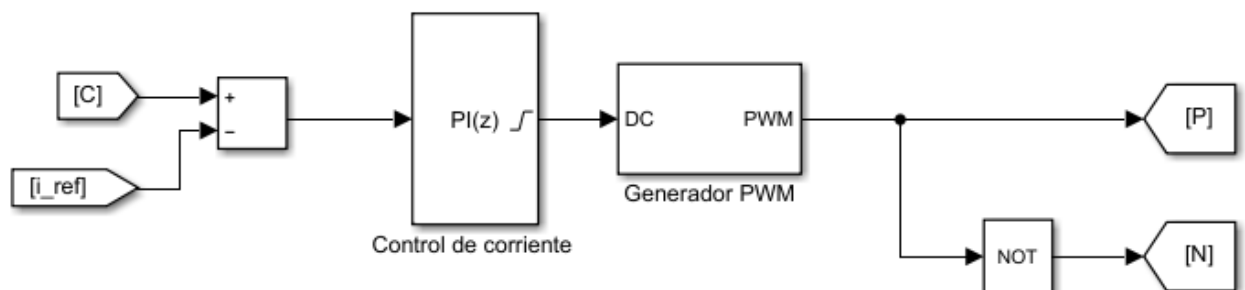


Figura 22 Control PI discreto para control de IGBT's.

- El control del voltaje de carga que se muestra en la Figura 23, permitirá obtener una corriente de referencia para la carga de las baterías. Se debe considerar, que de acuerdo con la capacidad de la batería se establecerá la corriente de carga.

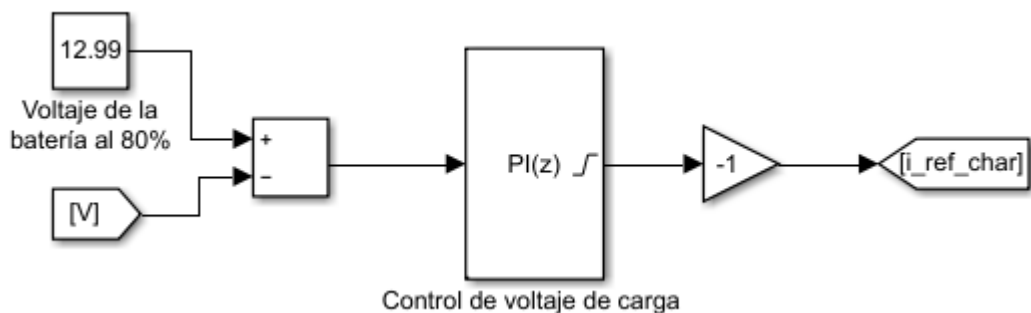


Figura 23 Control PI discreto para control del voltaje de carga.

- c) El control del voltaje de descarga que se presenta en la Figura 24, permitirá obtener una corriente de referencia para la descarga de las baterías, de tal manera que sea capaz de permitir el funcionamiento del inversor.

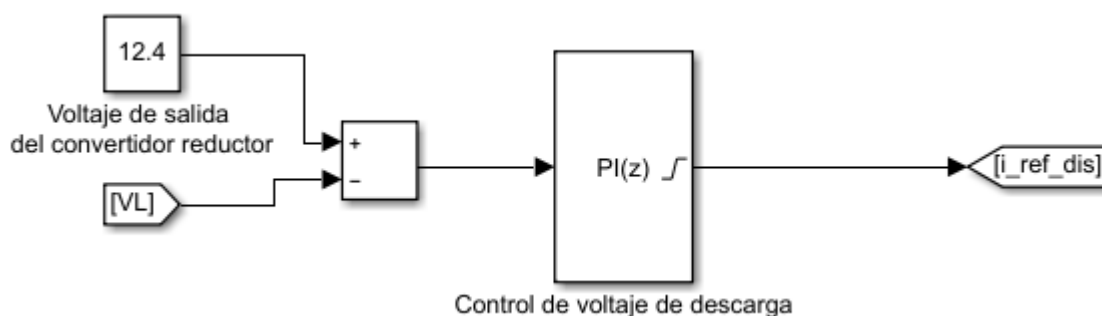


Figura 24 Control PI discreto para el control del voltaje de descarga.

Para la sintonización de cada controlador PI discreto se utilizó el método de prueba y error, en donde se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 17, los cuales no deben ser modificados y deberán ser utilizados en cualquier dimensionamiento.

Tabla 17 Valores para los controles PI discretos de la batería.

<b>Control PI discreto de corriente</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Proporcional (P)	0.005	S
Integral (I)	10	S
<b>Control PI discreto de voltaje de carga</b>		
Proporcional (P)	40	S
Integral (I)	70	S
<b>Control PI discreto de voltaje de descarga</b>		
Proporcional (P)	0.25	S
Integral (I)	50	S

### 3.4 Pruebas de funcionamiento

El esquema eléctrico del SFVA para la obtención de las curvas de las distintas zonas rurales del Ecuador, se puede observar en el Anexo C. Además, las curvas presentadas en cada caso de estudio poseen un tiempo de estabilización de aproximadamente 100 milisegundos.

- **Caso de estudio 1: sitio Pedernales**

El diagrama de bloques para este caso de estudio se puede observar en el Anexo D.1.

- **Curvas del Arreglo fotovoltaico**

En la Figura 25, se muestra la curva del voltaje máximo con un valor de 18,49 [Vdc] que se obtiene del arreglo fotovoltaico de la zona de Pedernales, el cual se ha simulado con una irradiancia de 1000 [W/m<sup>2</sup>].

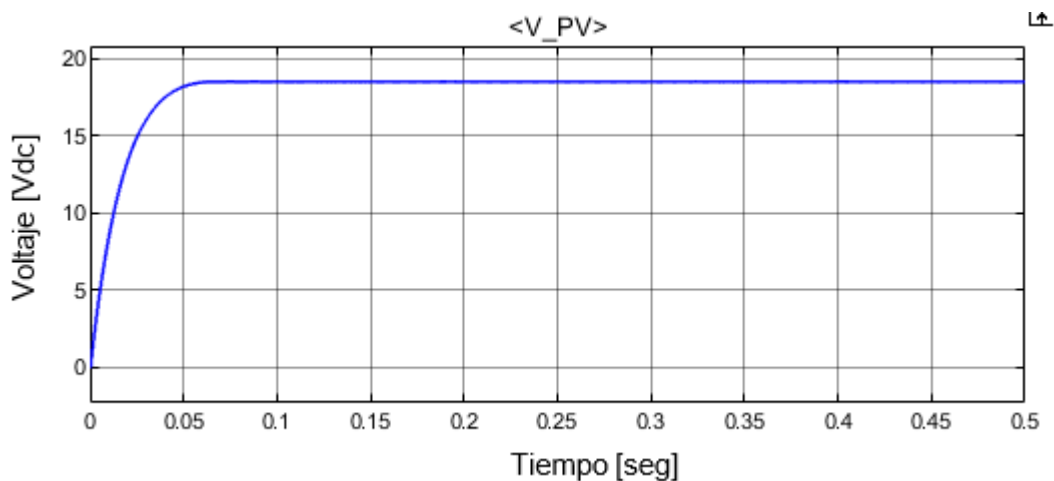


Figura 25 Voltaje del arreglo fotovoltaico de Pedernales.

De igual manera, en la Figura 26 se exhibe la curva de la corriente máxima con un valor de 16,2 [Adc] que se obtiene del arreglo fotovoltaico de la zona de Pedernales, el cual se ha simulado con una irradiancia de 1000 [W/m<sup>2</sup>].

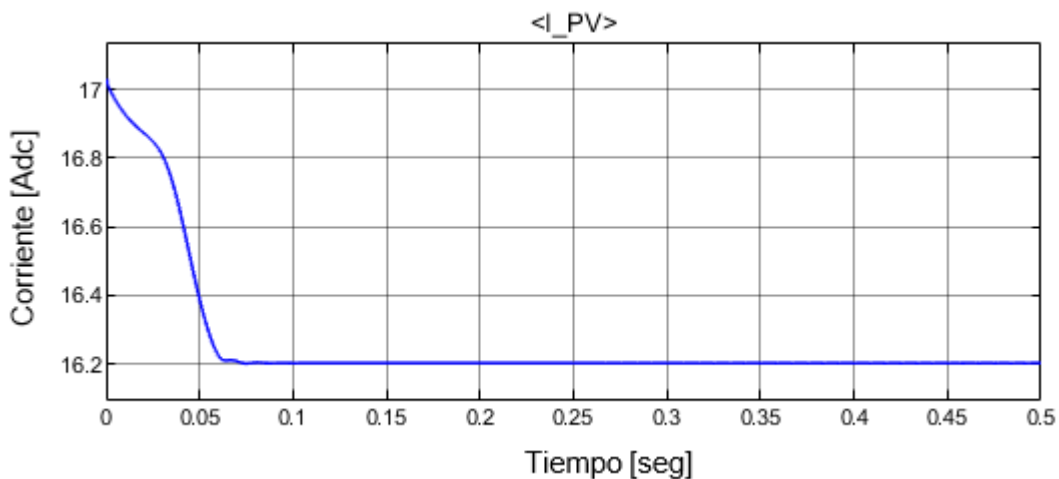


Figura 26 Corriente del arreglo fotovoltaico de Pedernales.

En la Figura 27, se presenta la curva de potencia máxima FV con un valor de 299,6 [W] que se obtiene del arreglo fotovoltaico de la zona de Pedernales, cuando la irradiancia es de 1000 [W/m<sup>2</sup>]. La potencia FV mínima que se debe producir para esta zona es de 256,74 [W] de acuerdo con los datos de la Tabla 12.

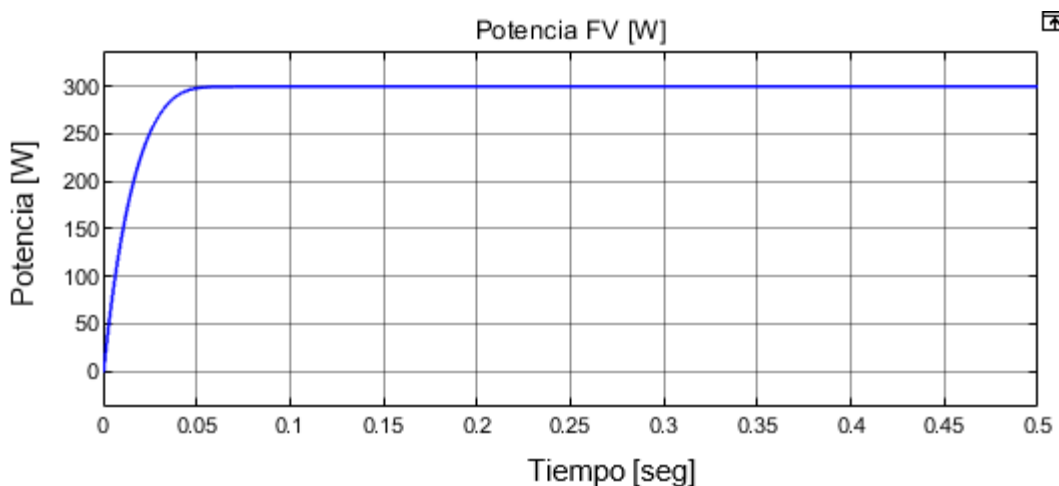


Figura 27 Potencia FV del arreglo fotovoltaico de Pedernales.

#### ○ Curvas del inversor monofásico

En la Figura 28, se presenta la curva de voltaje del inversor monofásico para la zona de pedernales. El valor pico obtenido en la simulación es de 174 [Vac], con lo cual se obtendrá un voltaje eficaz de 118,3 [Vrms]. De acuerdo con el inversor físico elegido para esta zona se considera una tolerancia de  $\pm 3\%$  del voltaje de salida.

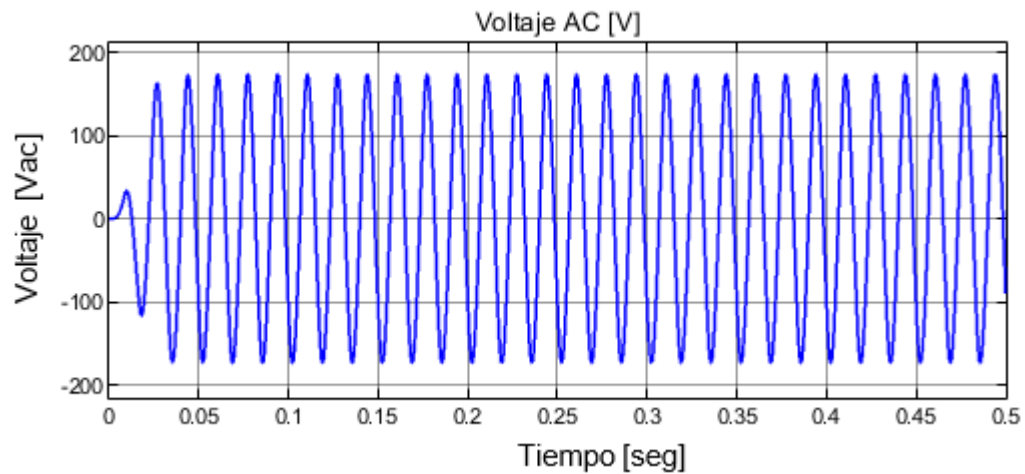


Figura 28 Voltaje AC del inversor de Pedernales.

En la Figura 29, se exhibe la curva de corriente del inversor monofásico para la zona de Pedernales con un valor pico de 3,01 [Aac].

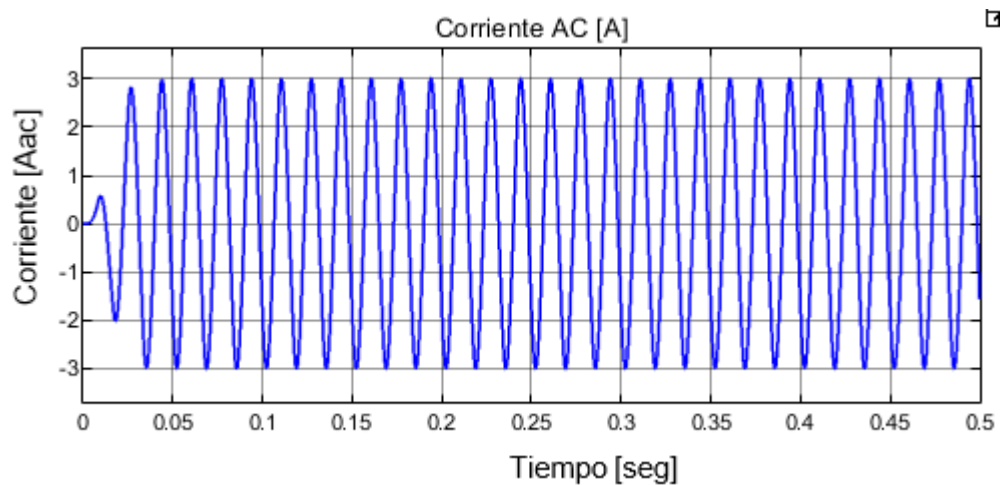


Figura 29 Corriente AC del inversor de Pedernales.

Dicha corriente es necesaria para obtener una potencia de 497,70 [W] que se puede observar en la curva obtenida en la Figura 30, y con la cual se puede satisfacer la demanda máxima en esta zona que es de aproximadamente 450 [W] de acuerdo con la Tabla 12.

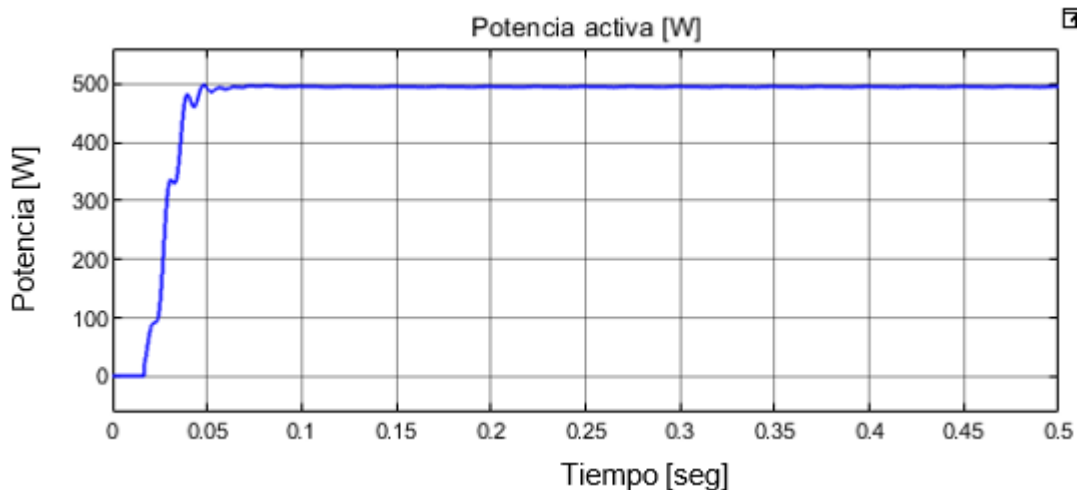


Figura 30 Potencia AC del inversor de Pedernales.

En la Tabla 18, se presenta los datos obtenidos de voltaje, corriente y potencia en la zona de pedernales cuando se varía el parámetro de la irradiación del arreglo fotovoltaico mientras la temperatura permanece constante a los 25 [°C].

Tabla 18 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para Pedernales.

Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	Voltaje [Vdc]	Corriente [A dc]	Potencia [W]
1000	18,49	16,2	299,6
900	17,35	15	260,1
800	15,63	13,46	210,4
700	13,78	11,81	162,7
600	11,86	10,14	120,2
500	9,89	8,46	83,72
400	7,93	6,78	53,72

- **Caso de estudio 2: sitio Ibarra**

El diagrama de bloques para este caso de estudio se puede observar en el Anexo D.2.

- **Curvas del arreglo fotovoltaico**

En la Figura 31, se puede observar la curva del voltaje máximo que se obtiene del arreglo fotovoltaico para la zona de Ibarra. El valor obtenido es de 36,01 [Vdc] a una irradiancia de 1000 [W/m<sup>2</sup>].

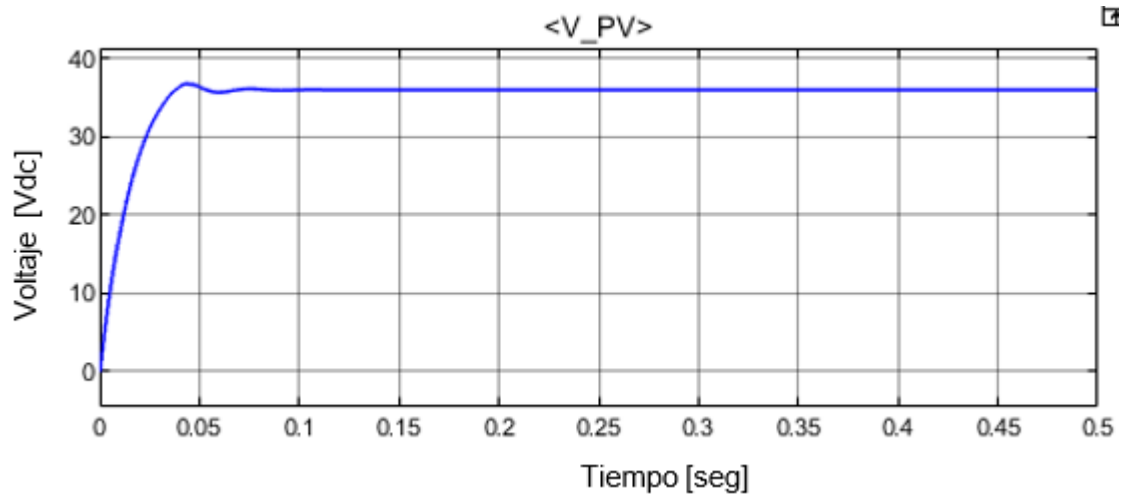


Figura 31 Voltaje del arreglo fotovoltaico de Ibarra.

De igual manera, en la curva de la Figura 32, se muestra la corriente máxima de salida del arreglo de módulos FV para la zona de Ibarra con un valor de 19,17 [Adc].

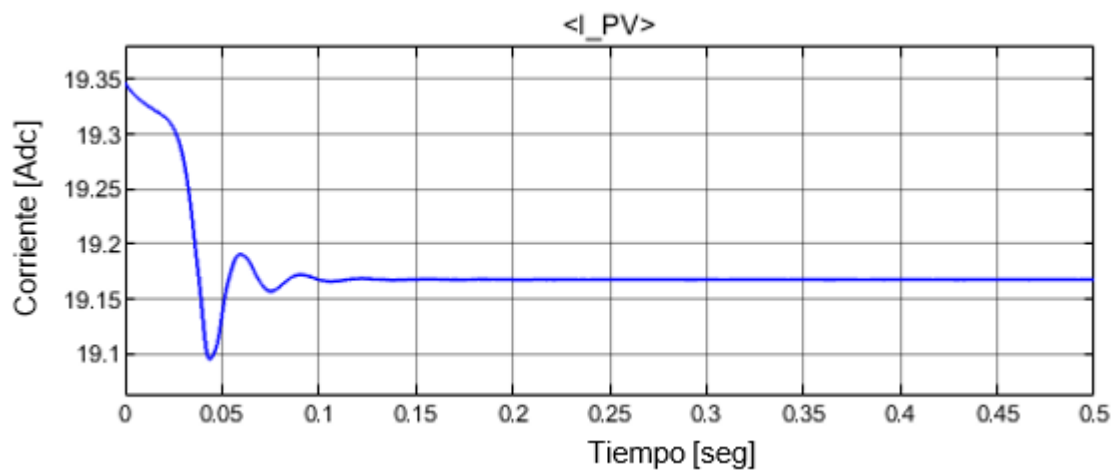


Figura 32 Corriente del arreglo fotovoltaico de Ibarra.

La potencia del arreglo fotovoltaico para la zona de Ibarra es de aproximadamente 690,20 [W] como se puede observar en la curva de la Figura 33. La potencia FV mínima que se debe producir para esta zona es de 491,78 [W] de acuerdo con los datos de la Tabla 12.

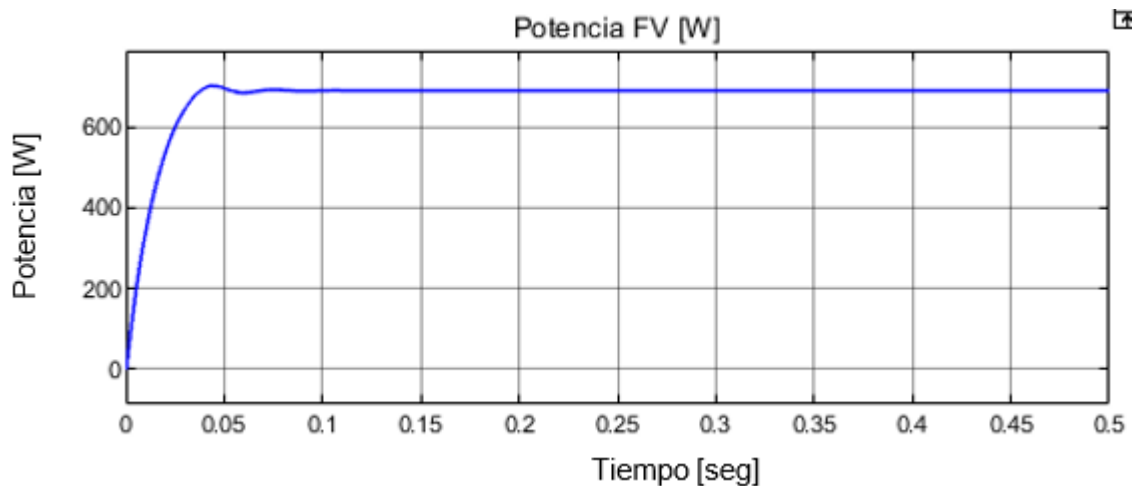


Figura 33 Potencia del arreglo fotovoltaico de Ibarra.

#### ○ Curvas del inversor monofásico

En la Figura 34, se presenta la curva del voltaje pico obtenido en la simulación del inversor monofásico para la zona de Ibarra, con un valor alcanzado de 159,3 [Vac], con lo cual el voltaje rms obtenido es de 109,2 [Vrms]. Considerando que en la ficha técnica del inversor físico elegido para esta zona el voltaje de salida se encuentra en el rango de los 100 a 120 [VAC].

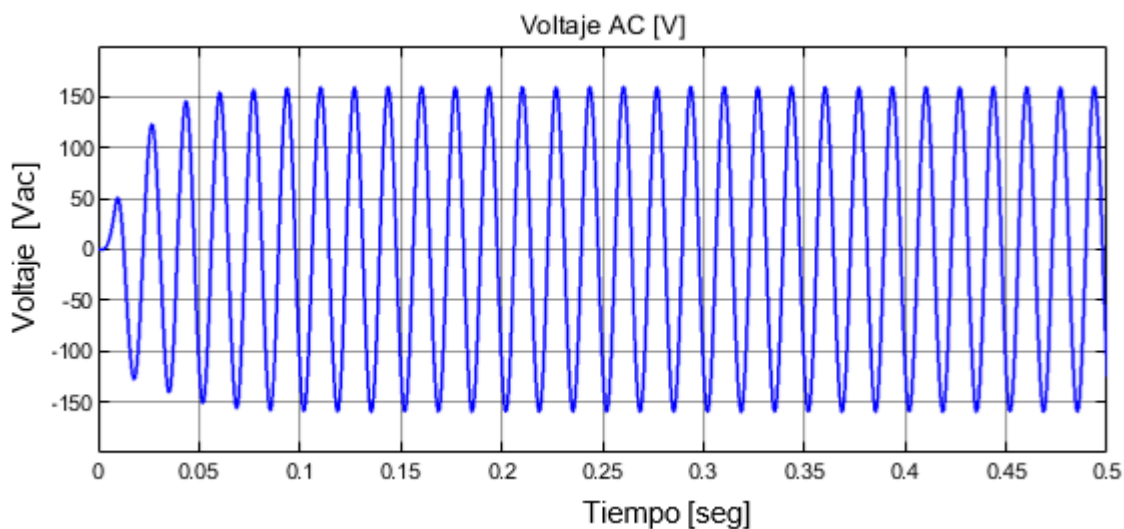


Figura 34 Voltaje AC del inversor de Ibarra.

De igual manera, en la Figura 35 se muestra la curva de corriente obtenida en la simulación para la zona de Ibarra, cuyo valor pico es de 27,57 [Aac].



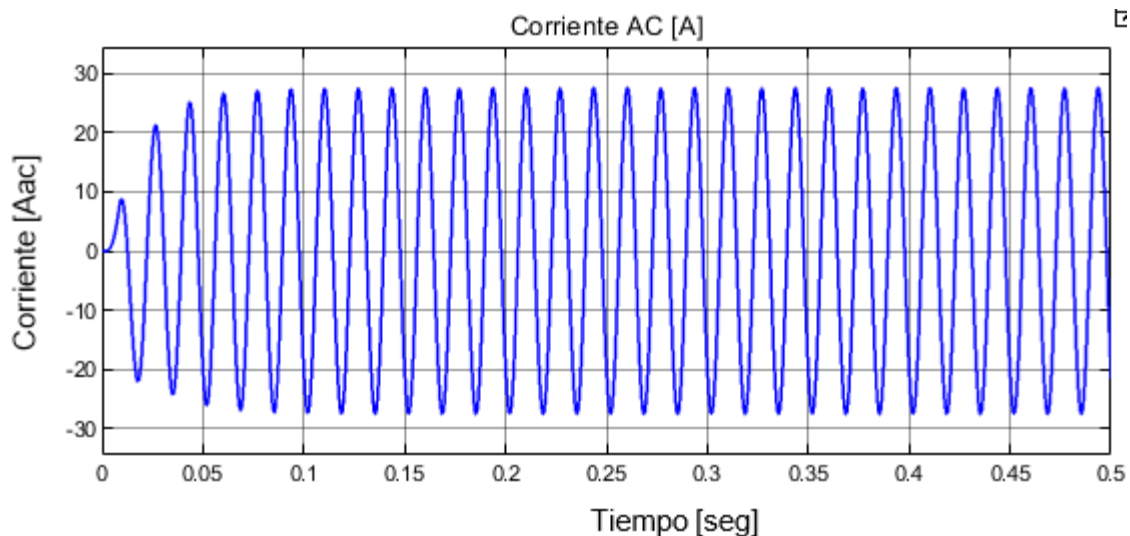


Figura 35 Corriente AC del inversor de Ibarra.

La corriente obtenida, permite obtener una potencia de salida en el inversor de aproximadamente 4359 [W], tal y como se puede observar en la Figura 36. De esta forma, se puede satisfacer la demanda máxima para esta zona que se encuentra en el orden de los 4008 [W] de acuerdo con los datos de la Tabla 12.

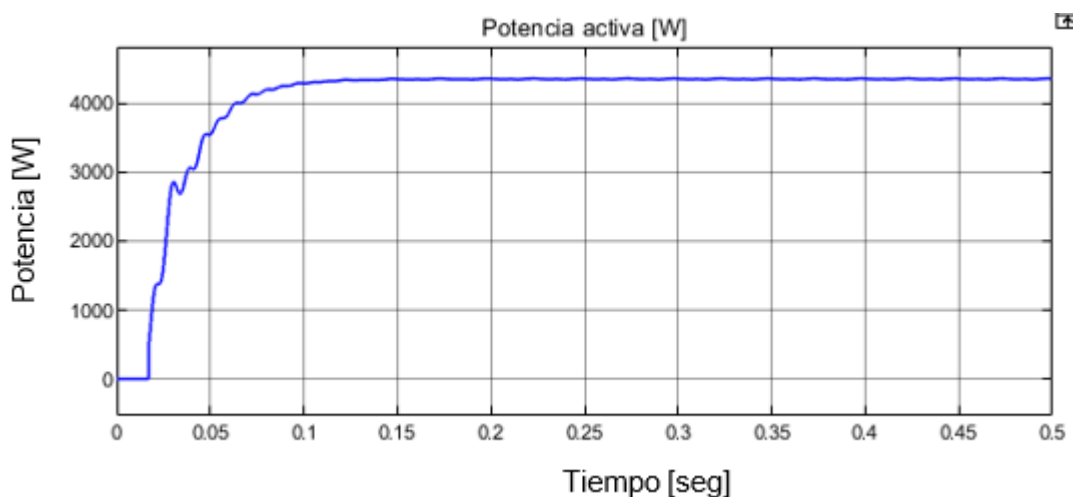


Figura 36 Potencia AC del inversor de Ibarra.

En la Tabla 19, se presenta los datos obtenidos de voltaje, corriente y potencia cuando se varía el parámetro de la irradiación del arreglo fotovoltaico de la zona de Ibarra, mientras la temperatura permanece constante a 25 [°C].

Tabla 19 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para Ibarra.

Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	Voltaje [Vdc]	Corriente [Adc]	Potencia [W]
1000	36,01	19,17	690,20
900	35,78	17,27	617,90
800	32,68	15,43	504,10
700	28,71	13,52	388,20
600	24,69	11,59	286,3
500	20,58	9,66	198,9
400	16,47	7,73	127,3

- **Caso de estudio 3: sitio Cuyabeno**

El diagrama de bloques para este caso de estudio se puede observar en el Anexo D.3.

- **Curvas del arreglo fotovoltaico**

En la Figura 37, se observa la curva del voltaje máximo obtenido del arreglo fotovoltaico para la zona del Cuyabeno. El voltaje se encuentra en el orden de los 31,29 [Vdc] a una irradiancia de 1000 [W/m<sup>2</sup>].

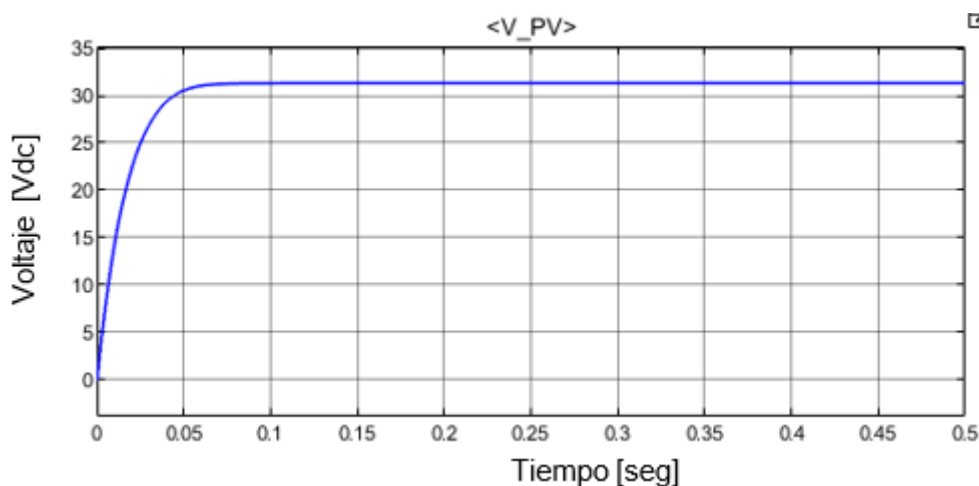


Figura 37 Voltaje del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.

La curva de corriente máxima que se obtiene del arreglo de paneles FV para la zona del Cuyabeno, se presenta en la Figura 38, con un valor de 8,62 [Adc].

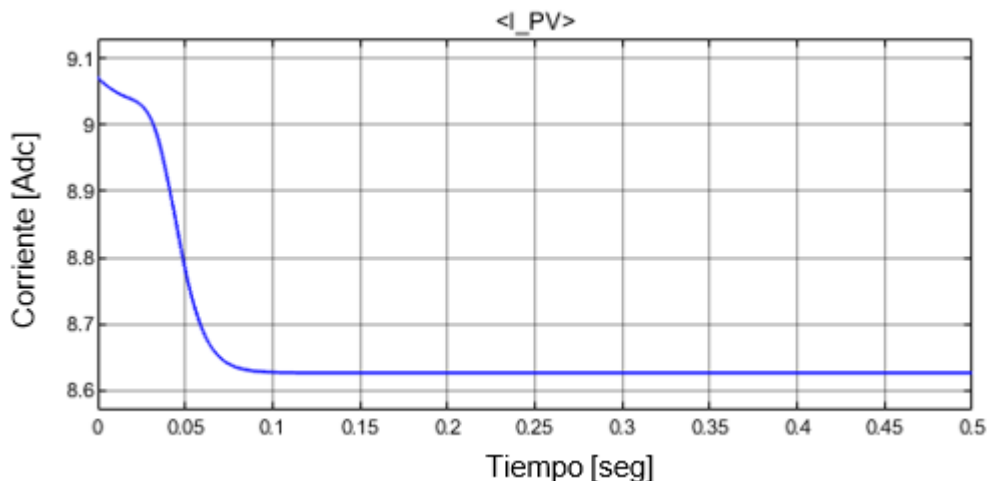


Figura 38 Corriente del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.

En la Figura 39, se presenta la curva de potencia FV máxima obtenida en la simulación con un valor de 269,9 [W], ya que lo mínimo que se debe producir de potencia FV es 245,71 [W] de acuerdo con los datos de las Tabla 12.

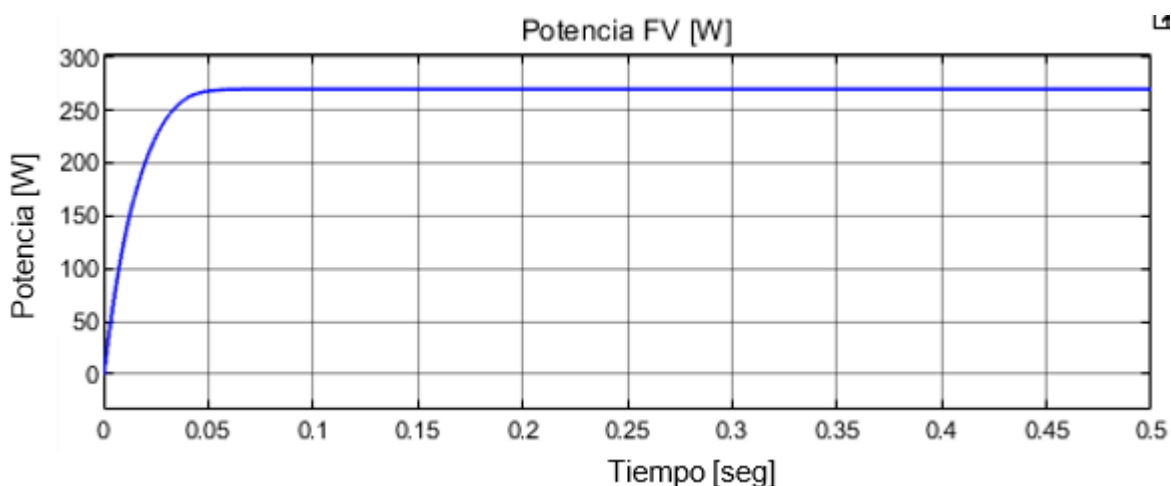


Figura 39 Potencia del arreglo fotovoltaico del Cuyabeno.

#### ○ **Curvas del inversor monofásico**

En la Figura 40, se muestra la curva de voltaje pico del inversor monofásico de la zona del Cuyabeno. El valor obtenido en la simulación es de 182,9 [Vac], con lo cual, le voltaje rms es de 120,5 [Vrms], de acuerdo con el inversor físico elegido para esta zona se considera una tolerancia de  $\pm 3\%$  del voltaje de salida.

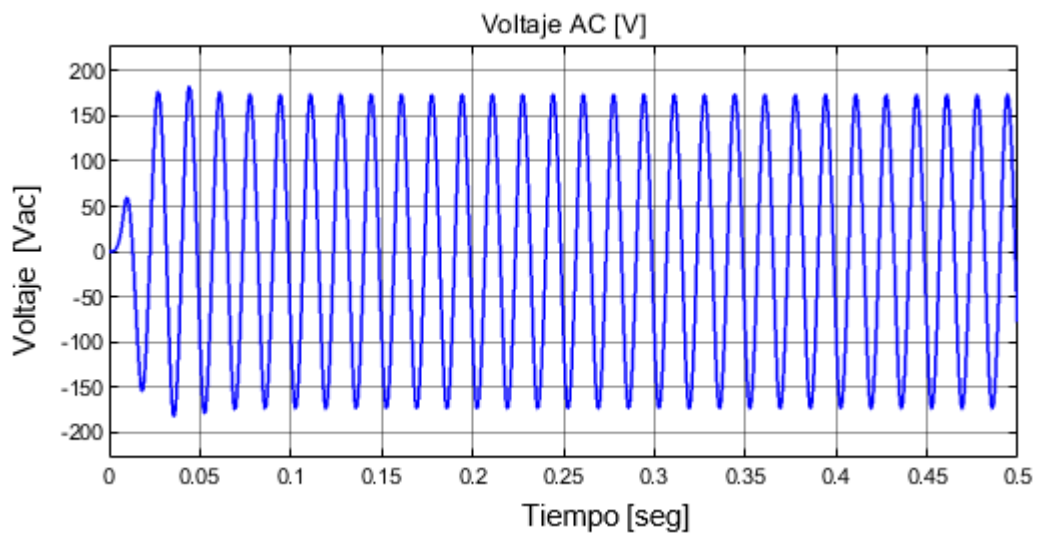


Figura 40 Voltaje AC del inversor del Cuyabeno.

La curva de corriente del inversor monofásico para la zona del Cuyabeno se puede observar en la Figura 41, la cual posee un valor de 2,53 [Aac].

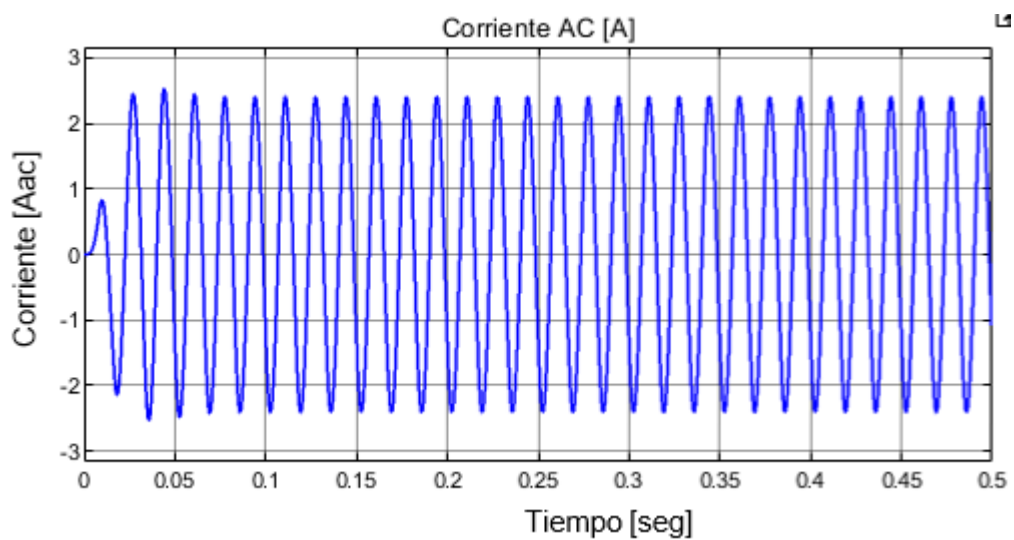


Figura 41 Corriente AC del inversor del Cuyabeno.

A la salida del inversor la potencia pico es de 401,9 [W], tal y como se muestra en la Figura 42. De esta manera, se puede satisfacer la demanda máxima de 349,2 [W] de acuerdo con los datos de la Tabla 12.

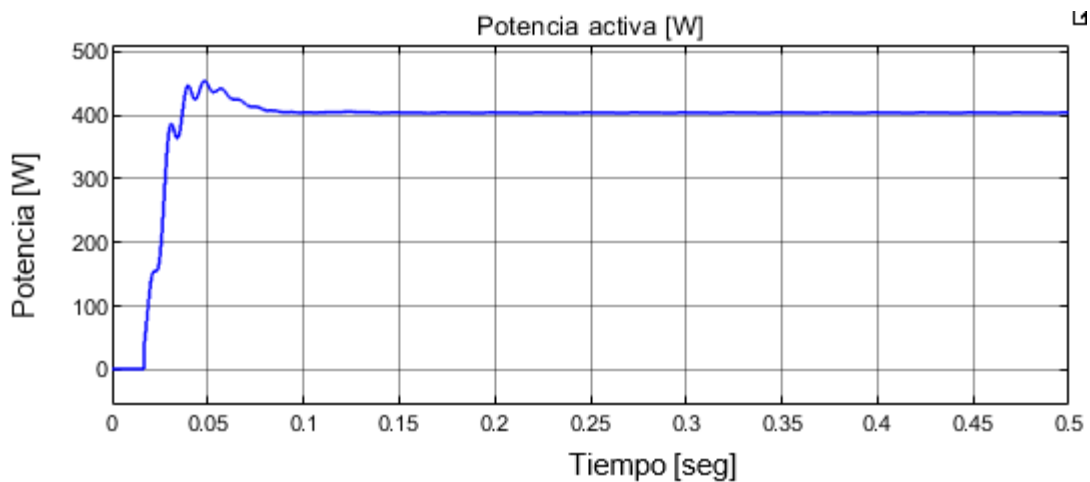


Figura 42 Potencia AC del inversor del Cuyabeno.

En la Tabla 20, se presenta los datos obtenidos de voltaje, corriente y potencia cuando se varía el parámetro de irradiación del arreglo fotovoltaico correspondiente a la zona del Cuyabeno, mientras la temperatura permanece constante a 25 [°C].

Tabla 20 Datos obtenidos a diferentes niveles de irradiancia para el Cuyabeno.

Irradiación [W/m <sup>2</sup> ]	Voltaje [Vdc]	Corriente [Adc]	Potencia [W]
1000	31,29	8,62	269,9
900	29,19	8,04	234,7
800	26,22	7,22	189,3
700	23,01	6,33	145,6
600	19,77	5,43	107,3
500	16,51	4,52	74,69
400	13,25	3,62	47,99

Para la correcta utilización de la herramienta de dimensionamiento, se detalla el manual de usuario que se encuentra en el Anexo E.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- A través de la simulación realizada se pudieron conocer las posibilidades y beneficios que ofrece la energía solar fotovoltaica en zonas rurales del Ecuador. Dicha simulación corresponde una herramienta adecuada para un estudio previo a la implementación de este tipo de sistemas de generación renovable.
- El trabajo realizado puede ser considerado para el desarrollo de futuros estudios de simulación y posteriormente implementación de sistemas fotovoltaicos aislados, en especial para las zonas rurales del Ecuador en donde la falta de acceso a la energía eléctrica limita el desarrollo de otras tecnologías como son las de la información y comunicación.
- El algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) permitirá obtener siempre el pico de potencia del arreglo fotovoltaico, lo cual evitará fluctuaciones en la potencia por cambios en parámetros como la irradiación, debido a que el recurso solar es variable durante el día.
- El regulador de carga MPPT simulado permitió obtener voltajes y corrientes óptimas para el sistema de almacenamiento, de tal manera que se evitó sobretensiones o sobre corrientes, garantizando la estabilidad de los parámetros de la batería.
- El controlador PI discreto desarrollado permite controlar únicamente la carga y descarga de las baterías, permitiendo compensar las perturbaciones para mantener las variables de voltaje y corriente en los parámetros ya establecidos.
- La herramienta de dimensionamiento desarrollada en Macros y Visual Basic de Excel facilitará el estudio de sistemas fotovoltaicos aislados a los estudiantes de la materia de Energías Alternativas de la carrera de Tecnología Superior Electromecánica de la ESFOT debido a su interfaz sencilla y eficiente.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, se determina que la región Sierra presenta un mayor consumo de energía eléctrica debido a que en muchos casos los aparatos eléctricos utilizados en las viviendas rurales no cumplen con estándares de uso eficiente de la energía por que han superado su tiempo de vida útil.

- Los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas en el software Matlab/Simulink se consideran como valores ideales, debido a que las pérdidas por autoconsumo de potencia de los elementos del sistema fotovoltaico aislado y transporte de la energía a través de conductores eléctricos no son modelados por el entorno.
- La potencia fotovoltaica obtenida mediante la herramienta de simulación desarrollada es diferente en cada una de las zonas estudiadas, debido a las características de los sitios en cuanto a recurso solar y demanda.
- La potencia fotovoltaica en la zona de Ibarra es de 491,78 [W] siendo el valor más alto en comparación a los otros dos casos de estudio (Pedernales y Cuyabeno [valor]), esto se debe a que el consumo diario en esta localidad se incrementa por la cantidad de cargas eléctricas consideradas y además por el recurso solar disponible.

#### 4.2 Recomendaciones

- La cantidad de módulos para el arreglo fotovoltaico deberá considerarse en medida de lo posible de forma par (2 módulos, 4 módulos, etc.), con el objetivo de obtener una conexión en serie y paralelo, de esta manera si un módulo falla el sistema tendrá la posibilidad de seguir su funcionamiento con las limitaciones del caso.
- El control para la carga y descarga de la batería servirá como una pauta para el desarrollo de futuros estudios en los que se puede desarrollar métodos de control mucho más precisos y eficientes.
- Para la simulación de inversores monofásicos en el entorno de Simulink, se recomienda la obtención de valores pico de voltaje, corriente y potencia de tal manera que el sistema se acerque en la medida de lo posible a un funcionamiento real.
- En la simulación del inversor monofásico en la parte del filtro LC (inductancia - capacitor) se debe considerar un valor de inductancia mayor al 3% del valor calculado, con el objetivo de evitar una atenuación en la onda senoidal de voltaje y corriente.
- En futuros estudios que se realicen en torno a sistemas fotovoltaicos aislados se deberá considerar las pérdidas que se pueden generar en cada uno de los elementos del sistema.

- El desarrollo de la herramienta de dimensionamiento a través de Macros y Visual Basic de Excel se puede considerar en un futuro para el perfeccionamiento de un software que le permita al usuario y la empresa de distribución eléctrica obtener de manera rápida, eficiente y segura el dimensionamiento completo de cualquier sistema fotovoltaico.
- Los resultados obtenidos en la herramienta de dimensionamiento deberán ser guardados a medida que se realice cada uno de los cálculos, de tal manera que se pueda obtener un informe final detallado que permita la simulación o implementación del sistema.
- En el entorno de simulación se deberá colocar los resultados obtenidos en la herramienta de simulación, por ningún motivo se agregará o eliminará componentes ya que puede provocar un incorrecto funcionamiento del sistema fotovoltaico aislado.



## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Instituto Tecnológico de Canarias, «Energías Renovables,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>.
- [2] E. Rosero, «Energías Renovables,» Agosto 2011. [En línea]. Available: [https://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Ecuador\\_Producto\\_1\\_y\\_2\\_\\_Esp\\_\\_02.pdf](https://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Ecuador_Producto_1_y_2__Esp__02.pdf).
- [3] C. Uzquiano, M. Sullivan y X. Sandy, «Capacitación e instalación de sistemas fotovoltaico en las comunidades de Carmen del Emero y Yolosani,» Wildlife Conservation Society, Bolivia, 2015.
- [4] Subsecretaría de Energía Eléctrica, «Energías Renovables 2008 - Energía Solar,» Secretaría de Energía, Argentina, 2008.
- [5] W. V. Astudillo Calderón y O. M. Lema Galarza, «Simulación de un Sistema Fotovoltaico Residencial con Regulación de Potencia Inyectada a la Red,» Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca , 2017.
- [6] CONELEC, «Aspectos de sustentabilidad y sostenibilidad social y ambiental,» Ministerio de Electricidad y Energía Renovable , Ecuador, 2013.
- [7] European Commission, «Photovoltaic Geographical Information System,» 15 octubre 2019. [En línea]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/#MR](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/#MR). [Último acceso: 18 Mayo 2020].
- [8] R. Buitrón y G. Burbano , «Elaboración de una normativa para el diseño y diagnóstico de sistemas fotovoltaicos residenciales autónomos para el Ecuador,» Quito , 2010.
- [9] L. G. Macancela Zhumi, «Diagnóstico de la implementación de los sistemas fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del proyecto Yantsa ii Etsari,» Universidad de Cuenca, Cuenca, 2012.
- [10] Microsoft, «VAB en Office,» Microsoft, 14 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/office/vba/library-reference/concepts/getting-started-with-vba-in-office>. [Último acceso: 15 Julio 2020].
- [11] The MathWorks, Inc., «Diseño de control de electrónica de potencia con Simulink,» 1994. [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/mppt-algorithm.html?s\\_tid=srchtitle](https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/mppt-algorithm.html?s_tid=srchtitle). [Último acceso: 18 Junio 2020].
- [12] Corporación para la Investigación Energética, «Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica,» Quito, 2008.
- [13] Departamento de Infraestructura y Energía del BID, «Como electrificar el campo en Ecuador,» Ecuador, 2019.

- [14] ARCONEL, «Microgeneración fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica,» Quito, 2018.
- [15] CONELEC, «Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022,» Cuenca , 2013.
- [16] B. Guirau, F. Marcato y W. Pereira, «Circuito microinversor aplicado a sistemas fotovoltaicos autónomos,» Universidade São Francisco, Campinas(SP), 2015.
- [17] A. Barrenetxea , «Sistema fotovoltaico aislado: Inversor monofásico,» Universidad Pública de Navarra, Pamplona, 2014.
- [18] D. O. Cardozo Sarmiento, «Simulación de un Sistema Fotovoltaico Aislado en Matlab/Simulink,» Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta , 2018.
- [19] W. Mereles y J. Vera, «Modelo de Simulación para Sistema Fotovoltaicos Autónomos en entorno MATLAB/SIMULINK,» Centro de Investigación Facultad Politécnica - UNE, Asunción , 2009.
- [20] A. D. Cuenca Sánchez, Fiabilidad de la generación eléctrica con energías renovables en la provincia de Loja-Ecuador, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2015.

## 6 ANEXOS

**ANEXO A:** Mapa Solar de radiación global del Ecuador.

**ANEXO B:** Parámetros y código del algoritmo de Perturbar y Observar (P&O).

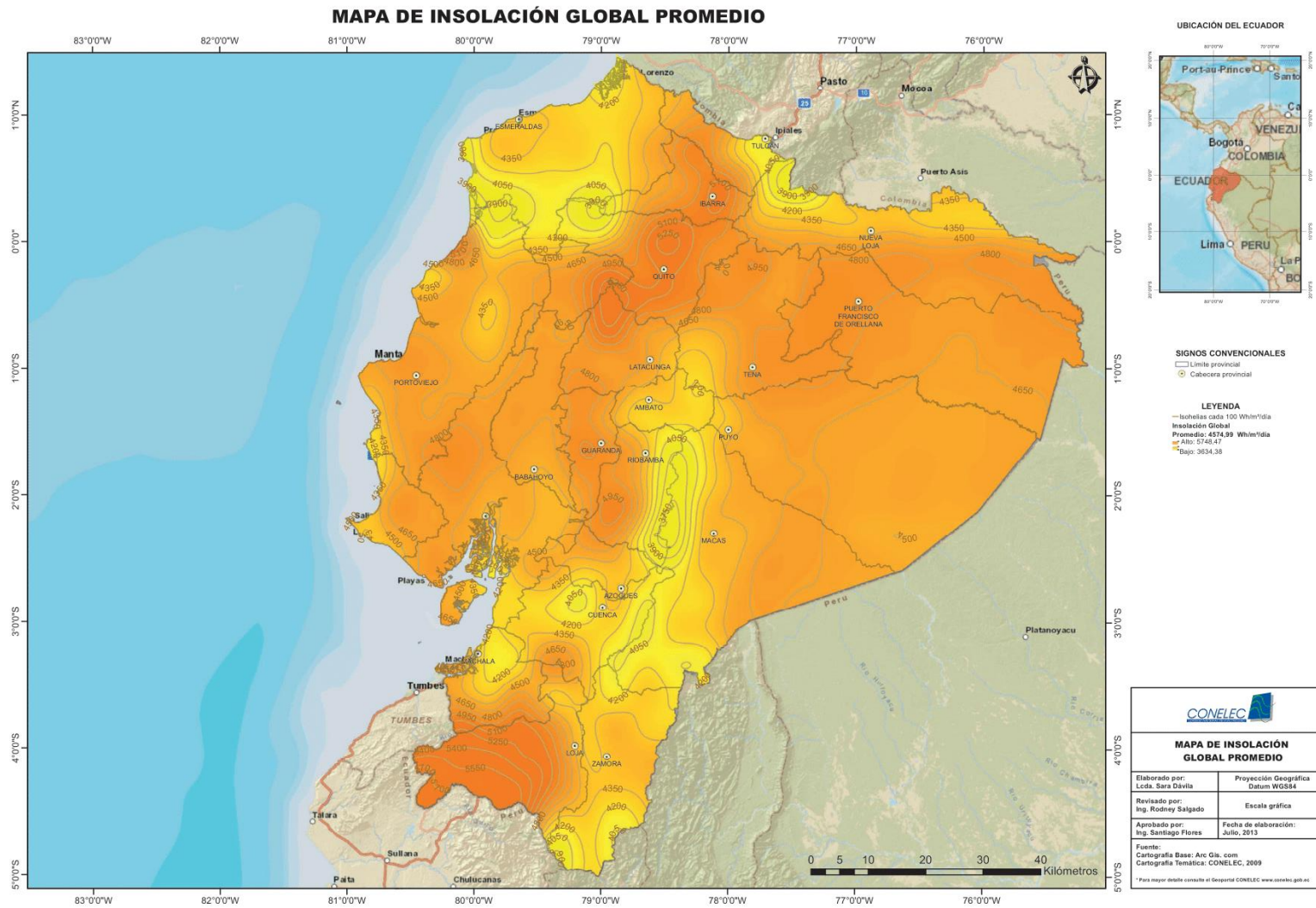
**ANEXO C:** Esquema del sistema fotovoltaico aislado en Simulink.

**ANEXO D:** Diagrama de bloques - Casos de Estudio.

**ANEXO E:** Manual de Usuario.

# **ANEXO A**

MAPA SOLAR DE RADIACIÓN GLOBAL DEL  
ECUADOR



MAPA No. 8: ATLAS SOLAR, INSOLACIÓN GLOBAL PROMEDIO

Figura A.1 Mapa de radiación global del Ecuador.

# **ANEXO B**

PARÁMETROS Y CÓDIGO DEL ALGORITMO DE  
PERTURBAR & OBSERVAR (P&O)

### Parámetros para el algoritmo de Perturbación & Observación:

(D = Convertidor reductor - Ciclo de trabajo)

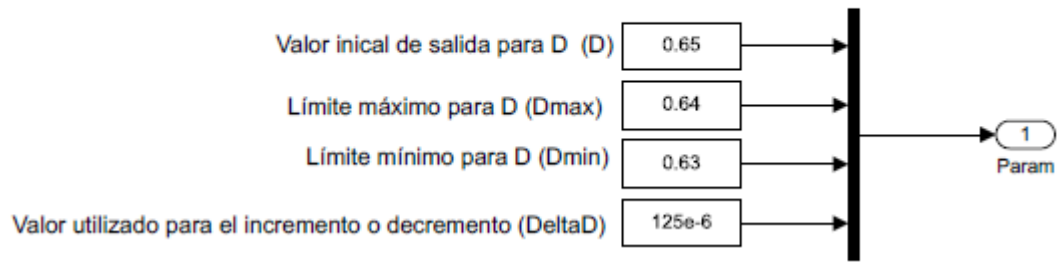


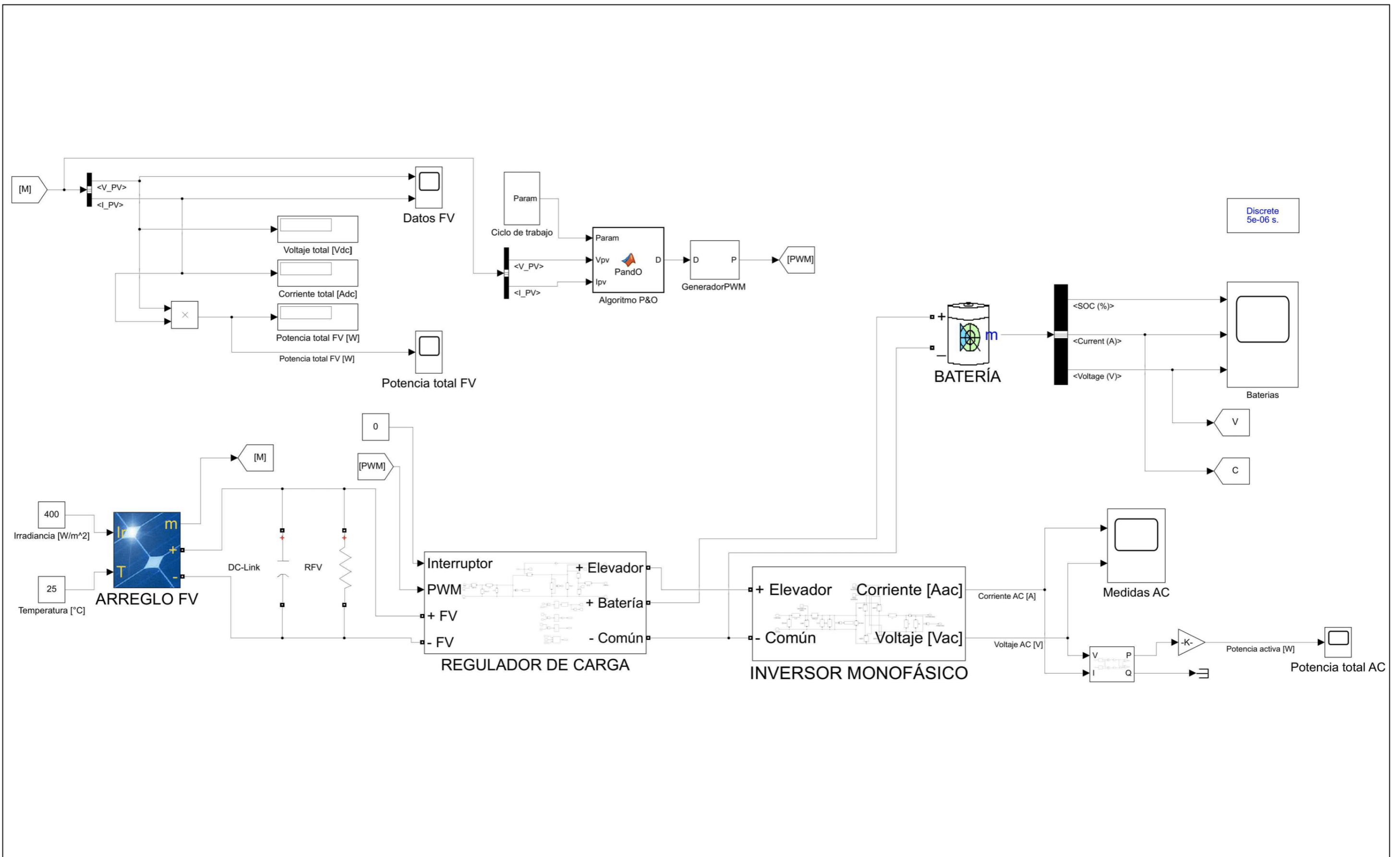
Figura B.1 Parámetros para el algoritmo de perturbar y observar (P&O).

```
function D = PandO(Param,Vpv,Ipv)
duty_init = Param(1);
Dmax = Param(2);
Dmin = Param(3);
deltaD = Param(4);
persistent Dprev Pprev Vprev
dataType = 'double';
if isempty (Dprev)
Dprev = duty_init;
Pprev = 0;
Vprev = 0;
end
Ppv = Vpv*Ipv;
if (Ppv-Pprev) ~= 0
if (Ppv-Pprev) > 0
if (Vpv-Vprev) > 0
D = Dprev - deltaD;
else
D = Dprev + deltaD;
end
else
if (Vpv-Vprev) > 0
D = Dprev + deltaD;
else
D = Dprev - deltaD;
end
end
else
D = Dprev;
end
if D >= Dmax || D<= Dmin
D=Dprev;
end
% Update internal values
Dprev = D;
Vprev = Vpv;
Pprev = Ppv;
```

# ANEXO C

ESQUEMA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO  
AISLADO EN SIMULINK





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESQUEMA DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO AISLADO

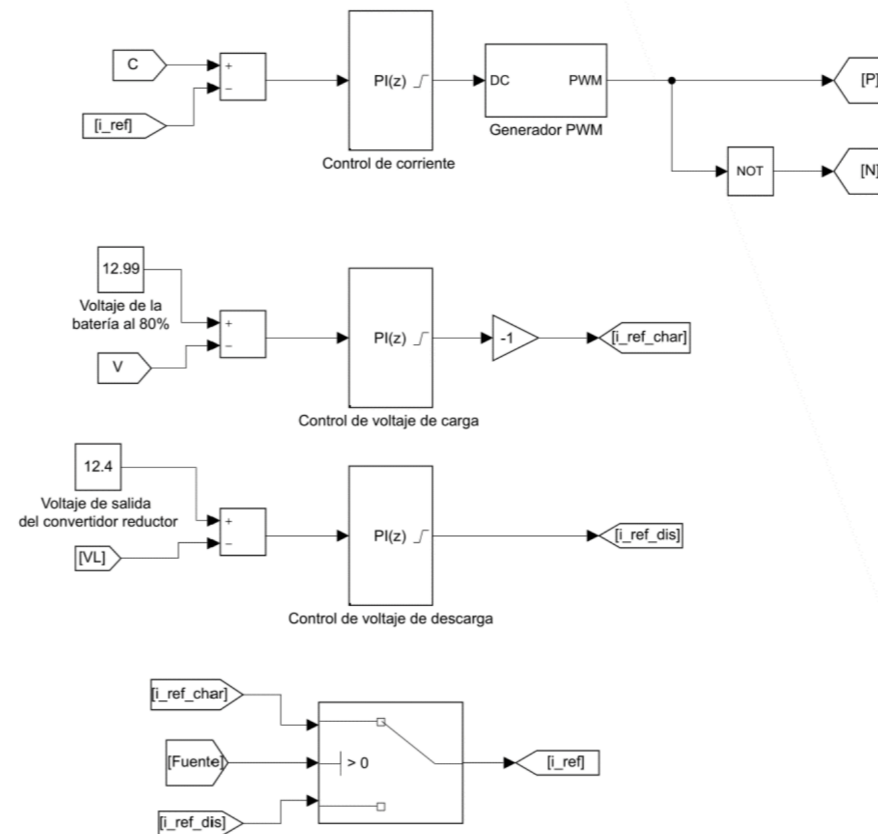
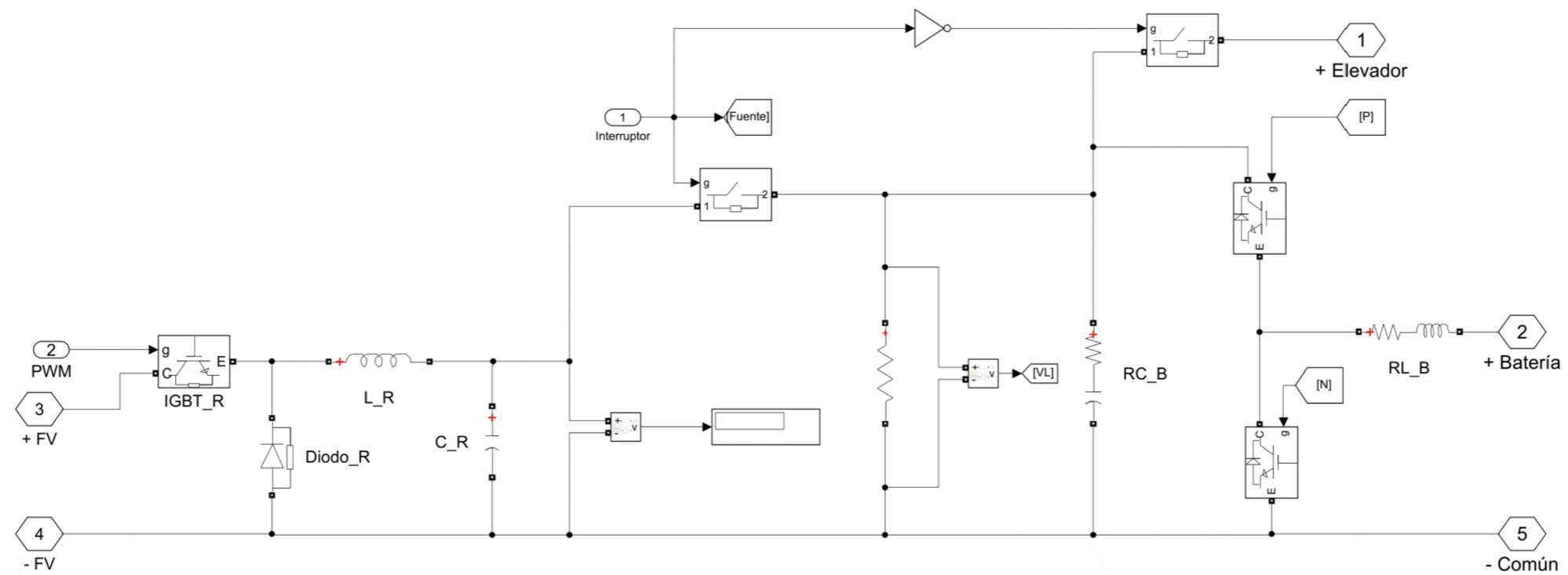
PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
CRISTINA OÑA  
ISMAEL SUQUILLO

REVISADO POR:  
ING. ALAN CUENCA

04 - 09 - 2020

N° C.1



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

COMPONENTES DEL REGULADOR DE CARGA  
PARA SIMULACIÓN

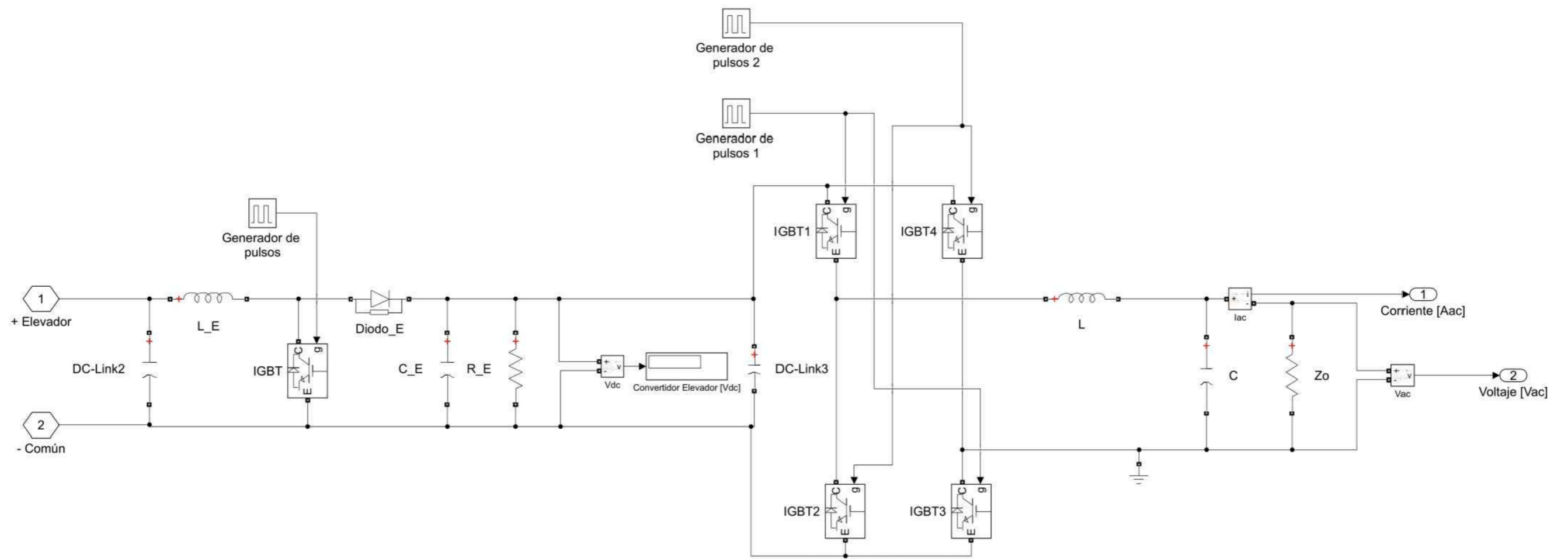
PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
CRISTINA OÑA  
ISMAEL SUQUILLO

REVISADO POR:  
ING. ALAN CUENCA

04 - 09 - 2020

N° C.2



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

COMPONENTES DEL INVERSOR MONOFÁSICO  
PARA SIMULACIÓN

PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
CRISTINA OÑA  
ISMAEL SUQUILLO

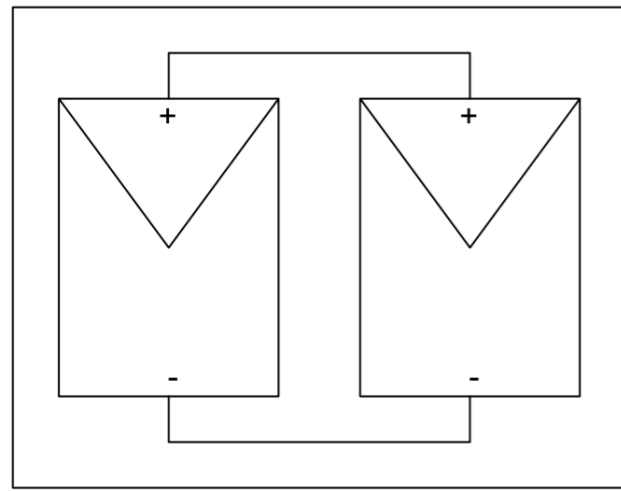
REVISADO POR:  
ING. ALAN CUENCA

04 - 09 - 2020

N° C.3

# **ANEXO D**

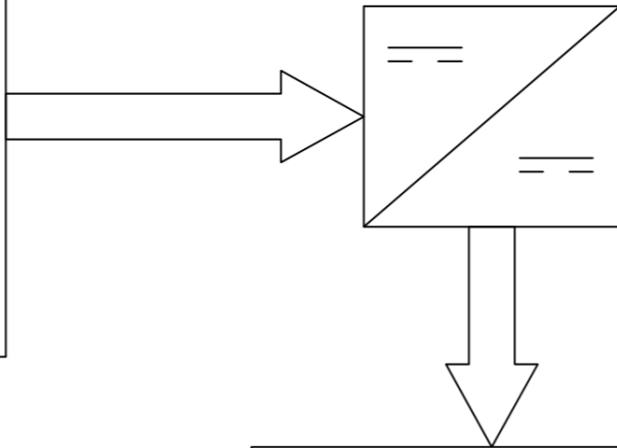
DIAGRAMA DE BLOQUES – CASOS DE ESTUDIO



**Arreglo fotovoltaico**

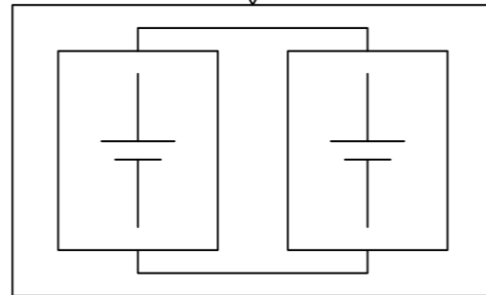
Potencia por módulo: 150 [W]  
 Voltaje en circuito abierto Voc: 22,30 [V]  
 Corriente en cortocircuito Isc: 8,51 [A]  
 #Módulos en paralelo: 2  
 #Módulos en serie: 1

**Voltaje del sistema: 12 [V]**



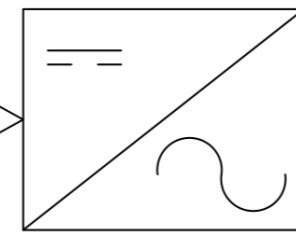
**Regulador de carga**

Potencia: 800 [W]  
 Voltaje máximo de entrada : 150 [Vdc]  
 Corriente de carga nominal: 60 [Adc]



**Baterías**

Capacidad por batería: 100 [Ah]  
 Voltaje por batería: 12 [Vdc]  
 Baterías en paralelo: 2  
 Baterías en serie: 1



**Inversor monofásico**

Potencia: 500 [W]  
 Voltaje de salida: 120 [Vrms]  
 Eficiencia: 93%

- 1 Ventilador
- 1 Televisión
- 1 Equipo de sonido
- 5 Luminarias
- 2 Cargador de celular
- 1 Computador portátil
- 1 Modem
- 1 Licuadora



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

Caso de estudio 1: sitio Pedernales

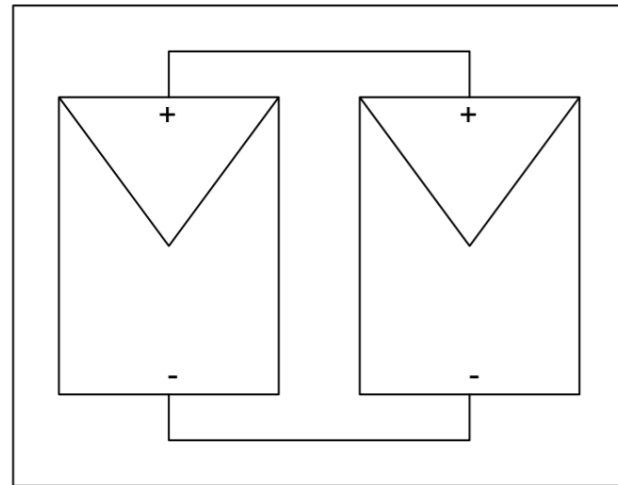
PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
 CRISTINA OÑA  
 ISMAEL SUQUILLO

REVISADO POR:  
 ING. ALAN CUENCA

13 - 10 - 2020

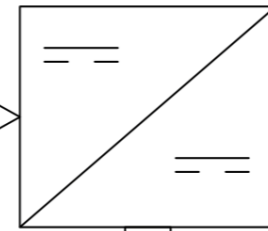
N° D.1



**Arreglo fotovoltaico**

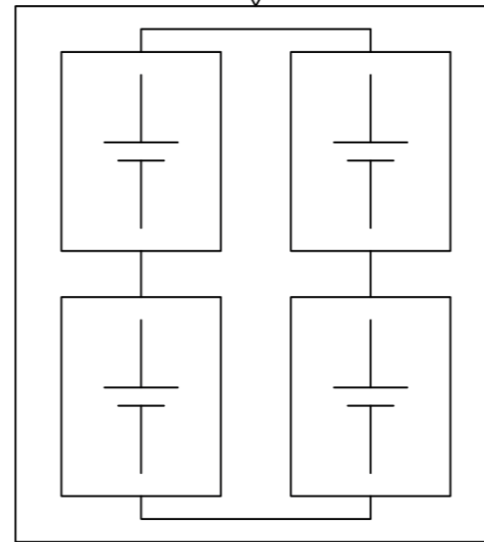
Potencia por módulo: 365 [W]  
 Voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ : 47,30 [V]  
 Corriente en cortocircuito  $I_{sc}$ : 9,62 [A]  
 #Módulos en paralelo: 2  
 #Módulos en serie: 1

**Voltaje del sistema: 24 [V]**



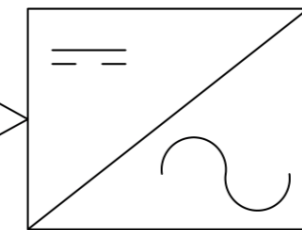
**Regulador de carga**

Potencia: 1120 [W]  
 Voltaje máximo de entrada : 120 [Vdc]  
 Corriente de carga nominal: 40 [Adc]



**Baterías**

Capacidad por batería: 105 [Ah]  
 Voltaje por batería: 12 [Vdc]  
 Baterías en paralelo: 2  
 Baterías en serie: 2



**Inversor monofásico**

Potencia: 5000 [W]  
 Voltaje de salida: 120 [Vrms]  
 Eficiencia: 95%

- 1 Televisión
- 1 Refrigeradora
- 1 Computador
- 6 Luminarias
- 1 Cargador de celular
- 1 Plancha
- 1 Licuadora



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

Caso de estudio 2: sitio Ibarra

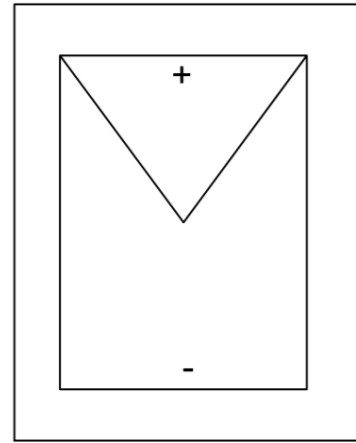
PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
 CRISTINA OÑA  
 ISMAEL SUQUILLO

REVISADO POR:  
 ING. ALAN CUENCA

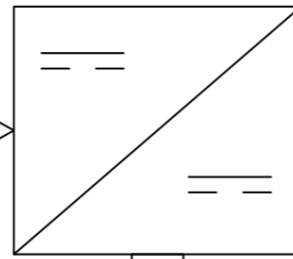
13 - 10 - 2020

N° D.2



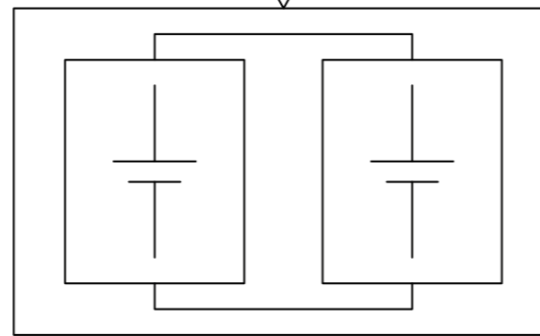
**Arreglo fotovoltaico**

Potencia por módulo: 270 [W]  
 Voltaje en circuito abierto Voc: 38,45 [V]  
 Corriente en cortocircuito Isc: 9,03 [A]  
 #Módulos en paralelo: 1  
 #Módulos en serie: 1  
**Voltaje del sistema: 12 [V]**



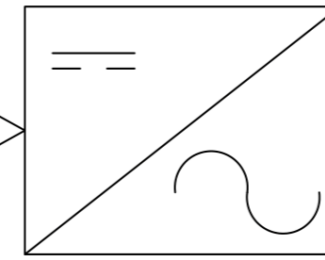
**Regulador de carga**

Potencia: 600 [W]  
 Voltaje máximo de entrada : 150 [Vdc]  
 Corriente de carga nominal: 45 [Adc]



**Baterías**

Capacidad por batería: 105 [Ah]  
 Voltaje por batería: 12 [Vdc]  
 Baterías en paralelo: 2  
 Baterías en serie: 1



**Inversor monofásico**

Potencia: 400 [W]  
 Voltaje de salida: 120 [Vrms]  
 Eficiencia: 93%

- 1 Televisión
- 1 Equipo de sonido
- 4 Luminarias
- 1 Cargador de celular
- 1 Computador portátil
- 1 Modem



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Caso de estudio 3: sitio Cuyabeno

PROYECTO INTEGRADOR

ELABORADO POR:  
 CRISTINA OÑA  
 ISMAEL SUQUILLO

REVISADO POR:  
 ING. ALAN CUENCA

13 - 10 - 2020

N° D.3

# **ANEXO E**

MANUAL DE USUARIO



## 1. Habilitación de la opción de programador en Excel

A continuación, se detalla los pasos a seguir para habilitar la opción de **programador** en Excel para la utilización de Macros y Visual Basic.

- Abrir el software Excel.
- Dirigirse a la pestaña de **Archivo**, y dar clic en **Opciones**.
- En la ventana, diríjase a la opción **Personalizar cinta de opciones**.
- Luego, active la pestaña **Programador**.

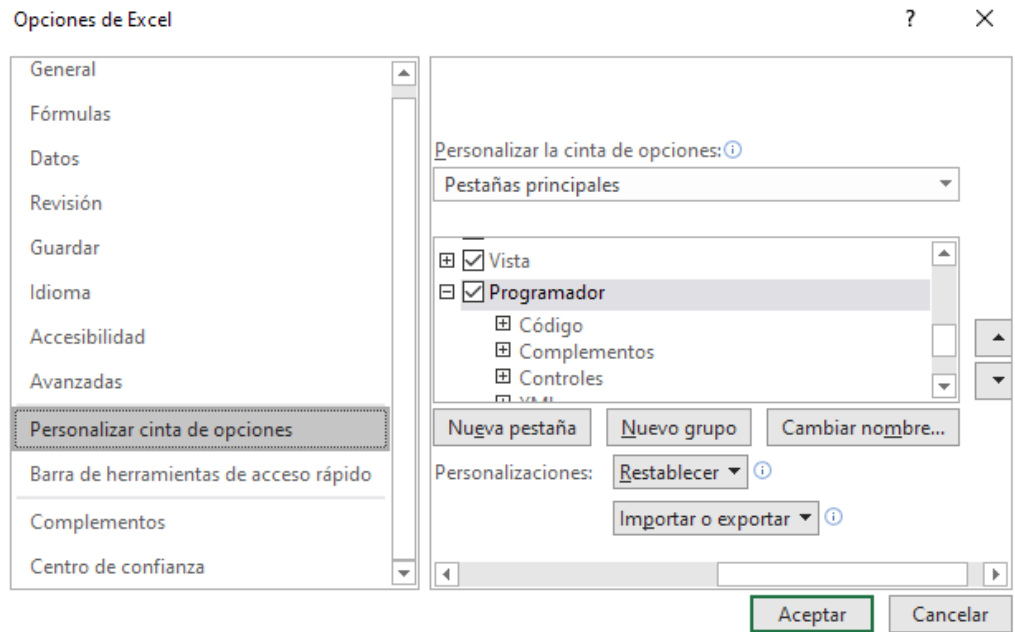


Figura E.1 Ventana para activar la opción de programador.

- Finalmente, clic en **Aceptar**.

## 2. Uso de la herramienta de dimensionamiento

Los resultados obtenidos en cada interfaz se mostrarán con fondo verde y texto en negrilla. Los datos mal ingresados se presentarán con fondo rojo y texto blanco, además que no se permitirá realizar el cálculo ni guardar ningún dato.

En la Tabla E.1, se presenta los botones que contienen algunas ventanas.

Tabla E.1 Botones de comando principales.

Botones	Funciones
	Permite salir de la ventana en la que el usuario se encuentre.
	Almacena los datos de los campos de entrada y los cálculos de cada una de las ventanas.
	Suprime los valores ingresados y los cálculos de cada una de las ventanas.
	Permite acceder a las ventanas para el dimensionamiento de cada elemento del sistema fotovoltaico para la simulación en el software Simulink.
	Permite acceder al informe final para realizar la implementación del sistema fotovoltaico aislado, si el usuario así lo desea.
	Permite desplegar la ventana del informe final para la simulación del sistema fotovoltaico aislado.
	Despliega la ventana del estudio de cargas.
	Permite realizar los cálculos en cada una de las interfaces desarrolladas.

En la Figura E.2 se presenta la interfaz desarrollada para el estudio de cargas en donde se puede observar seis partes.

La primera parte consta de los botones que permiten **Añadir**, **Editar**, **Eliminar** y **Borrar** cada una de las cargas eléctricas que el usuario necesite.

La segunda parte tiene los parámetros a modificar o agregar de la carga eléctrica.

La tercera parte consta de dos botones, uno denominado **Modificar** y el otro **Agregar**, los cuales obtendrán el valor del consumo diario y la demanda máxima de la carga añadida o modificada.

El usuario puede observar el consumo diario total y la demanda máxima total de todos los aparatos en la parte cuatro de manera instantánea presionando únicamente el botón **f(x)**.

Además, el usuario en la parte cinco puede realizar la **Búsqueda** de una carga específica en el cuadro de lista de la parte seis y colocar una **Localidad**.

ESTUDIO DE CARGAS

Localidad : Pedernales    Búsqueda

Código	Carga	Cantidad	Potencia [W]	Voltaje [V]	Horas de uso
1	Televisión	1	52	110	3
2	Ventilador	1	65	110	3
3	Equipo de so	1	100	110	1,3
4	Luminarias	5	9	110	4
5	Cargador de c	2	10	110	2
6	Computador p	1	75	110	2
7	Modem	1	18	110	3

Añadir, Editar, Eliminar, Borrar

Modificar, Agregar

Código: 7  
Carga: Modem  
Cantidad: 1  
Potencia [W]: 18  
Voltaje [V]: 110  
Horas de uso: 3

Factor de seguridad para cargas pesadas.

**f(x)**

	Consumo diario [Wh]	Demanda máxima [W]
Carga =	54	18
Total =	905	375

Power button, PASO 2

Figura E.2 Interfaz para el estudio de cargas de un SFVA.

En la Figura E.3, se presenta la interfaz desarrollada para la selección del módulo fotovoltaico la cual contiene tres partes.

La primera parte tiene un botón **f(x)** que permite el cálculo del consumo diario con un factor de protección y la obtención del voltaje del sistema de acuerdo con el consumo diario sobredimensionado.

En la segunda parte, se obtiene la potencia FV con la hora solar mínima ingresada (botón **f(x)**), este valor permitirá el cálculo del número de módulos fotovoltaicos que necesita el SFVA.

Adicionalmente, los usuarios tendrán una base de datos de los módulos fotovoltaicos comerciales de diferentes potencias, para seleccionar de acuerdo con sus necesidades en la parte tres.

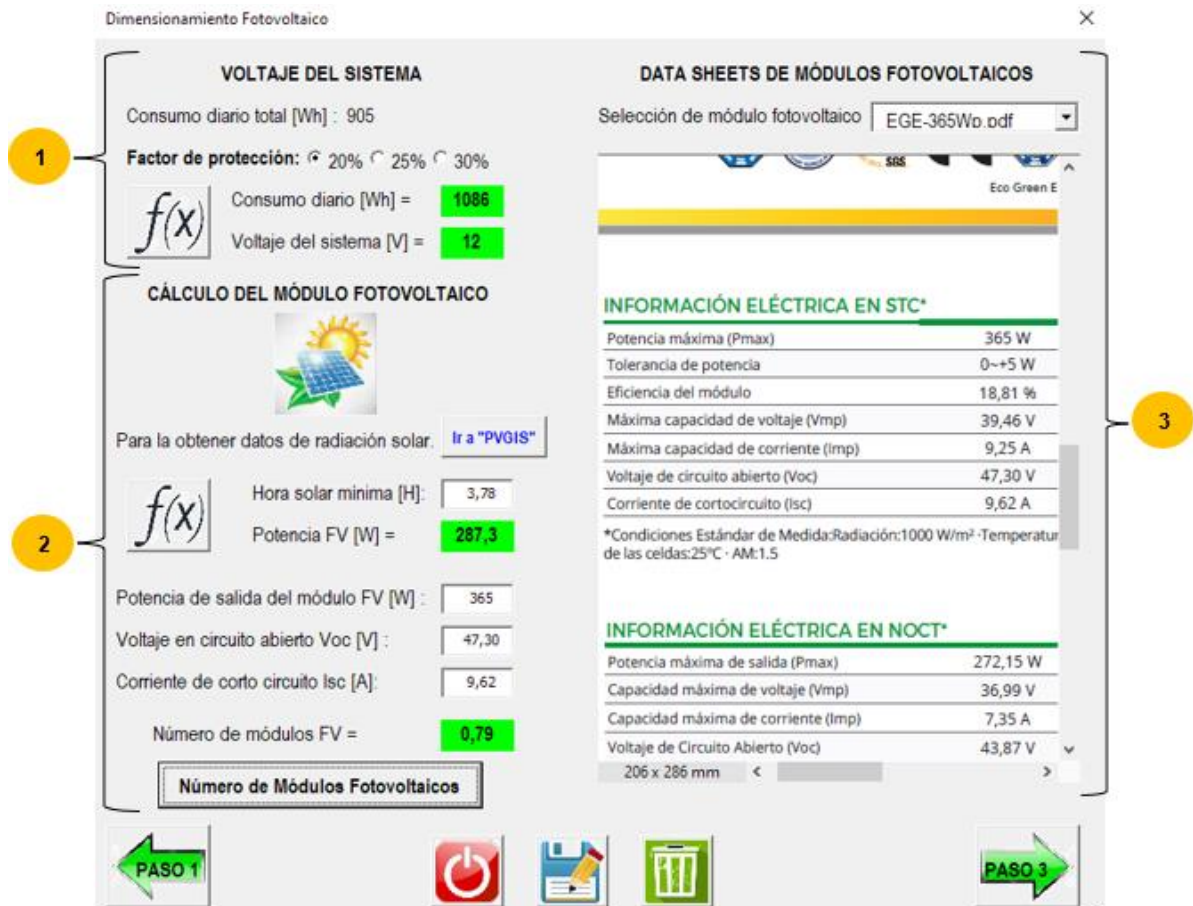


Figura E.3 Selección del módulo fotovoltaico.

En la Figura E.4, se presenta la interfaz de selección del regulador de carga la cual consta de cuatro partes.

La primera parte consta de los datos extraídos de la ventana de selección del módulo fotovoltaico, los cuales son:

- ❖ Número de módulos FV(Tentativo)
- ❖ Voltaje en circuito abierto Voc [V]
- ❖ Corriente de corto circuito Isc [A]
- ❖ Voltaje del sistema [V]

Para la segunda parte se ingresará el número total de paneles a utilizarse en el SFVA, así como la cantidad de módulos en serie y paralelo. De esta manera, al presionar el botón **f(x)** se obtendrá los valores ideales de voltaje total en circuito abierto, corriente total de cortocircuito y potencia total.

Además, en la parte cuatro se tiene una ventana en donde se puede revisar fichas técnicas de reguladores de carga y seleccionar de acuerdo con los valores expuestos anteriormente, estos valores serán ingresados en la parte tres.

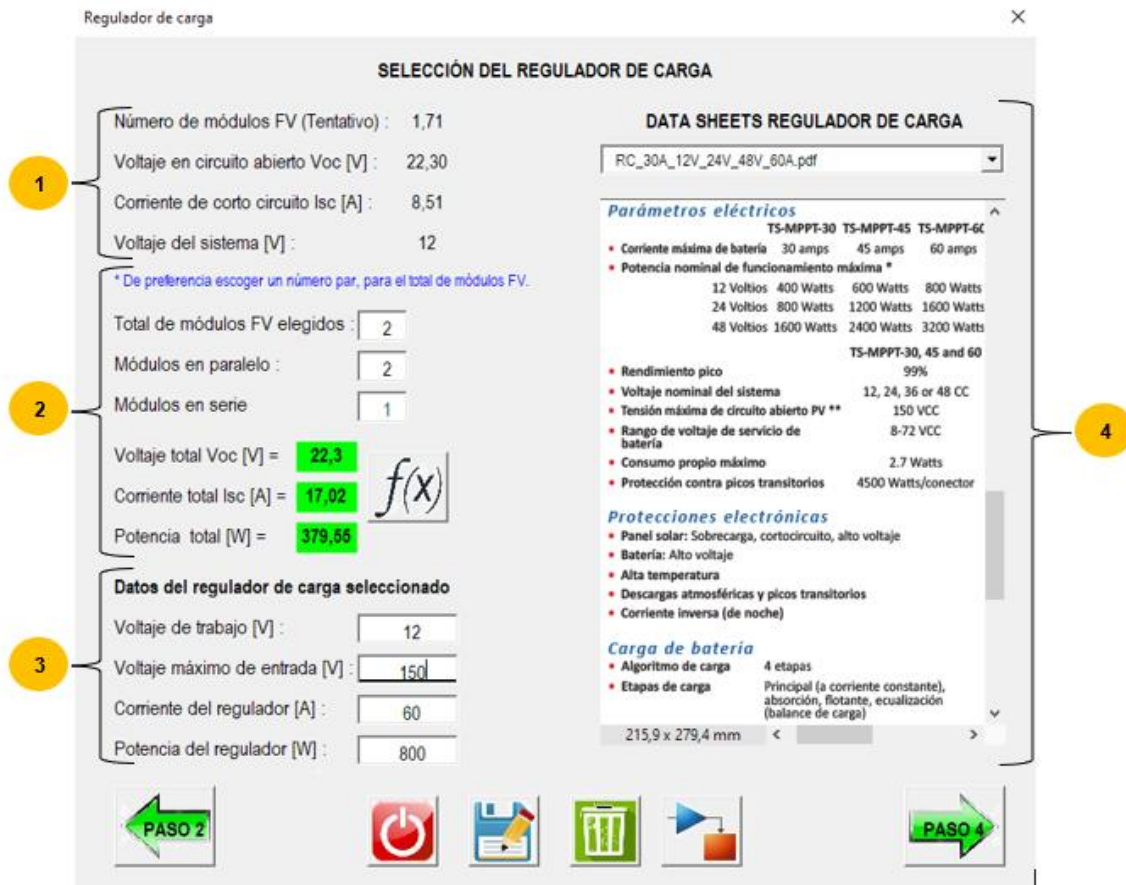


Figura E.4 Selección del regulador de carga.

En la Figura E.5, se presenta la ventana de dimensionamiento de resistencia y capacitor la cual consta de dos partes. La primera parte consta del número de módulos en serie y en paralelo extraídos del anterior paso.

Además, en la parte dos se introduce los valores obtenidos de Simulink en cuanto a voltaje y corriente del arreglo FV para obtener los valores de potencia FV, capacitor y resistencia a través del botón **f(x)**.

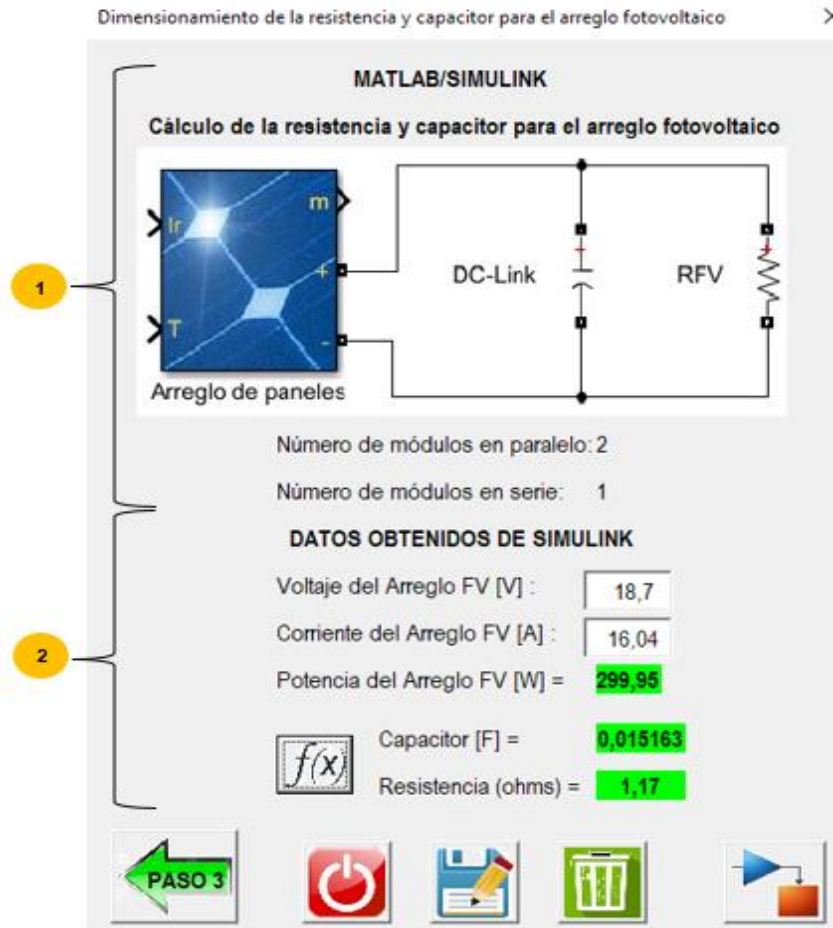


Figura E.5 Cálculo de capacitor y resistencia para el arreglo fotovoltaico.

En la Figura E.6, se presenta la interfaz para el dimensionamiento del convertidor reductor (parte uno) y convertidor bidireccional (parte dos).

La interfaz consta de datos extraídos de la anterior ventana como:

- ❖ Potencia del regulador,
- ❖ Voltaje del sistema,
- ❖ Voltaje total del arreglo fotovoltaico.

Los campos para introducirse es la frecuencia de conmutación, la cual puede ser distinta para cada convertidor. Además, la corriente máxima de carga es igual a la corriente del regulador. Con esto, al presionar **f(x)** se obtendrán los valores de los componentes tanto para el convertidor reductor como para el bidireccional.

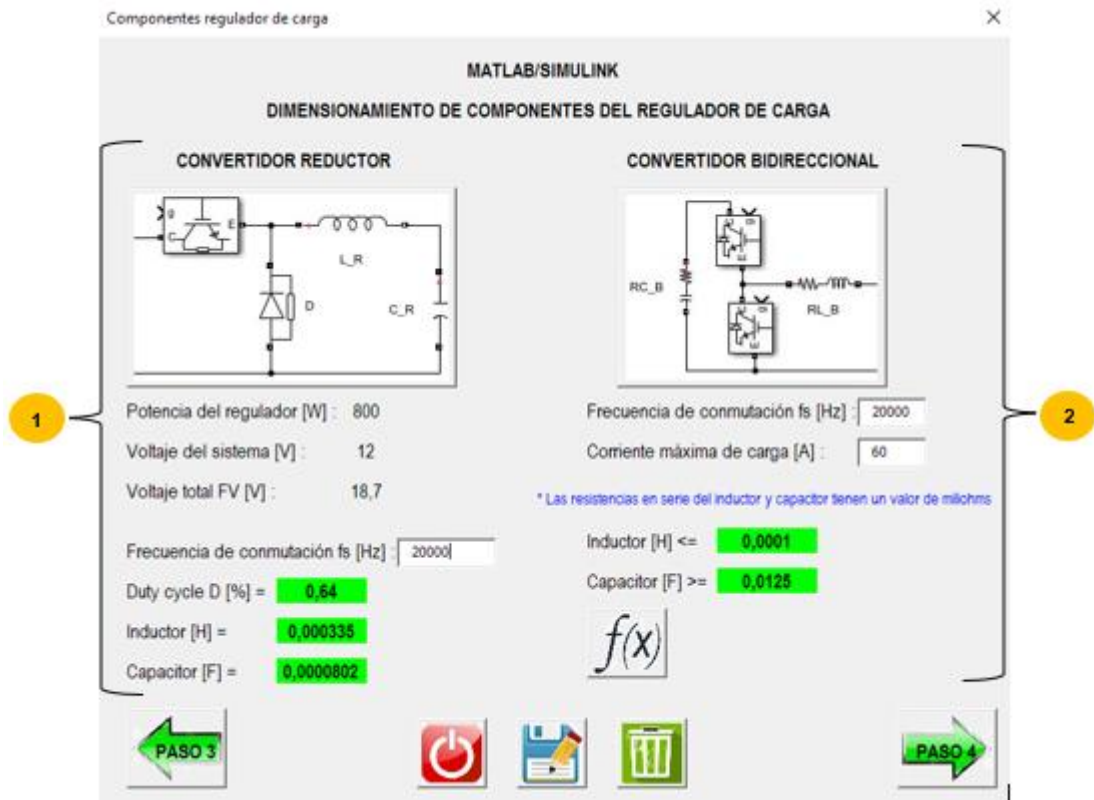


Figura E.6 Dimensionamiento de componentes internos del regulador de carga.

En la Figura E.7, se muestra la interfaz de dimensionamiento del inversor la consta de tres partes.

El usuario en la primera parte observará los datos extraídos de las ventanas anteriores y también seleccionará el factor de protección que le permitirá obtener la demanda máxima sobredimensionada al presionar  $f(x)$ .

Una vez obtenido el dato de demanda máxima sobredimensionado el usuario puede buscar un inversor en la base de datos de la parte tres y llenar los siguientes campos de entrada de la parte dos:

- ❖ Potencia del inversor [W],
- ❖ Eficiencia del inversor [%],
- ❖ Voltaje de salida [Vac]

para el dimensionamiento de los componentes.

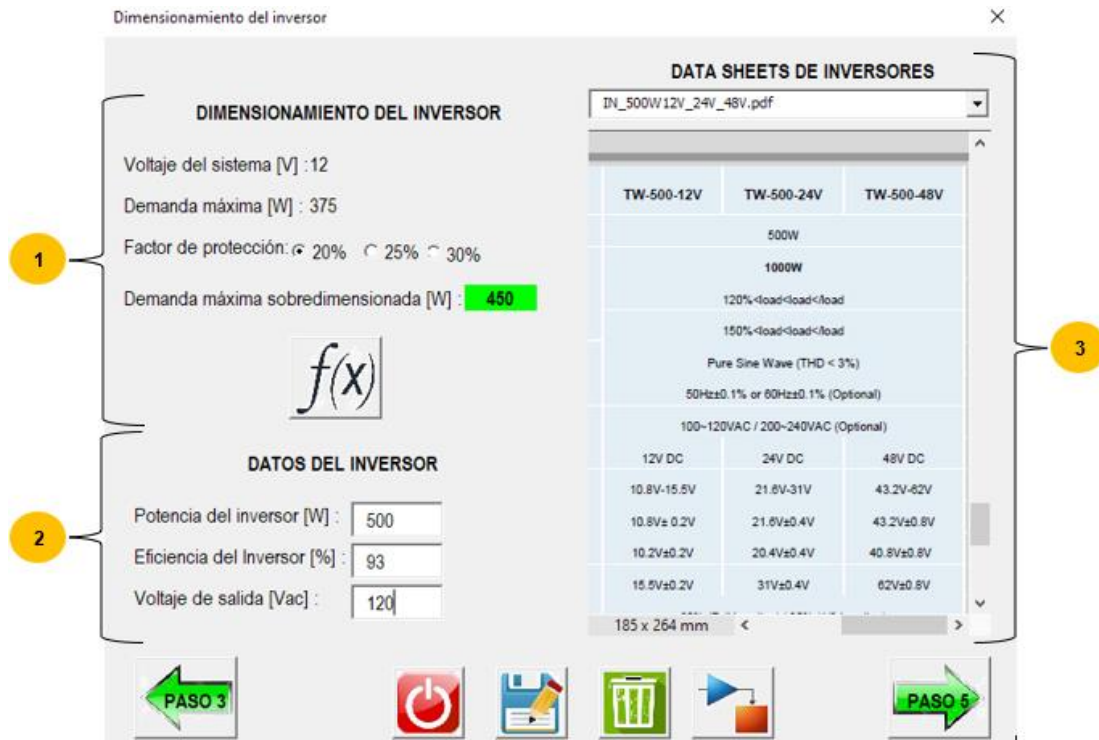


Figura E.7 Selección del inversor.

En la Figura E.8, se presenta la interfaz para el dimensionamiento de los componentes del inversor:

- ❖ Convertidor elevador (parte uno)
- ❖ Filtro LC (parte dos).

En la parte uno, el usuario observará los datos correspondientes al voltaje del sistema y la potencia del regulador. De igual manera, en los campos de entrada se deberá ingresar la frecuencia de conmutación y el voltaje de salida pico del convertidor elevador. Además, con el botón **f(x)** se obtendrá el valor de inductancia, capacitancia, DC-link y DC-link1.

El usuario en la parte dos observará la potencia pico del inversor elegido, así como el voltaje pico.

El único campo de entrada a llenar corresponde a la frecuencia eléctrica que para el Ecuador es de 60 Hz. Además, con el botón **f(x)** del filtro LC permitirá obtener los valores de la impedancia, capacitancia e inductancia.



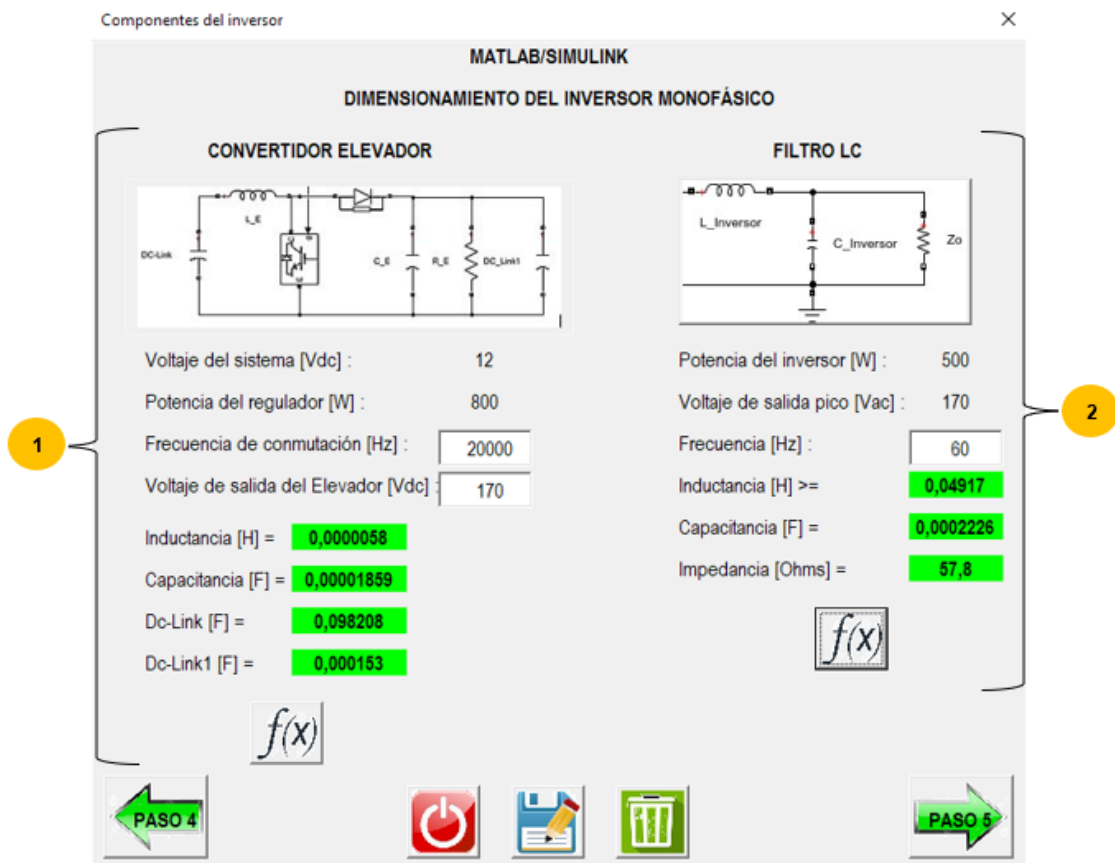


Figura E.8 Dimensionamiento de componentes del inversor.

En la Figura E.9, se presenta la interfaz dimensionamiento del sistema de almacenamiento el cual cuenta de tres partes. El usuario visualizará en la primera parte los datos extraídos de las ventanas anteriores.

Para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de la parte dos es necesario introducir los siguientes datos:

- ❖ Días de autonomía,
- ❖ Profundidad de descarga,
- ❖ Capacidad de la batería,
- ❖ Voltaje de la batería,

los mismos que servirán para obtener los Ah/día, número de baterías en serie, paralelo y el total de baterías al presionar el botón **f(x)**.

La parte tres consta de una base de datos de diferentes tipos de baterías solares utilizadas en los sistemas fotovoltaicos.

Sistema de almacenamiento

**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO**

**1**

Voltaje del sistema [Vdc] : 12  
 Consumo diario [Wh] : 1086  
 Eficiencia del inversor [%] : 93

**Cálculo de las baterías**



Ah/día = **97,31**

Días de autonomía :

Profundidad de descarga [%] :

Capacidad de la batería [Ah] :

Voltaje de la batería [Vdc] :

Baterías en Paralelo = 1,95 ≈ **2**

Baterías en Serie = **1**

Total Baterías = **2**

**2**

**DATA SHEETS DE BATERÍAS SOLARES**

BT 12V 100AH PLOMO.pdf

**Specification**

Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	100Ah@20hr-rate to 1.75V per cell
Weight	Approx. 30.0 Kg (Tolerance ± 5%)
Internal Resistance	Approx. 5 mΩ
Terminal	F12(M8)/F5(M6)
Max. Discharge Current	1000A (5 sec)
Design Life	12 years (floating charge)
Maximum Charging Current	30.0A
Reference Capacity	C3 74.4AH C5 83.5AH C10 96.0AH C20 100.0AH
Float Charging Voltage	13.6 V-13.8 V @ 25°C Temperature Compensation: -3mV/°C
Cycle Use Voltage	14.6 V-14.8 V @ 25°C Temperature Compensation: -3mV/°C
Operating Temperature Range	Discharge: -20°C-60°C Charge: 0°C-60°C Storage: -20°C-60°C
Normal Operating Temperature Range	25°C ± 5°C
Self Discharge	WDAV Value Registered Lead Acid is stored for up to 6 months at 25°C is recommended. Monthly self-discharge 3% at 25°C. Please charge in.
Container Material	A.B.S. UL94-HB, UL94-V0 Op

**Dimensions**



209,9 x 296,7 mm

**3**

PASO 4

Figura E.9 Dimensionamiento del sistema de almacenamiento.

En la Figura E.10, se muestra la interfaz que permite obtener los datos para la simulación en el entorno de Simulink.

El único valor por ingresar es el estado de carga inicial de la batería que puede estar entre la profundidad de descarga seleccionada y el 100%. La capacidad del sistema se obtiene de manera automática al presiona el botón **f(x)**.

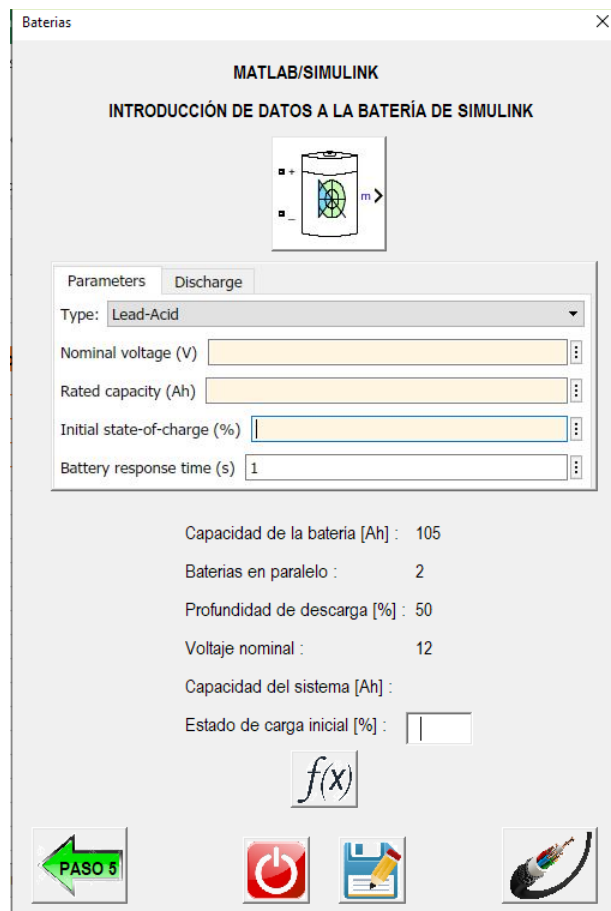


Figura E.10 Datos para la batería de Simulink.

En la Figura E.11, se presenta la interfaz del dimensionamiento de conductores la cual consta de tres partes. La primera parte permite visualizar los datos extraídos de ventanas anteriores como:

- ❖ Voltaje del sistema [V]
- ❖ Corriente total FV [A]
- ❖ Capacidad de la batería [Ah]
- ❖ Baterías en Paralelo
- ❖ Potencia del inversor [W]
- ❖ Voltaje de salida [Vac]

Para el dimensionamiento de conductores eléctricos en la parte dos, se debe introducir los datos de resistividad del conductor y longitud del cable. En la Tabla E.2, se presenta la resistividad de los principales materiales utilizados en la construcción de conductores.

Tabla E.2 Valores de resistividad de conductores eléctricos.

Resistividad ( $\rho$ )	Valor	Unidad
Cobre	0.0176	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Aluminio	0.0260	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Por otra parte, la longitud de los conductores deberá ser tomada de acuerdo con la ubicación de cada uno de los elementos del sistema fotovoltaico y el calibre del conductor será de acuerdo con la ficha técnica de la parte tres.

**DIMENSIONAMIENTO DE CONDUCTORES**

Voltaje del sistema [V] : 12      Baterías en Paralelo : 2  
 Corriente total FV [A] : 16,04      Potencia del inversor [W] : 500  
 Capacidad de la batería [Ah] : 100      Voltaje de salida [Vac] : 120

Lineas	Generador - Regulador	Batería - Regulador	Batería - Inversor
Corriente total [A] :	16,04	10	4,17
Caida de tensión [V]	0,36	0,12	0,12
Corriente máxima [A] :	20,05	12,5	5,21
Resistividad del conductor [ohms*mm <sup>2</sup> /m]:	0,017	0,017	0,017
Longitud del conductor [m] :	2	2	2
Sección del conductor [mm <sup>2</sup> ]	1,88	3,54	1,48
Conductores elegidos [AWG]	16	10	16

**DATA SHEETS DE CONDUCTORES**

Conductores.pdf

Conductor de cobre d

CONDUCTOR	CALEBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm <sup>2</sup> )	No. Hilos	Clase de Trenzado	Diámetro conductor (mm)
<b>FORM</b>					
14	2,08	1	Sólido		1,63
12	3,31	1	Sólido		2,05
10	5,261	1	Sólido		2,59
8	8,37	1	Sólido		3,25
6	13,3	1	Sólido		4,12
<b>FORMACIÓN CA</b>					
14	2,08	7	B		1,84
12	3,31	7	B		2,32
10	5,261	7	B		2,93
8	8,37	7	B		3,70
6	13,3	7	B		4,65
4	21,15	7	B		5,89
2	33,62	7	B		7,42
1	42,4	7	A		8,33
1/0	53,5	7	AA, A		9,36

Figura E.11 Dimensionamiento de conductores eléctricos.

En la Figura E.12, se muestra la interfaz para el dimensionamiento de protecciones eléctricas, en donde el usuario debe dar un clic en el botón **f(x)** para obtener la corriente del fusible, la cual permitirá la selección de un fusible comercial de acuerdo con el catálogo proporcionado.

Además, en la ventana del dimensionamiento de protecciones se tiene dos botones, con el primero se accederá a un informe para implementación y con el segundo a un informe para simulación.

Protecciones eléctricas

✕

### DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIONES

Líneas	Generador - Regulador	Bateria - Regulador	Bateria - Inversor
Corriente máxima [A] :	20,05	12,5	5,21
Corriente del fusible [A] :	25,06	15,62	6,51
Fusibles elegidos [A] :	<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="16"/>	<input type="text" value="8"/>




#### LISTA DE FUSIBLES COMERCIALES

fusibles-v-bases-fotovoltaicos.pdf

U	PODER DE CORTE	NORMAS	In (A)
10x38			1
1000V DC			2
			3
	30kA		4
			5
			6
			8
			10
			12
			15
			16
			20
NEUTRO			

210 x 297 mm

Figura E.12 Dimensionamiento de protecciones eléctricas.

El modelo de informe para realizar la simulación se presenta en la Figura E.13, mientras que el informe de implementación se presenta en la Figura E.14, además en esta ventana se tiene una lista de proveedores con su respectivo sitio web, para que el usuario pueda realizar una cotización del sistema fotovoltaico aislado a implementarse.

Finalmente, en cada una de las ventanas, con los botones que contiene el ícono de pdf se puede obtener un archivo en formato pdf para una mejor comprensión de datos obtenidos en cada uno de los pasos.

INFORME PARA SIMULACIÓN							
Dimensionamiento		Arreglo fotovoltaico		Regulador de carga		Inversor	
Consumo diario [Wh] :	905	Potencia del módulo FV [W] :	150	Voltaje máximo de entrada [Vdc] :	150	Potencia de salida [W] :	500
Demanda máxima [W]:	375	Voltaje en circuito abierto Voc [V] :	22,30	Corriente de carga nominal [Adc] :	60	Voltaje de salida [Vac] :	120
Consumo diario sobredimensionado [Wh] :	1086	Corriente de cortocircuito Isc [A] :	8,51	Potencia nominal [W] :	800	Eficiencia [%] :	93
Demanda máxima sobredimensionada [W] :	450	Número de módulos en paralelo :	2	<b>Convertidor reductor</b>		<b>Convertidor elevador</b>	
Voltaje del sistema [Vdc] :	12	Número de módulos en serie :	1	Ciclo de trabajo D [%] :	0,64	Frecuencia de conmutación [fs] :	20000
Hora solar mínima [h] :	4,23	Total de módulos :	2	Frecuencia de conmutación fs [Hz] :	20000	Voltaje de salida [Vac] :	170
Potencia FV [W] :	256,74	<b>Datos obtenidos de SIMULINK</b>		Inductancia [H] :	0,00033	Ciclo de trabajo D [%] :	0,9
<b>Baterías</b>		Voltaje del arreglo FV [Vdc] :	18,7	Capacitor [F] :	0,00008	Inductancia [H] :	0,0000058
Ah/día :	97,31	Corriente del arreglo FV [Adc] :	16,04	<b>Convertidor bidireccional</b>		Capacitor [F] :	0,00001859
Días de autonomía :	1	Potencia del arreglo FV [W] :	299,95	Frecuencia de conmutación fs [Hz] :	10000	DC-Link [F] :	0,098208
Profundidad de descarga [%] :	50	Resistencia [Ohms] :	1,17	Inductancia [H] :	0,00019	DC-Link1 [F] :	0,000153
Capacidad de la batería [Ah] :	100	Capacitor [F] :	0,01516	Capacitor [F] :	0,02583	<b>Filtro LC</b>	
Voltaje de la baterías [Vdc] :	12					Frecuencia [Hz] :	60
Baterías en paralelo :	2					Inductancia [H] :	0,04917
Baterías en serie :	1					Capacitor [F] :	0,00022
Total de Baterías :	2					Impedancia [ohms] :	57,8
<b>Sistema de almacenamiento - SIMULINK</b>							
Voltaje nominal [Vdc] :	48						
Corriente del sistema [Adc] :	100						
Estado de carga inicial [%] :	50						

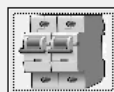


Figura E.13 Informe final para simulación del sistema fotovoltaico aislado.





INFORME PARA IMPLEMENTACIÓN						
COTIZACIÓN CON PROVEEDORES LOCALES						
		PROVIENTO		SITIO WEB		
<b>Dimensionamiento</b>		<b>Arreglo fotovoltaico</b>		<b>Regulador de carga</b>		
Consumo diario [Wh] :	905	Potencia del módulo FV [W] :	150	Voltaje máximo de entrada [Vdc] : 150		
Demanda máxima [W]:	375	Voltaje en circuito abierto Voc [V] :	22,30	Corriente de carga nominal [Adc] : 60		
Consumo diario sobredimensionado [Wh] :	1086	Corriente de cortocircuito Isc [A] :	8,51	Potencia nominal [W] : 800		
Demanda máxima sobredimensionada [W] :	450	Número de módulos en paralelo :	2	<b>Inversor</b>		
Voltaje del sistema [Vdc] :	12	Número de módulos en serie :	1	Potencia de salida [W] : 500		
Hora solar mínima [h] :	3,78	Total de módulos FV :	2	Voltaje de salida [Vac] : 120		
Potencia FV [W] :	256,74			Frecuencia [Hz] : 60		
				Eficiencia [%] : 93		
<b>Baterías</b>		<b>Conductores eléctricos</b>		<b>Protecciones eléctricas</b>		
Ah/día :	97,31	<b>Líneas</b>	<b>Sección [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>AWG</b>	<b>Líneas</b>	<b>Corriente [A]</b>
Días de autonomía :	1	Generador - Regulador	1,89	14	Generador - Regulador	25,06
Profundidad de descarga [%] :	50	Baterías - Regulador	3,54	10	Baterías - Regulador	15,62
Capacidad de la batería [Ah] :	100	Baterías - Inversor	2,21	12	Baterías - Inversor	6,51
Voltaje de la baterías [Vdc] :	12					
Baterías en paralelo :	2					
Baterías en serie :	1					
Baterías total :	2					
						

Figura E.14 Informe final para implementación del sistema fotovoltaico aislado.