



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Diseño e implementación de un sistema de generación híbrida para la Universidad de las  
Fuerzas Armadas ESPE campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara**

Toalombo Ochoa, Darwin Fernando y Jácome López, Dennis Alexander

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de unidad de integración curricular, previo a la obtención del Título de Ingeniero en  
Electromecánica

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario MSc. PhD

6 de marzo del 2024

Latacunga



## TESIS\_OFICIAL\_TOALOMBO\_JACOME\_ú...

### Scan details

Scan time:  
March 4th, 2024 at 14:33 UTC

Total Pages:  
76

Total Words:  
18766

### Plagiarism Detection



5.2%

#### Types of plagiarism

Type	Percentage	Words
Identical	1.8%	330
Minor Changes	0.9%	162
Paraphrased	1.9%	364
Omitted Words	11.8%	2216

### AI Content Detection

#### Text coverage

- AI text
- Human text

N/A

### Plagiarism Results: (29)

**Dimensionamiento de panel solar y batería seleccionados para cada lum...** 1.7%

<https://1library.co/articulo/dimensionamiento-panel-solar-bater%C3%ADa-seleccionados-cada-luminaria-y-73e3...>

**Energía solar fotovoltaica para la alimentación de sistemas de alumbrad...** 1.3%

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/30573/granadoscristancho cristianalexander2022...>

Cristian Alexander Granados Crístancho Daniel Alejandro Leguizamón Gómez

Energía solar fotovoltaica para la alimentación de sistemas de alumbrado público en vías de acceso controlado y rápidas en la ciudad de B...

**Microsoft Word - Tema 3 - 1 Inst-FV Autonomas** 0.7%

<https://311cie.files.wordpress.com/2014/10/tema3-1inst-fvautonomas.pdf>

Jinciarte

INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS SOLARES FV TEMA 3.1. INSTALACIONES FV AUTÓNOMAS.  
CAPITULO 3: APLICACIONES FOTOVOLTAICAS TEMA 3.1...

**Energías renovables y sustentabilidad: una eficiente forma de gestionar l...** 0.7%

[https://www.revista.unam.mx/2021v22n3/energias\\_renovables\\_y\\_sustentabilidad\\_una\\_eficiente\\_forma\\_de\\_ge...](https://www.revista.unam.mx/2021v22n3/energias_renovables_y_sustentabilidad_una_eficiente_forma_de_ge...)

Publicación bimestral ISSN: 1607 -...

*Jacqueline Llanos P.*

Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario  
C.C.: 0502527039



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

### Certificación

Certifico que el trabajo de unidad de integración curricular: "Diseño e implementación de generación híbrida para las Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara." fue realizado por los señores Toalombo Ochoa, Darwin Fernando y Jácome López, Dennis Alexander, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

.....  
Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario

C.C.: 0502527039



### Carrera de Ingeniería en Electromecánica

#### Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Toalombo Ochoa, Darwin Fernando**, con cédula de ciudadanía n° 050323922 y **Jácome López, Dennis Alexander**, con cédula de ciudadanía n° 1719940676, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de unidad de integración curricular: **"Diseño e implementación de generación híbrida para las Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara."** Es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

**Toalombo Ochoa, Darwin Fernando**  
C.C.: 0503239220

**Jácome López, Dennis Alexander**  
C.C.: 1719940676



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

### Autorización de Publicación

Nosotros, Toalombo Ochoa, Darwin Fernando, con cédula de ciudadanía n° 050323922 y Jácome López, Dennis Alexander, con cédula de ciudadanía n° 1719940676, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de unidad de integración curricular. "Diseño e implementación de generación híbrida para las Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara." En el repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 06 de marzo de 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Darwin Fernando Toalombo Ochoa'.

Toalombo Ochoa, Darwin Fernando  
C.C.: 0503239220

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dennis Alexander Jácome López'.

Jácome López, Dennis Alexander  
C.C.: 1719940676

## Dedicatoria

El presente proyecto de investigación se lo dedico primeramente a Dios, mi guía y sustento, cuya gracia infinita ha iluminado mi camino académico.

A mis padres José Fernando Toalombo Villacis y Carmen Amelia Ochoa Sumbay, héroes silenciosos y fuente inagotable de amor y apoyo, les dedico estas páginas con gratitud infinita. Su sacrificio y dedicación han sido la fuerza impulsora detrás de mis logros. En los momentos de duda, su aliento resonaba como un eco alentador, recordándome que debo superar cualquier obstáculo. Este trabajo no solo es el resultado de mi esfuerzo, sino también de su incansable respaldo y amor incondicional.

A mi hermano Denis Santiago Toalombo Ochoa, por ser un pilar fundamental en mi vida, un confidente que, con sus palabras de ánimo, cada gesto de apoyo ha dejado una huella en mi corazón y en esta tesis.

A toda mi familia que esta de tras, tanto de parte de mi padre como mi madre, que de igual manera hay sabido apoyarme con consejos, económicamente y palabras de aliento para no rendirme en el trascurso de la realización de este proyecto. Y a mi abuelo Manuel Ochoa Sangucho que desde el cielo me bendice y me guía en mi camino

***Darwin Fernando***

## **Dedicatoria**

El presente proyecto de investigación se lo dedico a mi madre Nancy Adita López Guerrero, por acompañarme en toda esta etapa, darme su apoyo en las buenas y las malas, cuando todo se venía abajo y me reconfortaba con sus palabras, su apoyo incondicional ha sido mi principal motor para mantenerme en este camino. Su sabiduría, su paciencia, su amor me han llevado a convertirme en profesional.

A mi padre Denis Patricio Jácome Barbosa, por ser quien apporto con la primera piedra para construir este camino hacia mi título profesional. Mi hermana Daniela Jácome que es mi eterna confidente, con quien hemos compartido muchas circunstancias y muchas veces sin que lo sepa pudo reconfortarme para continuar.

Mis primos Javier, Daniel y Andrés Sánchez Guerrero, quienes fueron mi inspiración para seguir mis estudios de ingeniería, fuente de sabiduría y consejos que formaron parte de mi camino estudiantil y mi desarrollo como persona, a quienes les tengo una enorme gratitud.

A mis tíos los Jácomes, que me apoyaron en gran manera en mi camino de estudios, con sus palabras y su ayuda, me dieron fuerzas siempre para continuar, a no decaer y mantenerme luchando para lograr mi tan anhelado título profesional.

Lo dedico a mí, para que este logro sirva como recordatorio constante de la dedicación, perseverancia. Que sirva como demostración que ante las circunstancias desafiantes siempre se puede seguir adelante.

***Dennis Jácome***

## **Agradecimiento**

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a Dios, cuya gracia ha sido mi fuerza y mi guía a lo largo de este viaje académico. Su amor incondicional y dirección constare han iluminado cada paso de este proceso, otorgándome la perseverancia y sabiduría necesaria para alcanzar este logro.

Agradecer a mis padres, mis héroes y pilares fundamentales, les debo ya deuda de gratitud que nunca podre saldar completamente. Su sacrificio, apoyo inquebrantable y amor infinito han sido el motor detrás de mis éxitos. Cada palabra de aliento, cada gesto de confianza ha sido un recordatorio constante de que puedo lograr cualquier cosa con su respaldo. Agradezco a mi hermano por sus palabras alentadoras y comprensión, han sido faros luminosos en momentos de desafío.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Carrera de Electromecánica y a todos los docentes que estuvieron inmersos en mi formación profesional.

A la Ing. Jacqueline Llanos MSC. PHD por haber compartido su conocimiento como directora del proyecto y su apoyo incondicional para lograr la culminación del mismo.

A todos mis seres queridos y amigos que han sido una fuente inagotable de apoyo, inspiración a lo largo de esta travesía académica.

***Darwin Fernando***



## **Agradecimiento**

A mi madre, por su sacrificio, entrega y apoyo incondicional, que me llevaron por este camino de perseverancia que, aunque fue difícil me permitieron culminar esta etapa.

A mi hermana, a mi mejor amigo, que dieron siempre un empujón, necesario cuando alcanzan las fuerzas para continuar, su cariño y apoyo convirtieron a esta etapa más llevadera, lo cual me permitió lograr mi formación profesional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, a la Carrera de Ingeniería en Electromecánica, por mostrarme el camino a seguir y a los docentes que me compartieron su conocimiento y sabiduría para mi formación como profesional.

A la Ingeniera Katya Torres, quien fue una guía y una fuente de ayuda en el transcurso de la carrera, su apoyo, conocimiento y sus palabras fueron fundamentales para que pueda continuar con mis estudios, con quien estaré eternamente agradecido.

A la Ing. Jacqueline Llanos, MSC, PhD, por su destacada excelencia profesional. Su gran trayectoria y forma de enseñanza que han sido importantes en mi desarrollo académico, su incondicional apoyo ha sido crucial para lograr culminar este proyecto con éxito."

A Darwin Toalombo, por su paciencia, sus palabras y su ayuda continua, que conjuntamente con mis amigos de la carrera hicieron que esta sea una de las etapas más gratificantes, gracias por todo su apoyo y amistad.

***Dennis Jácome***

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula .....	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación .....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Dedicatoria .....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido .....	10
Índice de figuras .....	14
Índice de tablas.....	16
Índice de ecuaciones.....	17
Resumen.....	19
Abstract .....	20
Capítulo I: Marco metodológico de la investigación .....	21
Antecedentes investigativos .....	21
Planteamiento del problema.....	24
Justificación e importancia .....	27
Alcance .....	28
Objetivos.....	29
<i>Objetivo General</i> .....	29
<i>Objetivos Específicos</i> .....	29
Hipótesis .....	29
Capítulo II: Estado del arte .....	30

Microrred.....	30
<i>Microrredes inteligentes</i> .....	31
Sistemas híbridos de generación de energía eléctrica.....	32
<i>Sistemas de generación híbrida aislados (off grid)</i> .....	34
<i>Sistemas de generación híbrida conectados a la red (on grid)</i> .....	35
Diseño y dimensionamiento de los sistemas híbridos fotovoltaicos .....	37
Métodos o dimensionamientos de un sistema híbrido fotovoltaico.....	39
<i>Método tradicional Horas Sol Pico (HSP)</i> .....	39
<i>Dimensionamiento de la instalación</i> .....	39
<i>Método optimizado</i> .....	41
<i>¿Qué es un modelo?</i> .....	41
<i>Programación lineal</i> .....	41
<i>Programación lineal entera-mixta</i> .....	42
Método de optimización determinística.....	43
Método de optimización estocástica.....	43
<i>Variables de decisión</i> .....	44
<i>Función objetivo</i> .....	45
<i>Restricciones</i> .....	45
Capítulo III: Metodología.....	47
Metodología para el diseño y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico híbrido.....	47
Levantamiento de información.....	48
<i>Caracterización de la demanda</i> .....	48
<i>Obtención de recurso</i> .....	49
Procedimiento para el diseño del sistema fotovoltaico híbrido por el dimensionamiento tradicional de Horas Sol Pico (HSP) .....	49

Dimensionamiento optimizado.....	56
Formulación del problema de optimización .....	56
<i>Función objetivo</i> .....	56
<i>Modelación del Sistema fotovoltaico</i> .....	58
Modelación del BESS.....	60
Modelamiento del inversor .....	64
Ecuación de balance .....	64
Capítulo IV: Caso de Estudio .....	67
Ubicación .....	67
Determinación de la irradiancia en la zona.....	67
Horas Sol Pico (HSP) .....	71
Caracterización de la demanda .....	71
Capítulo V: Análisis de Resultados .....	74
Análisis del dimensionamiento tradicional HSP .....	74
Análisis del dimensionamiento optimizado.....	83
<i>Dimensionamiento optimizado asilado</i> .....	83
<i>Dimensionamiento optimizado conectado a la red</i> .....	86
Implementación .....	90
Selección del dimensionamiento .....	98
Análisis de Costos .....	98
Análisis VAN y TIR .....	100
Dimensionamiento optimizado Aislado .....	101
Dimensionamiento Optimizado Conectado a red.....	103
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones .....	105
Conclusiones.....	105
Recomendaciones.....	109

<b>Bibliografía .....</b>	<b>110</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>114</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama causa-efecto del planteamiento del problema</i> .....	25
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama esquemático del sistema híbrido de un sistema fotovoltaico y baterías de almacenamiento</i> .....	26
<b>Figura 3</b> <i>Esquema típico de una microrred</i> .....	31
<b>Figura 4</b> <i>Esquema de un sistema híbrido</i> .....	33
<b>Figura 5</b> <i>Sistema de generación híbrida asilada</i> .....	35
<b>Figura 6</b> <i>Sistema de generación híbrida conectado a la red</i> .....	37
<b>Figura 7</b> <i>Sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red</i> .....	38
<b>Figura 8</b> <i>Conjunto de soluciones factibles de un PPLEE</i> .....	42
<b>Figura 9</b> <i>Esquema metodológico</i> .....	47
<b>Figura 10</b> <i>Elementos de consumo</i> .....	49
<b>Figura 11</b> <i>Ubicación del edificio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones</i> .....	67
<b>Figura 12</b> <i>Curvas de Irradiancia Mensual</i> .....	70
<b>Figura 13</b> <i>Curva de demanda del laboratorio</i> .....	72
<b>Figura 14</b> <i>Arreglo de baterías</i> .....	79
<b>Figura 15</b> <i>Arreglo de paneles fotovoltaicos 2 en serie y 9 en paralelo</i> .....	81
<b>Figura 16</b> <i>Suministro a la demanda por parte del sistema híbrido aislado</i> .....	84
<b>Figura 17</b> <i>Porcentaje de participación de los elementos</i> .....	85
<b>Figura 18</b> <i>Descarga de las BESS en el modo aislado</i> .....	85
<b>Figura 19</b> <i>Energía que suministra el sistema híbrido en un año</i> .....	86
<b>Figura 20</b> <i>Suministro a la demanda por parte del sistema híbrido conectado a la red</i> .....	87
<b>Figura 21</b> <i>Porcentaje de participación de los elementos del sistema híbrido</i> .....	88
<b>Figura 22</b> <i>Energía que suministra la BESS</i> .....	89
<b>Figura 23</b> <i>Energía que suministra a la demanda en un año</i> .....	90
<b>Figura 24</b> <i>Arreglo fotovoltaico instalado en la azotea del laboratorio</i> .....	90

<b>Figura 25</b> <i>Tablero de monitoreo e inversor</i> .....	92
<b>Figura 26</b> <i>Banco de baterías</i> .....	93
<b>Figura 27</b> <i>Pruebas del sistema con cargas de 100W y 200W</i> .....	93
<b>Figura 28</b> <i>Monitoreo del sistema híbrido</i> .....	94
<b>Figura 29</b> <i>Datos de la instalación y consumo de las cargadas colocadas</i> .....	94
<b>Figura 30</b> <i>Datos de monitoreo del recurso solar de 0,4 kWh</i> .....	95
<b>Figura 31</b> <i>Centro de monitoreo online del sistema híbrido</i> .....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Irradiancia promedio mensual</i> .....	68
<b>Tabla 2</b> <i>Horas sol pico en la ubicación</i> .....	71
<b>Tabla 3</b> <i>Estimación de la demanda del laboratorio</i> .....	72
<b>Tabla 4</b> <i>Demanda en energía del laboratorio</i> .....	74
<b>Tabla 5</b> <i>Resultados del modelo optimizado aislado</i> .....	83
<b>Tabla 6</b> <i>Resultados modelo optimizado en conexión a la red</i> .....	87
<b>Tabla 7</b> <i>Comparación de los métodos utilizados</i> .....	97
<b>Tabla 8</b> <i>Costos de Equipos Diseño Tradicional</i> .....	99
<b>Tabla 9</b> <i>Costos de Equipos Diseño Optimizado Aislado</i> .....	99
<b>Tabla 10</b> <i>Costos de Equipos Diseño Optimizado Conectado a la red</i> .....	100
<b>Tabla 11</b> <i>Producción y costos de producción de energía modelo aislado</i> .....	101
<b>Tabla 12</b> <i>Inversión y producción de energía en 5 años</i> .....	101
<b>Tabla 13</b> <i>Tabla de VAN y TIR dimensionamiento Aislado</i> .....	102
<b>Tabla 14</b> <i>Producción y costos de producción de energía modelo conectado a la red</i> .....	103
<b>Tabla 15</b> <i>Inversión y producción de energía, dimensionamiento conectado a la red</i> .....	103
<b>Tabla 16</b> <i>Tabla de VAN y TIR dimensionamiento conectado a la red</i> .....	103



## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1</b> <i>Restricción explícita</i> .....	46
<b>Ecuación 2</b> <i>Restricción implícita para las manzanas</i> .....	46
<b>Ecuación 3</b> <i>Restricción implícita para las naranjas</i> .....	46
<b>Ecuación 4</b> <i>Restricción de igualdad de gasto total de \$D</i> .....	46
<b>Ecuación 5</b> <i>Energía total</i> .....	50
<b>Ecuación 6</b> <i>Rendimiento genérico de la instalación</i> .....	50
<b>Ecuación 7</b> <i>Energía diaria que debe recibir el acumulador</i> .....	51
<b>Ecuación 8</b> <i>Capacidad útil del acumulador</i> .....	51
<b>Ecuación 9</b> <i>Capacidad total del acumulador</i> .....	51
<b>Ecuación 10</b> <i>Número de acumuladores en serie</i> .....	52
<b>Ecuación 11</b> <i>Número de acumuladores que en paralelo</i> .....	52
<b>Ecuación 12</b> <i>Número total de acumuladores</i> .....	52
<b>Ecuación 13</b> <i>Potencia del generador fotovoltaico</i> .....	53
<b>Ecuación 14</b> <i>Potencia nominal del generador fotovoltaico</i> .....	53
<b>Ecuación 15</b> <i>Número de módulos en serie del generador FV</i> .....	53
<b>Ecuación 16</b> <i>Número de ramas en paralelo del generador FV</i> .....	54
<b>Ecuación 17</b> <i>Número total de módulos</i> .....	54
<b>Ecuación 18</b> <i>Potencia pico instalada</i> .....	54
<b>Ecuación 19</b> <i>Intensidad de cortocircuito del generador FV</i> .....	54
<b>Ecuación 20</b> <i>Comprobación</i> .....	55
<b>Ecuación 21</b> <i>Corriente a seleccionar del regulador más adecuado</i> .....	55
<b>Ecuación 22</b> <i>Intensidad de entrada del regulador</i> .....	55
<b>Ecuación 23</b> <i>Potencia nominal del inversor</i> .....	56
<b>Ecuación 24</b> <i>Función objetivo</i> .....	57
<b>Ecuación 25</b> <i>Costos de inversión</i> .....	57

<b>Ecuación 26</b> <i>Costos de operación</i> .....	57
<b>Ecuación 27</b> <i>Potencia activa del sistema fotovoltaico</i> .....	59
<b>Ecuación 28</b> <i>Temperatura de las células solares</i> .....	59
<b>Ecuación 29</b> <i>Área aproximada que se dispone</i> .....	60
<b>Ecuación 30</b> <i>Capacidad del BESS</i> .....	60
<b>Ecuación 31</b> <i>Energía disponible en el BESS</i> .....	61
<b>Ecuación 32</b> <i>Cantidad inicial de energía en la batería</i> .....	62
<b>Ecuación 33</b> <i>Energía disponible en el BESS</i> .....	62
<b>Ecuación 34</b> <i>Energía disponible en el BESS</i> .....	62
<b>Ecuación 35</b> <i>Limitaciones de carga y descarga</i> .....	63
<b>Ecuación 36</b> <i>Restricción de estado de carga</i> .....	63
<b>Ecuación 37</b> <i>Restricción del dimensionamiento del inversor</i> .....	64
<b>Ecuación 38</b> <i>Ecuación de balance</i> .....	65
<b>Ecuación 39</b> <i>Restricción de energía no suministrada</i> .....	65
<b>Ecuación 40</b> <i>Restricción de vertimiento</i> .....	65
<b>Ecuación 41</b> <i>Restricción de la energía no suministrada</i> .....	66
<b>Ecuación 42</b> <i>Restricción de conexión a la red</i> .....	66
<b>Ecuación 48</b> <i>Tasa de recuperación del capital</i> .....	100

## Resumen

En el presente trabajo de integración curricular se diseña e implementará un sistema de generación híbrida para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, el cual está conformado por paneles fotovoltaicos y un sistema de almacenamiento como baterías, este estudio permitirá determinar el equipamiento que se adquirió e instaló en el campus. Gracias a este sistema de generación híbrida de energía, se logrará que el campus se vaya convirtiendo en una aérea sustentable. Para este sistema híbrido se realizará un levantamiento de información como por ejemplo la evaluación de datos, irradiación, teniendo en cuenta el área que ocupan los paneles y los diferentes dispositivos que conforman este sistema híbrido, se toma en cuenta la caracterización de la demanda para poder lograr un correcto dimensionamiento del sistema híbrido. Se emplea un diseño óptimo de un sistema híbrido para abastecer la demanda del laboratorio de energías renovables, pero respetando las condiciones físicas e infraestructura del edificio del laboratorio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, este sistema fue instalado en la azotea del edificio como un apoyo para al sistema que ya existe instalado en el edificio. Considerando tanto las variables climáticas como variables de entrada, para posteriormente realizar un proceso de optimización, el cual permitirá obtener los valores óptimos de las unidades de generación.

Se realiza un estudio de mercado, para identificar los proveedores, buscando las mejores opciones con los diferentes proveedores, para después realizar la adquisición de los diferentes equipos que conforman la implementación del proyecto. En este trabajo se realizaron y compararon tres diseños, el primero un tradicional, un óptimo conectado a la red y un óptimo aislado de la red, se comparan los tres previo a la implementación.

*Palabras clave:* Sistema híbrido de generación, Panel fotovoltaico, Métodos de optimización, Energías renovables

## Abstract

In this curricular integration work, a hybrid generation system is designed and implemented for the University of the Armed Forces ESPE, Gral. Guillermo Rodríguez Lara campus, which is made up of photovoltaic panels and a storage system such as batteries. This study will determine the equipment that was purchased and installed on campus. Thanks to this hybrid energy generation system, the campus will become a sustainable area. For this hybrid system, an information survey will be carried out, such as the evaluation of irradiation data, taking into account the area occupied by the panels and the different devices that make up this hybrid system, the characterization of the demand is taken into account in order to achieve correct sizing of the hybrid system. An optimal design of a hybrid system is used to supply the demand of the renewable energy laboratory, but respecting the physical conditions and infrastructure of the Electrical, Electronics and Telecommunications laboratory building, this system was installed on the roof of the building as a support for to the system that already exists installed in the building. Considering both the climatic variables and input variables, to subsequently carry out an optimization process which will allow obtaining the optimal values of the generation units. A market study is carried out to identify suppliers, looking for the best options with the different suppliers and then purchasing the different equipment that makes up the implementation of the project. In this work, three designs were carried out and compared, the first a traditional one, an optimal one connected to the network and an optimal one isolated from the network, the three are compared prior to implementation.

Keywords: Hybrid generation system, Photovoltaic panel, Optimization methods, Renewable energies

## Capítulo I

### Marco metodológico de la investigación

#### Antecedentes investigativos

Debido a la problemática que existe entre Rusia y Ucrania, se dio una crisis energética mundial, provocando serios aumentos en el precio del petróleo, gas natural y el carbón. Resultando que los precios en la electricidad en Europa aumentarían, porque las plantas que se alimentan con gas natural son las que fijan los precios en el mercado mayorista, por el contrario, los altos precios han dado un gran beneficio a algunas empresas energéticas. En el primer semestre de 2022, las empresas de petróleo, gas, carbón y refinería duplicaron sus creces con respecto al periodo del año 2021, dando lugar a un debate sobre estos beneficios en la Unión Europea se han extendido a los entes de generadores de electricidad incluyendo los basados en energías renovables que pueden producir a costes marginales más bajos que los que se basan en gas natural (AIE, 2022).

Los planes de políticas que se plantea la Unión Europea hacen que más de la mitad de la capacidad de energías renovables a una escala comercial y de servicio públicos, incluyendo la energía hidroeléctrica, sean elegibles para recibir un mayor precio al ofrecer su servicio al por mayor. Por otro lado, sin tomar en cuenta, la energía hidroeléctrica tiene un 40% inferior a las energías renovables como la eólica, solar fotovoltaica y bioenergética (AIE, 2022).

California enfrenta apagones de electricidad durante el verano, es posible que durante los próximos cinco veranos y otros tipos de impactos del cambio climático puedan afectar a la confiabilidad de la red eléctrica de California, provocando que no se pueda abastecer a la demanda si llegan las olas de calor, provocando que exista más sequías y que las hidroeléctricas no estén a disposición y que los incendios forestales incrementen reduciendo la transmisión de electricidad. Los funcionarios estatales y de la red de California se enfrentan a estos apagones de electricidad, debido a la escasez de suministro de energía. Los funcionarios tratan de evitar los apagones que ocurrieron en agosto de 2020, ya que en ese momento se

produjo apagones continuos un sábado en la noche y unas horas la siguiente noche y por si fuera peor, el suministro eléctrico se mantuvo escaso durante todo ese mes (Mulkern & News, 2022).

El gobierno de Ecuador, el 27 de octubre de 2023, dio a conocer los racionamientos eléctricos continuos, los cuales fueron de cuatro horas en las regiones Sierra y Amazonía, y de tres horas en la región Costa. Los horarios previstos de corte de energía eléctrica fueron establecidos por las empresas eléctricas de cada región, desde las 07:00 a.m a 06:00 p.m, descartando los apagones en la noche o madrugada debido a la inseguridad que vive el país. Las empresas eléctricas dosificaron los apagones y crearon cronogramas de los cortes de energía eléctrica a través de sus sitios web (Cañizares, 2023).

Ante la crisis energética que enfrenta el país, la central Mazar garantizó el abastecimiento de energía eléctrica, mientras que Coca Codo Sinclair entró en mantenimiento los días 6 y 7 de enero de 2024. La central Mazar el 5 de enero presentó una cota en la represa de 2,146 metros sobre el nivel del mar (msnm), lo que resulta favorable para el abastecimiento de energía eléctrica al país (Ministerio de Energías y Minas, 2024).

Ecuador entró en una crisis energética donde la población enfrento apagones diarios donde se vio a amenazado no solo la situación económica sino también la comodidad de los ciudadanos. Durante el primer mes las cifras alcanzadas fueron de mil millones dólares, si la situación continua estas cifras podría duplicarse. Los sectores que más fueron afectados por esta situación son el productivo, turístico y el camaronero (Confirmado.net; Roger, 2023).

La Cámara de Comercio de Quito estima que una empresa mediana a grande por los cortes de energía eléctrica podría perder entre USD 28000 y 30000 dólares por hora. Por otra parte, la Cámara de Comercio de Guayaquil estima que el sector productivo ya ha perdido USD 438 millones debido a los cortes sucedidos (Primicias, 2023).

Existe una necesidad de buscar energías alternativas y amigables con el medio ambiente, dando como resultado las tecnologías de energías renovables, ya que estas son

elementos importantes y unas alternativas técnicas y económicamente viables. Actualmente el sistema energético cumple un papel importante en la agenda científica, política, económica y social (Perino et al., 2021).

En este contexto, se han generado y creado nuevas estrategias invirtiendo en nuevos recursos para poder desarrollar y fortalecer un modelo energético en el que se enfoque los principios con prioridades ambientales orientadas al bienestar general, con el objetivo de que se aborde los desafíos a futuro. Este enfoque se basa en la variedad de opciones de alternativas naturales que se dispone para la generación de energía limpia y lo más importante se trata de convertir eficientemente y de manera sostenible y económica la radiación solar, viento, biomasa y el agua en electricidad, calor o energía. Por consiguiente, un sistema energético en la cual se base en fuentes de generación de energías renovables ya sea solar, hidroeléctrica, eólica, biomas o geotérmica. Teniendo así implicaciones ético-ecológicas significativas que deben ser consideradas y analizadas estratégicamente dentro del marco del desarrollo sostenible (Perino et al., 2021).

Canadá, Suecia, Dinamarca, Portugal, Chile, Alemania, España, Italia, Reino Unido, Irlanda son los 10 países líderes en el mundo por consumir electricidad proveniente de las energías renovables. Estos países han implementado políticas gubernamentales que apoyan al desarrollo de estas tecnologías renovables, así contribuyendo al crecimiento de estas y lo más importante reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles (Kurbatova y Perederii, 2020).

En lugares remotos, como en las costas o islas, es muy difícil tener acceso a la conexión del sistema eléctrico y en otros casos resulta demasiado costoso, es por ello que actualmente la tecnología e integración de sistemas solares fotovoltaicos en las redes de distribución para el suministro eléctrico son una alternativa para que usuarios industriales camaroneros, ya que optan por adquirir estos sistemas, además de poder abastecer la demanda estos sistemas ofrecen fiabilidad y una rápida recuperación de la inversión. En

Ecuador existen fincas camaroneras que al integrar los sistemas fotovoltaicos de generación solar pueden abastecer la demanda eléctrica en la provincia del Oro en el Puerto Pitahaya perteneciente al cantón Arenillas, donde se realizó un estudio sobre el recurso solar del lugar dando como resultado un promedio de 133,02 kWh/m<sup>2</sup>-mes, el costo de inversión por kW de la inserción de esta alternativa es de \$415,8 representando así un precio competitivo y también mejorando la eficiencia energética de la producción en el sector camaronero de Ecuador (Pesantez et al., 2021).

En Ecuador se tiene un gran recurso solar ya que se encuentra ubicado en una zona tropical, gracias a esto el gobierno busca promover más las energías renovables incluyendo la solar por lo que el objetivo principal es alcanzar una participación del 15% de energía limpia en la matriz para el año 2030. El país cuenta con una capacidad fotovoltaica estimada de 15GW. En un análisis económico sobre estas energías renovables en el Ecuador, el precio promedio de venta de energía por las empresas de generación en el año 2020 se registra un valor de 2,26 \$/kWh. La agencia ARCERNNR (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables) en el año 2022 señala que en el sector eléctrico que la CELEC (Corporación Eléctrica del Ecuador) EP Unidad de Negocios Coca Codo Sinclair obtuvo un precio medio más bajo por contratos de 0,95\$/kWh, mientras que las centrales que se basan en generación fotovoltaica obtuvieron un valor más alto de 40,0.3\$/kWh, estas se acogieron a la Regulación Nro. CONELEC 004/11 (Consejo Nacional de Electricidad) de precios preferentes que existían en ese momento (Inca et al., 2023).

### **Planteamiento del problema**

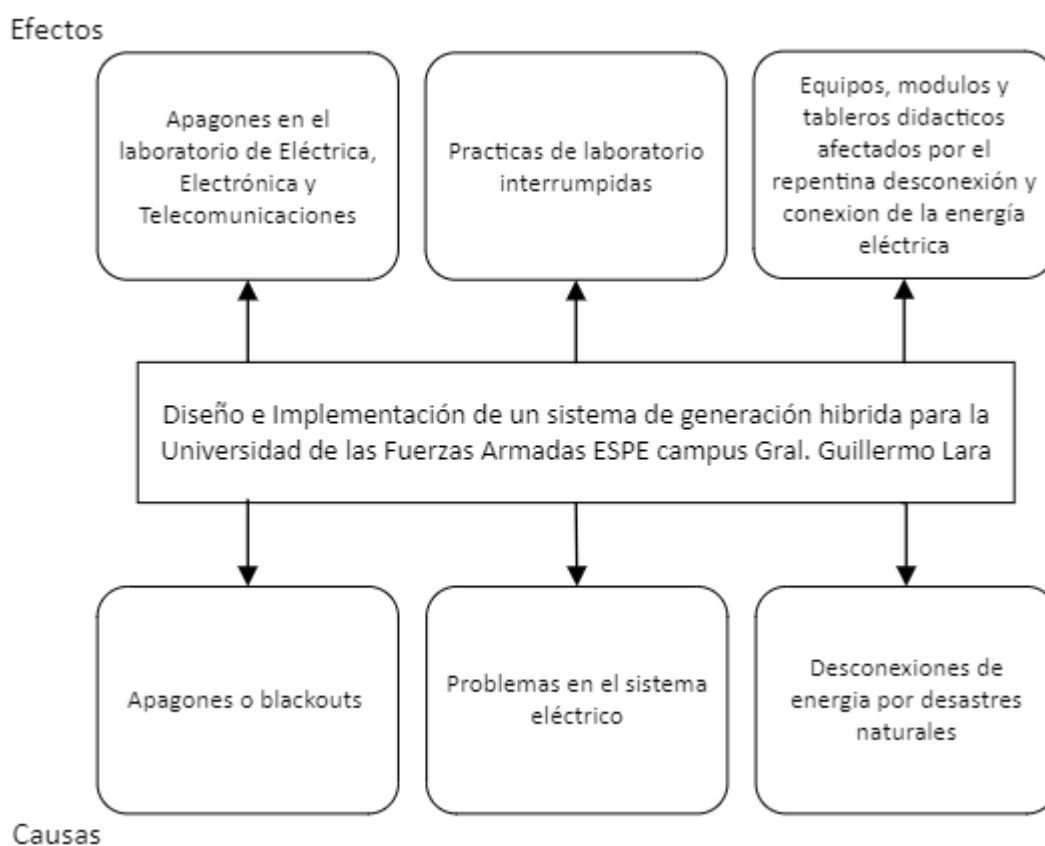
A continuación, en la figura 1 se presenta el árbol de causa-efecto con respecto al proyecto realizado, debido a los apárganos que existe a finales del año 2023 en Ecuador, los laboratorios también fueron afectados por estos apagones por lo que puede producir daños en los dispositivos electrónicos o eléctricos del laboratorio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones debido a que no se puede estabilizar rápidamente el sistema. Así mismo



se puede ver interrumpidas las practicas que los estudiantes realizan en los laboratorios, retrasando el proceso de aprendizaje y enseñanza de los estudiantes, es por ello por lo que se busca que el laboratorio se pueda abastecer de energía eléctrica implementando un sistema híbrido, haciendo que la universidad adopte el concepto de sostenibilidad haciendo uso de las energías renovables.

### Figura 1

*Diagrama causa-efecto del planteamiento del problema*



*Nota.* La figura muestra las causas principales del problema y sus efectos.

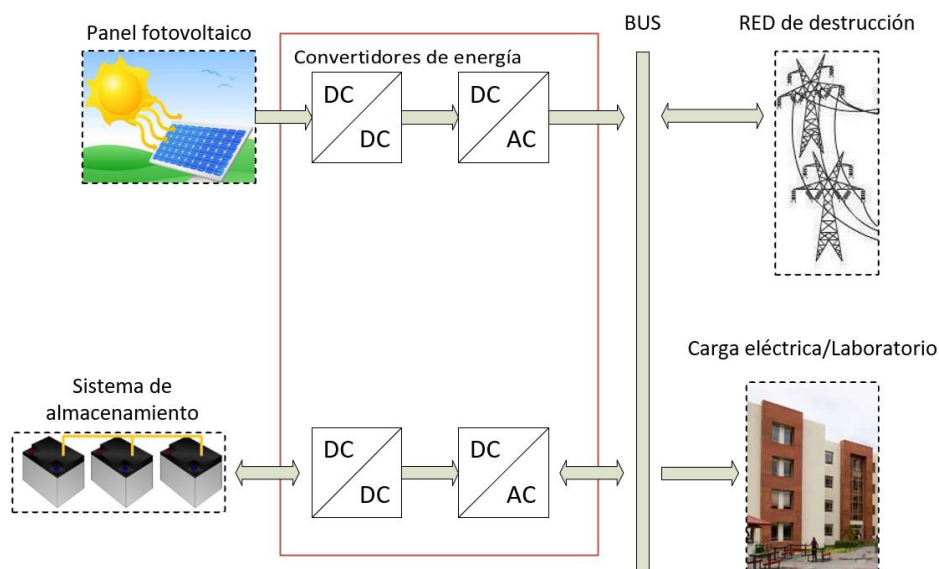
La insuficiencia de energías limpias en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, en el edificio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, ha hecho que se implemente varios proyectos sobre energías renovables. Esta limitación a generado una serie de desafíos en la capacidad de abastecimiento local, impulsando a incrementar la capacidad de energías limpias para asegurar

una provisión sostenible y eficiente buscando abastecer la demanda total de la institución universitaria.

Por otro lado, es importante el conocimiento sobre el impacto ambiental y económico que representa el generar electricidad a partir de recursos fósiles o fuentes no renovables. Sin embargo, se busca abordar este problema con la inserción de proyectos de implementación de sistemas de generación fotovoltaica. Es importante abordar la problemática desde una perspectiva integral ya que se considera no solo mejorar la capacidad de un sistema híbrido fotovoltaico conectado a la red, sino también se busca contribuir a la reducción de la huella ambiental y el impulso económico que representa el uso de energías no renovables. Al desarrollar este sistema no solo se beneficia la universidad sino también busca a que la universidad sea un ejemplo de liderazgo en sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

## Figura 2

*Diagrama esquemático del sistema híbrido de un sistema fotovoltaico y baterías de almacenamiento*



*Nota.* La figura muestra un esquema del sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red.

## **Justificación e importancia**

Hoy en día es imperativo considerar el consumo de energías renovables para contribuir a la preservación del medio ambiente y la reducción de la huella del carbono. La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Gral. El Campus Guillermo Lara ha implementado sistemas de generación fotovoltaica en el Laboratorio de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones, aunque enfrenta la limitación de una fuerte dependencia de la red eléctrica convencional.

Centrándose en la resiliencia energética del campus, particularmente en una región sísmica y volcánica, la implementación de un sistema de generación híbrida se presenta como una solución para dejar de garantizar la continuidad del sistema de la red eléctrica. Incluso en situaciones de eventos sobrenaturales los cuales podrían afectar al SNI (Sistema Nacional Interconectado).

Este proyecto, se centró en la implementación de un sistema híbrido en la azotea del edificio del laboratorio, donde es asegurando la disponibilidad del recurso de energía solar y donde se cuenta con la información y los fondos económicos necesarios para su realización. Al mismo tiempo, mejorar la sostenibilidad energética del laboratorio de energías renovables y, con suerte, servirá como modelo para futuras investigaciones y como una herramienta de aprendizaje para estudiantes y profesores interesados en energías renovables y sistemas híbridos. A nivel disciplinar, el proyecto contribuye a la investigación de fuentes de energía renovables alternativas y destaca la importancia de los sistemas fotovoltaicos híbridos conectados a la red para mejorar la eficiencia energética. La implementación de un sistema híbrido aumentará la producción de energía limpia y reducirá la dependencia de fuentes auxiliares de energía no renovable. Además, el proyecto pretende proporcionar datos sobre irradiación, diseño e implementación del sistema híbrido, así como proponer una ficha técnica detallada. La aplicación práctica de este proyecto permitirá a la universidad evolucionar hacia un modelo más sostenible y eficaz, contribuyendo al desarrollo a largo plazo y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Porque el proyecto utiliza una tecnología avanzada,

que le permite generar conocimiento y experiencia, tanto en el campo de las energías renovables como en el diseño de proyectos. Además, es necesario asegurar un suministro continuo de energía cuando suceda un corte de electricidad, como ha venido sucediendo a finales del año 2023 e inicios del año 2024, otro factor importante es la ausencia de radiación solar debido a las estaciones o condiciones climáticas que se presenten en ese momento es por ello que se asegura un suministro de energía por parte de las baterías del sistema instalado, gracias a este proyecto se incentiva la acogida de este tipo de tecnologías en diferentes laboratorios y otras instituciones.

### **Alcance**

El alcance de este proyecto de titulación se detalla a continuación:

- Proporcionar datos de irradiancia de la ubicación donde se encuentra el laboratorio.
- Diseñar el sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red primeramente por un método tradicional y después por un método de optimización.
- Proveer una ficha técnica acerca del funcionamiento y uso de los diferentes componentes que conforman el sistema.
- Generación de energía no contaminante.
- Cálculos de los paneles fotovoltaicos.
- Cálculos para el inversor y regulador MPPT.
- Cálculo para el número de baterías a implementar en el sistema
- Pruebas de funcionamiento de la instalación.
- Realizar un análisis económico y de funcionamiento de los equipos implementados.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

- Diseñar e implementar un sistema de generación híbrida para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara.

### ***Objetivos Específicos***

- Recopilar la suficiente información relevante para el diseño de un sistema de generación híbrida.
- Realizar el diseño del sistema de generación fotovoltaica híbrida que estará conectado a la red.
- Analizar los métodos de diseño, tradicional y óptimo del sistema híbrido.
- Comparar los métodos tradicional y óptimo para su respectiva implementación.
- Realizar un análisis de costos, para la implementación del sistema de generación híbrida.
- Implementar el sistema de generación híbrida.

## **Hipótesis**

¿Cómo sería el dimensionamiento óptimo del sistema híbrido de generación fotovoltaica, que incluyen paneles fotovoltaicos y baterías, para poder satisfacer de manera eficiente la demanda caracterizada que existe en el laboratorio de energías renovables, el cual se encuentra en el edificio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones ubicado en el campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara?

## Capítulo II

### Estado del arte

#### Microrred

Una microrred es un conjunto de generadores distribuidos interconectados que operan de una manera coordinada para abastecer la demanda, tienen la capacidad de autoabastecerse y pueden operar de forma aislada, en caso de ser necesario. Puede incluir el almacenamiento y el transporte eléctrico (Llano, 2015).

También se puede definir como un conjunto de generadores distribuidos que operan en forma coordinada para abastecer demanda. Las microrredes al estar interconectadas entre cargas y recursos de energía distribuida deben trabajar dentro de los límites eléctricos establecidos, estas microrredes actúan como una única unidad controlable donde pueden actuar de manera conectada o desconectada de la red eléctrica principal, esta última siendo el concepto de trabajar de manera aislada o de forma autónoma (Paredes et al., 2019).

En el caso de que exista un corte de energía eléctrica y no pueda suministrar a la demanda por parte de la red pública, la microrred desempeña un rol importante, ya que como se menciona anteriormente este puede operar de manera autónoma, suministrará de energía eléctrica a la demanda requerida sin depender de un sistema de alimentación externo, aparte de las microrredes aisladas y conectadas a la red se pueden encontrar también con microrredes que suministran a demandas de carácter público, comunitario, comerciales, industriales, hospitales o ligadas a bases militares conocidas como las destinadas para servicios, también se puede encontrar con nano redes, las cuales son destinados para pequeñas demandas o para puntos de consumo definido. A continuación, en la Figura 3 se presenta un diagrama típico de una microrred, donde se puede observar sistemas basados en energías renovables (eólica, fotovoltaica, hídrica) y estas a su vez están interconectadas con los demás sistemas y la red pública (Ojeda, 2022).



los diferentes proveedores que existen, los consumidores, y redes que están encargadas de la transmisión a largas distancias, incluida la parte de distribución (Hassan y Radman, 2010).

### **Sistemas híbridos de generación de energía eléctrica**

Los sistemas de generación híbrida se pueden combinar con uno o más instalaciones para conformar un solo sistema, los sistemas híbridos están conformados por fuentes de generación renovable y de ser necesario se pueden integrar con grupos electrógenos, este último se lo puede integrar solo en casos de emergencia (Ávila et al., 2011).

Los sistemas híbridos están conformados por las energías renovables, esto con el objetivo de mejorar la eficiencia y garantizar un abastecimiento continuo de energía eléctrica a la demanda. Esta idea ha sido adoptada por las grandes ciudades para que edificaciones puedan autogenerar electricidad para su propio consumo o incluso puedan vender a las empresas distribuidoras de energía eléctrica (Carrión y Ortiz, 2013).

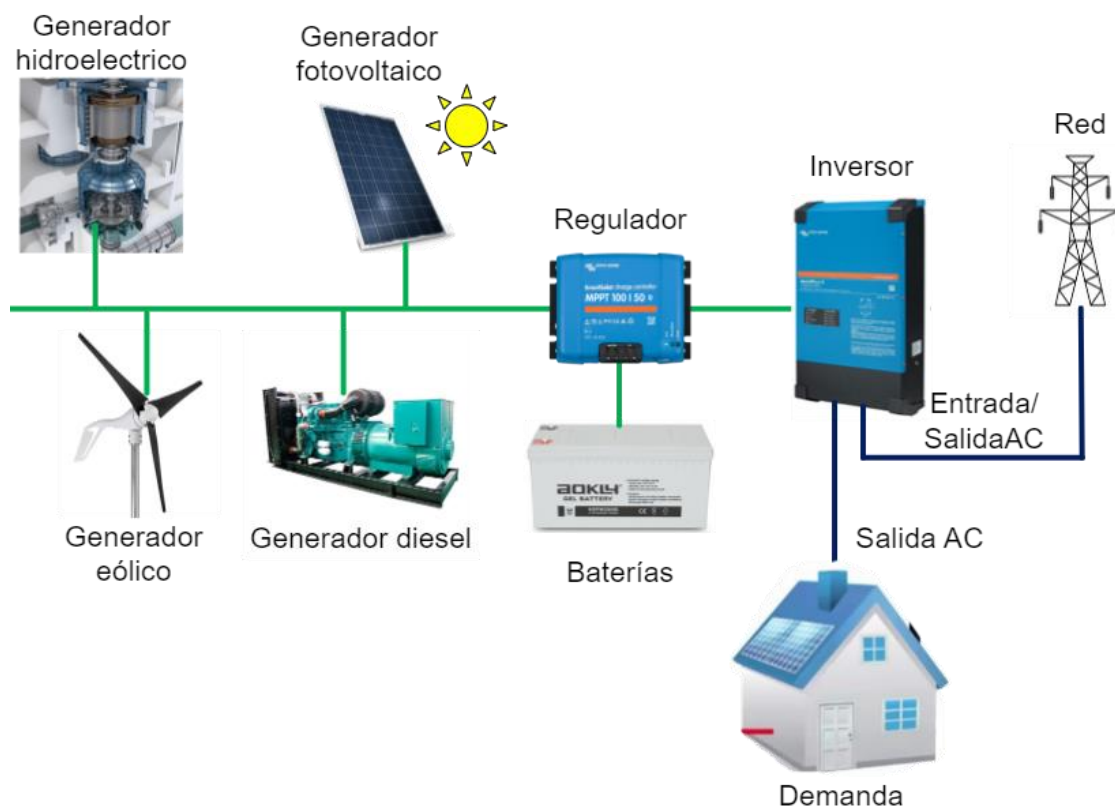
Los sistemas de generación híbrida están conformados por varios sistemas donde se integran del ámbito convencional o de origen renovable, con el objetivo de garantizar el suministro eléctrico de manera continua. Haciendo que los sistemas híbridos se proyecten a que las fuentes renovables y los dispositivos de almacenamiento proporcionen el 80-90% de las necesidades energéticas de una demanda, dejando para casos extremos el uso de sistemas convencionales (Fossati, 2011).

En la Figura 4 se presenta un esquema de un sistema híbrido de generación eléctrica donde se hace uso de fuentes renovables, generación convencional, sistemas de almacenamiento, red y demanda.



**Figura 4**

*Esquema de un sistema híbrido*



*Nota.* La figura muestra es quema típico de un sistema híbrido para abastecer una demanda.

Sistema híbrido de la Figura 4 consta de varias unidades de generación de fuentes renovables como la eólica, hídrica y fotovoltaica. Cuenta con banco de baterías o unidades de almacenamiento, de la energía que es generada por las anteriores unidades de generación mencionadas. También consta unidades de generación no convencional como el generador diésel el cual usa combustibles fósiles. El sistema híbrido también cuenta con un sistema convertidor de energía que permite usar la energía de corriente continua producida por los paneles fotovoltaicos mediante el inversor de energía que convierte en corriente alterna, además de usar un regulador de carga, siendo estos importantes para el correcto funcionamiento del sistema. Estos sistemas pueden trabajar de modo aislado o conectado a la

red. Y por último se encuentran las cargas o demandas que van a ser suministradas (Fossati, 2011).

### ***Sistemas de generación híbrida aislados (off grid)***

Estos sistemas son implementados ya que hoy en día la energía eléctrica es importante para garantizar el suministro continuo de electricidad, en países que no tienen fácil acceso a este servicio, como por ejemplo África, se estima que 176 millones de personas tienen acceso a la energía eléctrica, es por ello que estos sistemas en conjunto con grupos electrógenos son parte de la solución, ya que son rentables y fiables. Los sistemas híbridos aislados cumplen un papel importante para los hospitales, fabricas, zonas rurales, antenas de comunicación y bases militares, ya que muchos de estos no pueden quedar sin suministro eléctrico por las diversas funciones que desempeñan. En los sistemas pueden estar incluidos grupos de generación a base de combustibles fósiles, pero esto representa un alto costo de los combustibles. Una solución es sistemas que estén compuestos por paneles fotovoltaicos, generadores eólicos, baterías de alto ciclo de funcionamiento y con esto se incentiva a la reducción del consumo de combustibles fósiles (Interempresas, 2017).

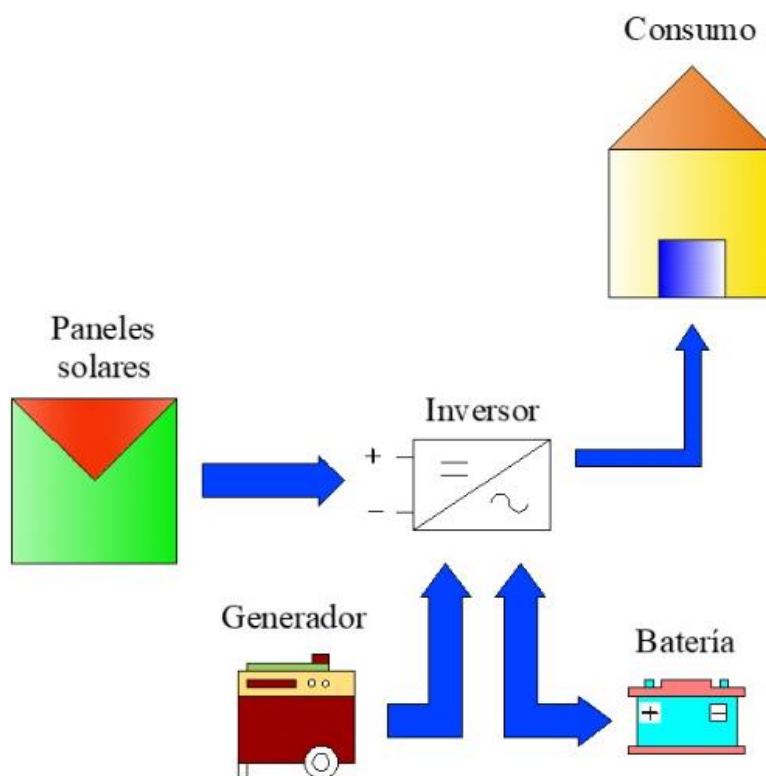
#### **Ventajas de los sistemas de generación híbridos aislados**

- Al implementar estos sistemas se puede autoabastecer a la demanda.
- Pueden ser instaladas a lugares remotos donde no se tiene una facilidad de acceso a la red pública.
- Se aprovecha de los recursos naturales como el viento, sol y agua.
- Se reduce el consumo de recursos provenientes de combustibles fósiles.
- Son sistemas rentables y fiables.
- Pueden funcionar en conjunto con otros sistemas de generación.

En la Figura 5 se presenta un esquema de los sistemas de generación híbridos aislados, donde se observa el sistema fotovoltaico, inversor, banco de baterías, otros tipos de generadores y el consumidor.

### Figura 5

*Sistema de generación híbrida aislada*



*Nota.* La figura muestra la configuración de un sistema de generación híbrida para autoconsumo, desconectado de la red. Tomado de (AactivoSolar, 2023).

### **Sistemas de generación híbrida conectados a la red (on grid)**

Estos sistemas dependen de la tecnología que se ocupe, ya que el trabajo del sistema es el de operar en conjunto con la red y esto depende de la tecnología del inversor, en el caso de un sistema fotovoltaico puede existir la posibilidad de que el recurso solar sea suficiente para abastecer la demanda en tiempo real, el sistema fotovoltaico puede suministrar

directamente o también se puede suministrar desde la energía que se almacene en las baterías, de lo contrario, si los sistemas anteriormente mencionados no pueden suministrar la demanda por completo, el inversor pasa a trabajar en conjunto con la red pública para lograr el suministro continuo de la demanda. En el caso de que el sistema presente excedentes de energía, el usuario de este sistema puede inyectar el excedente a la red eléctrica pública, para esto es necesario instalar un contador bidireccional, por lo que este dispositivo medirá la energía eléctrica que fue inyectada desde el sistema a la red (AactivoSolar, 2023).

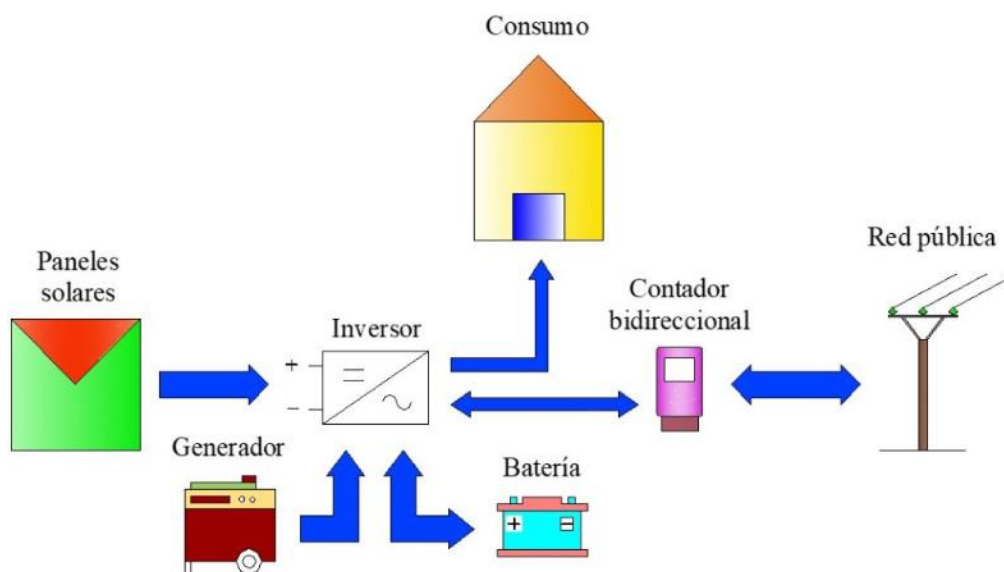
### **Ventajas de los sistemas híbridos conectados a la red**

- Pueden abastecer la demanda continuamente.
- Se puede tener beneficios gracias a que, si el sistema puede tener excedentes de energía, se puede aportar a la red eléctrica.
- De la misma forma que los aislados hace uso de energías limpias reduciendo el consumo de combustibles fósiles.
- Trabajan en conjunto con la red para poder abastecer la demanda.
- Dependiendo de la tecnología del inversor estos sistemas son apropiados para el suministro continuo de una demanda donde es esencial que este constantemente suministrada.

A continuación, en la Figura 6 se presenta un esquema de un sistema de generación híbrida conectada a la red, donde se muestra los mismos componentes de un sistema aislado, con la diferencia que aparece el contador bidireccional para medir la energía que puede inyectar a la red eléctrica pública.

**Figura 6**

*Sistema de generación híbrida conectado a la red*



*Nota.* La figura muestra la configuración de un sistema de generación híbrida conectada a la red. Tomado de (AactivoSolar, 2023).

### **Diseño y dimensionamiento de los sistemas híbridos fotovoltaicos**

Se puede definir al sistema fotovoltaico como un conjunto de dispositivos de elementos que están conectados entre sí para poder suministrar energía eléctrica, aprovechando la radiación solar y transformando la energía solar en energía eléctrica. El elemento principal de estos sistemas es el módulo o generador fotovoltaico, el cual hace la transformación de la energía. El arreglo o configuración de los paneles fotovoltaicos permiten tener valores voltaje y corriente a la salida de los generadores, estas configuraciones pueden ser en serie, paralelo o mixta. Los generadores fotovoltaicos generan una corriente continua (Sidrach, 2001).

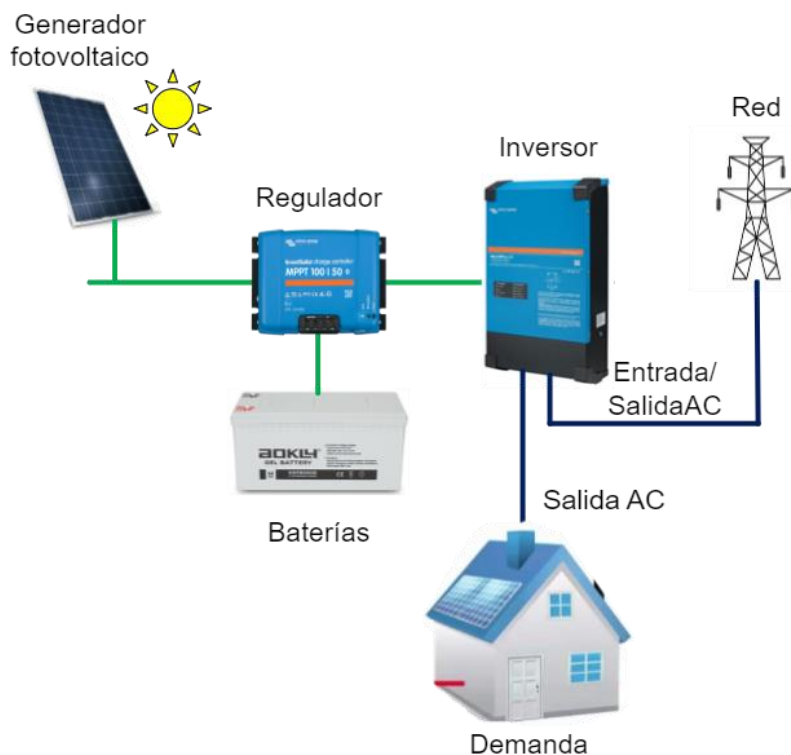
Para el diseño de los sistemas fotovoltaicos se tiene en cuenta el concepto de abarcar las tareas y especificaciones que deben realizarse para que el sistema fotovoltaico opere de manera satisfactoria, con una alta fiabilidad y a un costo bajo. Tomando en cuenta estos parámetros, existe varios factores que pueden afectar el diseño, uno de ellos es el perfil o

demanda de las cargas que vayan a ser suministradas con la instalación fotovoltaica, otro factor clave es la radiación solar de donde va a ser implementado el sistema. En cuanto al dimensionamiento del sistema híbrido fotovoltaico se entiende por el cálculo del tamaño óptimo de la instalación. Se debe considerar el tamaño y la capacidad del generador fotovoltaico, así mismo las baterías o el banco de baterías que se deben instalar para el sistema (Aguilera y Hontoria, s.f.).

A continuación, la Figura 7 se muestra un esquema de un sistema híbrido conectado a la red, el cual cuenta con el generador fotovoltaico, baterías, regulador, baterías y la red. También se puede observar que el sistema puede trabajar de forma aislada o conectado a la red, este depende de las características técnicas del inversor, la carga o demanda podrá ser suministrada con energía eléctrica.

### Figura 7

*Sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red*



*Nota.* La figura muestra la configuración de un sistema híbrido fotovoltaico el cual puede operar de forma aislada o conectada a la red dependiendo del inversor.

## Métodos o dimensionamientos de un sistema híbrido fotovoltaico

### *Método tradicional Horas Sol Pico (HSP)*

Para el método HSP se debe tener en cuenta la aplicación, es importante también tener en cuenta los criterios económicos y la seguridad (Lamo, s.f.).

Se debe tomar en cuenta criterios:

- **Ubicación:** se toma en cuenta la situación geográfica, la altura sobre el nivel del mar, la orientación de la instalación. Siendo estos datos tomados en cuenta para poder determinar la energía disponible (Lamo, s.f.).
- **Utilidad:** se debe definir la aplicación que va a tener el sistema a instalar ya sea bombeo solar, señalización, comunicación, viviendas, refugios, entre otros. Estos datos son necesarios para poder determinar el grado de seguridad (Lamo, s.f.).
- **Nivel de utilización:** se debe tomar en cuenta el nivel de uso con respecto a las horas diarias, días a la semana, periodos, estaciones o años completos, estos datos son importantes para poder determinar la energía que se consumirá y en que periodos se realiza el consumo y también se debe tener en cuenta los periodos de no consumo (Lamo, s.f.).
- **Necesidades energéticas:** se puede determinar en función de las potencias y horas en la que funcionara el sistema (Lamo, s.f.).

### *Dimensionamiento de la instalación*

Las HSP es necesario para poder determinar el número de módulos fotovoltaicos. Los datos técnicos de los módulos fotovoltaicos vienen referidos a una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , para lo cual es necesario que se identifique a cuantas horas de una irradiancia constante

corresponde la irradiación diaria en kWh/m<sup>2</sup>. Como ejemplo se puede tomar que una superficie durante el día 2,5 kWh/m<sup>2</sup>, para determinar a cuantas SHP equivalen, se divide la irradiación entre la irradiancia máxima (2,5 kWh/m<sup>2</sup>) / 1 kW/m<sup>2</sup> = 2,5 HSP (Lamo, s.f.).

La determinación del rendimiento genérico de la instalación se debe tomar factores o coeficientes de pérdidas del inversor, acumulador, profundidad de descarga del acumulador, número de días de autonomía, y otros coeficientes de pérdidas que pueden existir en la instalación. Para la determinación de la energía diaria que debe recibir el acumulador se debe tener en cuenta la energía total teórica requerida en 24 horas, llamada también como energía real necesaria que debe recibir el acumulador, con estos datos determinados se puede realizar el arreglo de acumuladores o baterías en serie y paralelo que debe tener el sistema (Lamo, s.f.).

Partiendo de la energía diaria que debe recibir el acumulador, es importante tener en cuenta determinar la energía que se debe suministrar del módulo fotovoltaico al acumulador. Un punto importante es que regulador estará conectado acumulador donde se debe tomar en cuenta el rendimiento de este. Por otra parte, es importante tener en cuenta la potencia nominal del módulo fotovoltaico, ya que es la potencia que se debe instalar como mínimo para que en función de las HSP determinadas este proporcione la energía diaria necesaria, un punto importante a considerar es el rendimiento del panel fotovoltaico, ya que, por factores como la suciedad, pérdidas por reflexión en incidencias muy oblicuas y por tolerancias pueden afectar en el rendimiento del módulo fotovoltaico. Los módulos fotovoltaicos se conectarán en serie o paralelo para cumplir con el voltaje y corriente requerida por el sistema (Lamo, s.f.).



## ***Método optimizado***

### ***¿Qué es un modelo?***

“Un modelo es la abstracción de un problema real, al cual se le aplicarán ciertas consideraciones matemáticas, permitiendo obtener resultados óptimos” (Pérez, 2019, p. 19)

La programación matemática es una herramienta técnica de modelado usada para tomar decisiones cuando se trata de resolver un problema, en la primera etapa se debe identificar las posibles decisiones que pueden tomarse, llevando a identificar las variables que se tiene en concreto del problema. Estas variables pueden ser de carácter cuantitativo, lo que se busca son valores que optimicen al objetivo. La siguiente etapa se basa en determinar que decisiones resultan admisibles, lo que lleva a tener restricciones que se determinan teniendo en cuenta la naturaleza del problema. En la siguiente etapa se lleva a cabo el cálculo del costo beneficio, la cual está involucrado con la decisión admisible, lo que lleva a determinar la función objetivo que asigna, a cada conjunto posible de los valores para las variables las cuales determinan una decisión. Los elementos anteriormente mencionados definen el concepto de un problema de optimización (Castillo et al., 2022).

### ***Programación lineal***

Este tipo de programación trata estrictamente con funciones objetivo y restricciones lineales, siendo una parte de la programación matemática, es utilizada en campos como la ingeniería, economía, gestión y en diferentes áreas de la ciencia. En la formulación de del problema de este tipo de programación lineal (PL) el objetivo es optimizar, es decir, minimizar o maximizar una función lineal que cuenta con  $n$  variables, la cual está sujeta a restricciones de igualdad o desigualdad. La distinción de este tipo de problema de programación lineal con otros

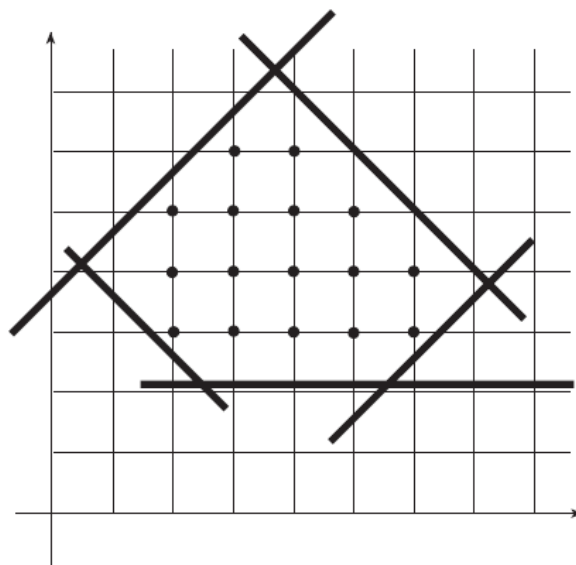
tipos de problemas de optimización es que todas sus funciones que intervienen en el problema son netamente lineales (Castillo et al., 2022).

### ***Programación lineal entera-mixta***

Para este tipo de programación matemática se analizan problemas que en muchos casos realistas las variables no son reales, sino enteras, o por otro lado, estas bien pueden ser del tipo binario, es decir que las variables pueden tomar valores 0 o 1. Los problemas de programación lineal entera mixta (PPLEM) vienen hacer problemas de programación lineal (PL) pero algunas variables son enteras, se le denomina problema de programación lineal entera-mixta (PPLEM) cuando las variables enteras son binarias. El caso de que todas las variables sean enteras, el problema viene a ser un problema de programación lineal estera estricta (PPLEE). En la ingeniería se consideran todos los problemas de programación lineal entera-mixta, ya que se los modela de forma flexible y eficiente. En la siguiente Figura 8 se muestra un ejemplo de un conjunto de soluciones factibles de un PPLEE, donde los puntos factibles son indicados como círculos (Castillo et al., 2022).

### **Figura 8**

*Conjunto de soluciones factibles de un PPLEE*



*Nota.* La figura muestra las soluciones de un problema de programación lineal estricta. Tomado de (Castillo et al., 2022).

### **Método de optimización determinística**

En los problemas determinísticos al plantear cada alternativa se tiene una solución, en el caso de existir más de una alternativa existirá más de una solución, cada una solución tiene una función que medirá la efectividad o la eficiencia de esta la cual estará asociada a los objetivos del sistema. Se tiene un conjunto de  $m$  ecuaciones lineales con sus respectivas restricciones  $n$  variables, donde es objetivo es hallar valores no negativos de las variables que satisfacen las restricciones minimizando o maximizando la función lineal, la cual se denomina función objetivo. Este modelo determinístico ayuda a evaluar las posibles soluciones que sean factibles para el problema que se planteó, logrando obtener una solución óptima. Este modelo es una herramienta que nos permite tomar decisiones al aplicar en mundo empresarial, financiero, político, económico y organizacional. Nos permite dar soluciones con el fin de optimizar los recursos que se tienen disponibles (Pérez, 2019).

Al suponer que se tiene sistemas los cuales están modelados completamente como determinístico, lo cual significa que no hay incertidumbre sobre los parámetros del problema. Esta suposición es abstracta ante la realidad, ya que no existe o es muy extraño que se tenga un sistema completamente determinista (Sioshansi y Conejo, 2017).

### **Método de optimización estocástica**

Los modelos de estocasticidad también son conocidos como modelos de incertidumbre, los cuales aparecen en todos los sistemas, la incertidumbre puede estar dada por carencia de datos fiables, errores de medida o puede considerar parámetros que representan una información a futuro. Un ejemplo puede ser el caso de planeación de sistemas de energía eléctrica, donde surge la incertidumbre de la demanda y los precios a futuro de la electricidad, de combustibles, aportaciones hidráulicas, elementos de generación y costos de red (Ramos y Cerisola, 2016).

Los modelos de problemas de programación estocástica incorporan lícitamente la incertidumbre en los valores de los parámetros, en el modelo estocástico se especifican los resultados de los parámetros que se consideran aleatorios. Se supone que se tiene el conocimiento sobre una distribución de probabilidades que describe la incertidumbre de la naturaleza inherente de los parámetros (Kwon, 2014).

Estos problemas de optimización involucran parámetros que cuyo valor no es conocido con exactitud, entrando en la incertidumbre sobre estos parámetros, al existir esta incertidumbre, es muy diferente a la optimización determinista donde si se conocen todos los parámetros al momento de tomar las decisiones. La estocasticidad influye en muchos aspectos los cuales pueden estar o no relacionados directamente con el problema que se está considerando. Desde un punto de vista estocástico es importante representar como afecta la estocasticidad a los parámetros involucrados con el problema (Latorre et al., 2008).

### ***Variables de decisión***

Estas variables de decisión representan aquellas decisiones que se optimizan dentro de un modelo de optimización. Cualquier problema de optimización planeado necesita al menos una variable de decisión, ya que, sin estas variables de decisión, quien toma las decisiones no tendría nada que decidir y, por lo tanto, no existiría problema por resolver. Es importante diferenciar las variables de los parámetros o datos, los datos de un problema representan la información externa que quien toma las decisiones no puede elegir ni controlar. Por ejemplo, se tiene una persona, a esta le dan una cierta cantidad de dinero denotada por  $\$D$ , para que pueda gastar en manzanas o naranjas, entonces se puede denotar  $xM$  y  $xN$  como variables de decisión las cuales representan la cantidad de manzanas y naranjas gastadas. Pero es importante tener en cuenta que  $D$  no es una variable de decisión, es un dato o parámetro fijo del problema, si se toma como una variable se podría hacer que  $D$  sea arbitrariamente grande como para consumir manzanas o naranjas según le plazca (Sioshansi y Conejo, 2017).

### ***Función objetivo***

La función objetivo es una ecuación, la cual toma una medida numérica que indica que tan buenas son las decisiones tomadas. Dependiendo del problema que se haya planteado, el objetivo puede ser maximizar o minimizar esta medida. Por ejemplo, en una empresa se puede modelar un problema que en la cual se deban tomar decisiones para la producción, donde se requiere maximizar los beneficios. Otro ejemplo puede darse en un hospital público donde se requiera modelar un problema para minimizar la mortalidad infantil, haciendo uso de los recursos asignados a este problema. Los problemas de optimización pueden ser de maximización o minimización, eso dependerá de que como se plantee la función objetivo (Sioshansi y Conejo, 2017).

### ***Restricciones***

Las restricciones establecen o imponen límites, por ejemplo, físicos, financieros o de otro tipo a las decisiones que se pueden tomar. Los problemas pueden o tener restricciones, pero la mayoría de los problemas tienen restricciones implícitas o explícitas. Si consideramos el ejemplo de la persona que gasta  $\$D$  para comprar manzanas o naranjas, una restricción explícita es que la persona no se puede gastar más de  $\$D$  de lo que tiene, se puede representar como la Ecuación 1, también se puede expresar las restricciones implícitas de la cantidad de dinero no negativa debe gastar, expresadas en Ecuación 2 y Ecuación 3. En la mayoría de los problemas de optimización se puede tener restricciones de desigualdad mayor o igual que o de igualdad como se expresa en la Ecuación 4, donde de deba gastar el total de  $\$D$  en manzanas y naranjas. En el problema de optimización, el conjunto de restricciones define el conjunto de variables de decisión que pueden ser elegidas por quien toma las decisiones (Sioshansi y Conejo, 2017).

**Ecuación 1***Restricción explícita*

$$x_A + x_O \leq D$$

**Ecuación 2***Restricción implícita para las manzanas*

$$x_A \geq 0$$

**Ecuación 3***Restricción implícita para las naranjas*

$$x_N \geq 0$$

**Ecuación 4***Restricción de igualdad de gasto total de \$D*

$$x_A + x_O = D$$

## Capítulo III

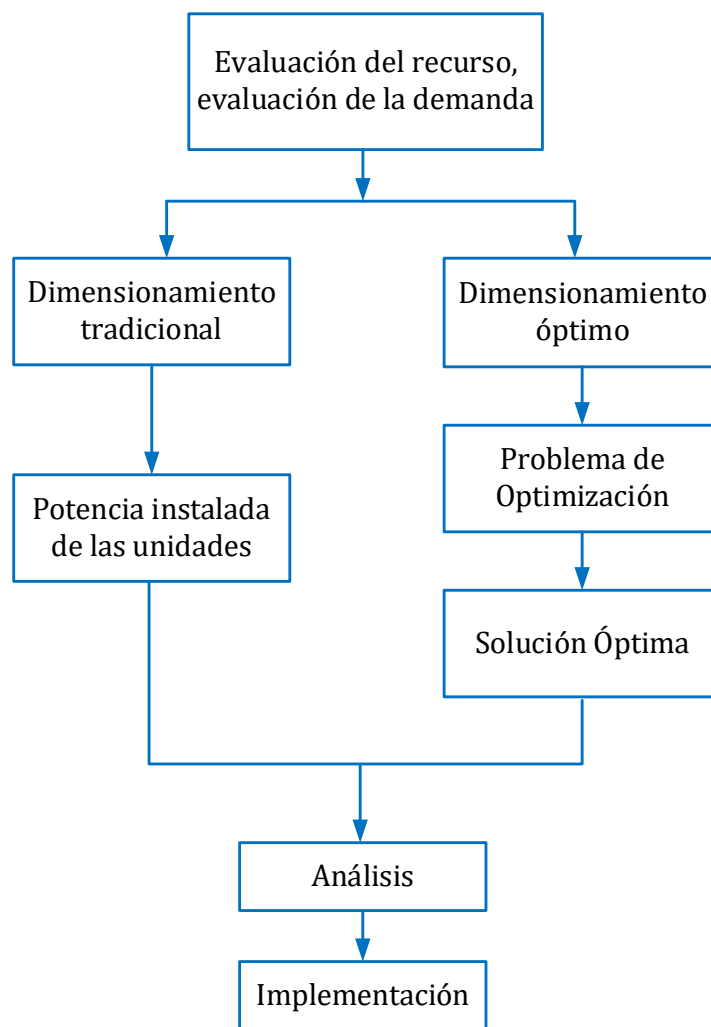
### Metodología

#### Metodología para el diseño y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico híbrido

En el siguiente esquema se presenta la metodología para realizar el diseño y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico híbrido.

#### Figura 9

*Esquema metodológico*



*Nota.* El esquema muestra la metodología a seguir para el diseño e implementación del presente proyecto.

## **Levantamiento de información**

Se recopila la información necesaria, que permita dimensionar los sistemas híbridos, en base a curvas características, estudio de la demanda y caracterización de la misma.

**Dimensionamiento tradicional.** Este método permite diseñar el sistema de generación en base a un procedimiento matemático definido.

**Procedimiento.** Se deben seguir una serie de pasos que involucran ecuaciones para dimensionar el sistema híbrido. Estas ecuaciones permiten determinar la potencia, energía y componentes necesarios para el sistema.

**Dimensionamiento optimizado.** Este método implica aprovechar la predictibilidad estadística del rendimiento solar, la demanda en el sistema. Maximizando la eficiencia energética y reducir los costos. Se realiza la formulación del problema de optimización.

**Análisis.** Se realiza un análisis entre los diferentes dimensionamientos para su respectiva implementación. Así mismo como un análisis de costos de la implementación del sistema híbrido.

**Implementación.** Se procede a realizar la implementación e instalación de los diferentes equipos, los módulos fotovoltaicos, inversor, regulador y los diferentes componentes que conforman el sistema híbrido.

Para ambas metodologías se realiza la evaluación del recurso solar y la evaluación de la demanda, a continuación, se describe como se generan estos.

## ***Caracterización de la demanda***

Se levanta una curva característica de la demanda diaria de la carga a la cual se va a suministrar la energía que se genera con el sistema híbrido, esta curva se la realiza dando un valor máximo de demanda, este valor representará el consumo diario de energía.



### **Obtención de recurso**

Para este caso el sistema híbrido se basa en el uso de energía renovable fotovoltaica, el recurso es solar, se obtendrá la base de datos de la irradiación que presenta el lugar donde se va a instalar el sistema.

### **Procedimiento para el diseño del sistema fotovoltaico híbrido por el dimensionamiento tradicional de Horas Sol Pico (HSP)**

Para el dimensionamiento tradicional HSP se realiza el cálculo a través de las ecuaciones establecidas en (Lamo, s.f.), expresadas en las ecuaciones 5 - 23, las cuales permiten dimensionar el sistema híbrido. A continuación, se presentan las ecuaciones que permitirán realizar el cálculo analítico de los parámetros y los diferentes elementos que intervienen en un sistema híbrido.

- **Analizar los elementos de consumo, potencias y utilización de los mismos.**

### **Figura 10**

*Elementos de consumo*



*Nota.* La figura muestra los elementos de consumo que puede existir en un lugar donde se va a instalar el sistema híbrido, los cuales serán suministrados con el mismo. Elaboración propia

- **Cálculo de la energía total, requerida diariamente.**

Para el cálculo total de la energía se aplica las ecuaciones 5 y 6.

### Ecuación 5

*Energía total*

$$E_T = E_{CC} + \left( \frac{E_{CA}}{\eta_{Inv}} \right)$$

Donde:

$E_T$ : energía total

$E_{CC}$ : energía solamente en corriente continua

$E_{CA}$ : energía solamente en corriente alterna

$\eta_{Inv}$ : rendimiento del inversor

- **Cálculo de las HSP**

Las HSP son importantes para poder realizar el cálculo del número de módulos fotovoltaicos, en el marco teórico de este escrito en el método de horas sol pico, en la sección de dimensionamiento de la instalación, se presenta un ejemplo del cálculo de este apartado.

- **Determinación del rendimiento genérico de la instalación.**

### Ecuación 6

*Rendimiento genérico de la instalación*

$$R = (1 - k_B - k_C - k_V) \left( 1 - k_A \cdot \left( \frac{N}{P_D} \right) \right)$$

Donde:

$k_A$ : coeficiente de autodescarga diaria del acumulador

$k_B$ : coeficiente de pérdidas por rendimiento en el acumulador

$k_C$ : coeficiente de pérdidas en el inversor CC/CA

$k_V$ : coeficiente de pérdidas varias de la instalación

$N$ : número de días de autonomía que soportará el acumulador

$P_D$ : profundidad máxima de descarga del acumulador

- **Cálculo de la energía diaria que debe recibir el acumulador**

### Ecuación 7

*Energía diaria que debe recibir el acumulador*

$$E = E_T / R$$

Donde:

$E_T$ : energía total

$R$ : rendimiento genérico de la instalación

- **Cálculo de la capacidad útil del acumulador**

### Ecuación 8

*Capacidad útil del acumulador*

$$C_U = E \cdot N / V_{NS}$$

Donde:

$E$ : energía que debe recibir el acumulador diariamente

$N$ : número de días de autonomía que soportará el acumulador

$V_{NS}$ : voltaje nominal de la instalación

- **Cálculo de la capacidad del acumulador**

### Ecuación 9

*Capacidad total del acumulador*

$$C = C_U / P_D \cdot K_T$$

Donde:

$C_U$ : capacidad útil disponible

$P_D$ : porcentaje de capacidad disponible

$K_T$ : factor de corrección por temperatura.  $K_T = 1 - (\Delta T / 160)$

$\Delta T$ : la diferencia de temperatura ambiente entre 20° C y la mínima temperatura de trabajo 10° C

- **Cálculo del número de acumuladores en serie**

### Ecuación 10

*Número de acumuladores en serie*

$$A_S = \frac{V_{NS}}{V_{NA}}$$

Donde:

$V_{NS}$ : tensión nominal del sistema

$V_{NA}$ : tensión nominal del acumulador elegido

- **Cálculo del número de grupos de acumuladores en paralelo**

### Ecuación 11

*Número de acumuladores que en paralelo*

$$A_p = \frac{C}{C_{NA}}$$

Donde:

$C$ : capacidad total del acumulador

$C_{NA}$ : capacidad nominal del acumulador

- **Cálculo del número total de acumuladores**

Para obtener el total de acumulador se usa la ecuación 12

### Ecuación 12

*Número total de acumuladores*

$$A_T = A_S \cdot A_P$$

Donde:

$A_S$ : acumuladores en serie

$A_P$ : acumuladores en paralelo

- **Cálculo de potencia del generador fotovoltaico**

Para determinar la potencia total del panel fotovoltaico se usa la ecuación 13.

### Ecuación 13

*Potencia del generador fotovoltaico*

$$E_G = E/\eta_R$$

Donde:

$E$ : energía diaria que debe recibir el acumulador

$\eta_R$ : rendimiento del regulador

- **Cálculo de la potencia nominal del generador fotovoltaico**

### Ecuación 14

*Potencia nominal del generador fotovoltaico*

$$P_N = \frac{E_G}{(HSP \cdot \eta_G)}$$

Donde:

$E_G$ : energía diaria que debe producir el generador FV

$HSP$ : horas sol pico

$\eta_G$ : rendimiento del generador FV

- **Cálculo del número de módulos en serie del generador FV**

### Ecuación 15

*Número de módulos en serie del generador FV*

$$M_S = \frac{V_{NS}}{V_{NM}}$$

Donde:

$V_{NS}$ : tensión nominal de trabajo de la instalación

$V_{NM}$ : tensión nominal del módulo elegido

- **Cálculo del número de ramas en paralelo del generador FV**

**Ecuación 16**

*Número de ramas en paralelo del generador FV*

$$M_p = \frac{P_N}{M_s \cdot P_p}$$

Donde:

$P_N$ : potencia nominal del generador FV

$M_s$ : número de módulos conectados en serie por rama

$P_p$ : Potencia pico del módulo utilizado

- ***Cálculo del número total de módulos (MT) y potencia pico instalada***

**Ecuación 17**

*Número total de módulos*

$$M_T = M_s \cdot M_p$$

Donde:

$M_s$ : número de módulos conectados en serie por rama

$M_p$ : número de ramas conectadas en paralelo

**Ecuación 18**

*Potencia pico instalada*

$$P_{NI} = M_T \cdot P_p$$

Donde:

$M_T$ : número de módulos empleados

$P_p$ : potencia pico del módulo utilizado

- ***Comprobación de compatibilidad entre el generador FV y el acumulador***

**Ecuación 19**

*Intensidad de cortocircuito del generador FV*

$$I_{CCG} = I_{CC} \cdot M_p$$

Donde:

$I_{CC}$ : intensidad de corto circuito proporcionado por el data sheet del módulo PV

$M_p$ : número de ramas conectadas en paralelo

$I_{CCG}$  debe ser mayor igual que la capacidad del acumulador dividida por 25

## Ecuación 20

*Comprobación*

$$C/25$$

Donde:

$C$ : capacidad total del acumulador

- **Cálculo del regulador**

## Ecuación 21

*Corriente a seleccionar del regulador más adecuado*

$$I_{PG} = M_p \cdot I_p$$

Donde:

$M_p$ : número de ramas conectadas en paralelo

$I_p$ : corriente que proporciona el generador FV

## Ecuación 22

*Intensidad de entrada del regulador*

$$I_R = I_{PG} \cdot 1.25$$

Donde:

$I_{PG}$ : Corriente a seleccionar del regulador más adecuado

1.25: factor de sobredimensionarlo

- **Cálculo del inversor**

Debemos definir los siguientes parámetros del inversor:

- Tensión nominal de entrada
- Tensión nominal de salida

- Rendimiento (En función del modelo o equipo elegido).
- Potencia nominal:  $Potencia\ de\ salida/\eta$

### **Ecuación 23**

*Potencia nominal del inversor*

$$P_{NI} = \frac{P_S}{\eta}$$

Donde:

$P_S$ : potencia de salida

$\eta$ : rendimiento

### **Dimensionamiento optimizado**

Para el método óptimo se propone abordar el dimensionamiento de los elementos que confirman el sistema híbrido formulando un problema de programación lineal estocástico de enteros mixtos. El principal objetivo es dimensionar los elementos que conforman el sistema híbrido de manera adecuada, incluyendo módulos fotovoltaicos, inversor y sistemas de almacenamiento.

### **Formulación del problema de optimización**

#### ***Función objetivo***

La función objetivo a plantear busca minimizar los costos de inversión de los componentes del sistema híbrido como el costo operativo a lo largo del horizonte que se evalúa, donde se toma en cuenta diversos escenarios.

En la Ecuación 24 se presenta la función objetivo de la formulación del problema de optimización, la Ecuación 25 representa los costos de inversión (CI) del sistema a instalar, hay que notar que el factor de recuperación de capital (FRC), el cual se calcula en función de la tasa de interés y el tiempo de vida económica del proyecto a instalar. La Ecuación 26 de costos de operación (CO) da a conocer los costos de operación del sistema híbrido, la cual está



relacionado con los costos de descarga de baterías y al costo de suministro de eléctrico por parte de la red pública. Es importante destacar que se incluye un costo por descarga de la batería con el objetivo de que las baterías se descarguen en horas donde no exista recurso solar y en horas pico de demanda. Es importante destacar que los costos de los módulos fotovoltaicos se desestiman por su insignificancia. También se considera el costo por energía no suministrada (ENS) y los costos de vertimiento o curtailment para poder prevenir un sobre dimensionamiento del sistema híbrido. El subíndice  $n$  indica la probabilidad que puede haber para cada escenario, es importante mencionar que se asume que todos los escenarios tienen la misma probabilidad de ocurrencia.

#### **Ecuación 24**

*Función objetivo*

$$\text{Min}\{CI + CO\}$$

#### **Ecuación 25**

*Costos de inversión*

$$CI = \frac{FRC}{8760} \cdot T \cdot (C^{fv} \cdot x^{fv} + C^{bat} \cdot x^{bat} + C^{inv} \cdot p^{inv})$$

#### **Ecuación 26**

*Costos de operación*

$$CO = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (C^{des} \cdot p_{n,t}^{des} + C^{red} \cdot p_{n,t}^{red} + C^{ens} \cdot p_{n,t}^{ens} + C^{ver} \cdot p_{n,t}^{ver})$$

Donde:

$CI$ : costos de inversión

$FRC$ : factor de recuperación de capital

$CO$ : costos de operación

$n$ : índice de escenarios de irradiación solar

$t$ : índice de tiempo

**Parámetros:**

$C^{fv}$ : costos de inversión de los sistemas fotovoltaicos

$C^{bat}$ : costo de batería

$C^{inv}$ : costo del inversor

$p^{inv}$ : potencia nominal del inversor

$C^{des}$ : costo de descarga de la batería

$C^{red}$ : costo de servicio de energía eléctrica de la red de distribución

$C^{ens}$ : costo de la energía no suministrada

$C^{ver}$ : costo de vertimiento

**Variables:**

$x^{fv}$ : número de paneles a instalar

$x^{bat}$ : número de baterías a instalar

$p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{red}$ : potencia suministrada por la red de distribución para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{ens}$ : energía no suministrada a la demanda para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{ver}$ : vertimiento de potencia por el sistema fotovoltaico para cada hora  $t$  y escenario  $n$

**Modelación del Sistema fotovoltaico**

La inserción de potencia activa que se espera por el módulo fotovoltaico se formula por las ecuaciones establecidas en (Velásquez-Lozano et al.). En la Ecuación 27 se debe tomar en cuenta que está conformado por el número de paneles fotovoltaicos a instalar, también forma parte de la ecuación la potencia nominal del panel fotovoltaico, la temperatura de las celdas, reducción de temperatura de la eficiencia del sistema fotovoltaico, la eficiencia del inversor y la irradiancia solar.

En la Ecuación 28 se presenta las temperaturas de las células solares, donde esta ecuación depende de la irradiación solar, temperaturas del sistema fotovoltaico en condiciones normales y ambiente.

La Ecuación 29 representa el área máxima que se dispone para la instalación fotovoltaica, tomando en cuenta el área del módulo fotovoltaico del que se dispone.

### Ecuación 27

*Potencia activa del sistema fotovoltaico*

$$p_{n,t}^{fv} = x^{fv} \cdot \bar{p}^{fv} \left( \frac{I_{n,t}}{1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]} \cdot (1 - \alpha \cdot (T_{n,t}^{cel} - 25[^\circ\text{C}])) \right) \cdot n_{inv} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

#### **Variables:**

$x^{fv}$ : número de paneles a instalar

$\bar{p}^{fv}$ : potencia nominal del panel fotovoltaico

$T_{n,t}^{cel}$ : temperatura de la célula solar

#### **Parámetros:**

$I_{n,t}$ : irradiación solar

$\alpha$ : rendimiento térmico del panel fotovoltaico

$n_{inv}$ : eficiencia del inversor

### Ecuación 28

*Temperatura de las células solares*

$$T_{n,t}^{cel} = T_{n,t}^a + \frac{I_{n,t}}{800 \left[ \frac{W}{m^2} \right]} [NOCT - 20[^\circ\text{C}]] \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$T_{n,t}^a$ : temperatura ambiente

$NOCT$ : temperatura del sistema fotovoltaico en condiciones normales

**Parámetros:**

$I_{n,t}$ : irradiación solar

**Ecuación 29**

Área aproximada que se dispone

$$x^{fv} \cdot A^{fv} \leq A^{max}$$

Donde:

**Parámetros:**

$A^{fv}$ : área de instalación de los paneles solares

$A^{max}$ : área máxima disponible en el sitio

**VARIABLES:**

$x^{fv}$ : número de paneles a instalar

**Modelación del BESS**

Battery Energy Storage System (BESS) por sus siglas en español, el sistema de almacenamiento de energía en baterías se relaciona con el número de baterías a instalar, el voltaje que tiene cada batería y la capacidad de corriente.

En la restricción de la Ecuación 30, se define el número de baterías en serie, es importante mencionar que debe ser un número entero y debe estar basado en el voltaje de diseño del BESS y también se debe tomar en cuenta el voltaje de la batería seleccionada para el diseño. También se debe calcular el número de baterías en paralelo denotado por  $y^{bat}$ . Teniendo como resultado la cantidad total de baterías que se debe instalar. Teniendo en cuenta que  $x^{bat}$ ,  $y^{bat}$  son variables de decisión enteras.

**Ecuación 30**

Capacidad del BESS

$$p^{bess} = \frac{x^{bat} \cdot V^{bat}[v] \cdot I^{bat}[Ah]}{1000}$$

Donde:

**Variables:**

$x^{bat}$ : número de baterías a instalar

$V^{bat}$ : voltaje de la batería

$I^{bat}$ : capacidad de la batería

**Ecuación 31**

*Energía disponible en el BESS*

$$x^{bat} = \frac{V^{diseño}}{V^{bat}} \cdot y^{bat}$$

Donde:

$$x^{bat} \wedge y^{bat} \in Z$$

**Variables:**

$V^{diseño}$ : voltaje de diseño del arreglo de baterías

$V^{bat}$ : voltaje de la batería

$y^{bat}$ : número de baterías en paralelo a instalar

Es necesario definir la cantidad de energía inicial en las baterías, para ello se plantea la restricción de la Ecuación 32, por otra parte, también se debe describir mediante una ecuación la disponibilidad de energía en el BESS estas están descritas en las ecuaciones Ecuación 33 y Ecuación 34. En cuanto a la descarga y carga de las BESS se debe describir la restricción usando el método Big M o desacople, la cual se presenta en la Ecuación 35. Se establece una restricción adicional para el estado de carga o State of Charge (SOC) por sus siglas en inglés la cual está descrita por la Ecuación 36. Para este último se debe tener en cuenta que las baterías debe ser mínimo del 20% y un máximo del 90% así se asegura que el BESS tenga una vida prolongada.

**Ecuación 32***Cantidad inicial de energía en la batería*

$$E_0 = SOC_0 p^{bess}$$

Donde:

**Parámetros:** $SOC_0$ : estado inicial de carga de la batería**Variables:** $p^{bess}$ : capacidad instalada de la batería**Ecuación 33***Energía disponible en el BESS*

$$E_{n,t} = E_0 - \frac{p_{n,t}^{des}}{n_{inv}} + n_{inv} \cdot p_{n,t}^{car} \quad \forall n \in N, \forall t \geq 1 \in T$$

Donde:

**Parámetros:** $n_{inv}$ : eficiencia del inversor**Variables:** $E_0$ : energía inicial de la batería $p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$  $p_{n,t}^{car}$ : carga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$ **Ecuación 34***Energía disponible en el BESS*

$$E_{n,t} = E_{n,t-1} - \frac{p_{n,t}^{des}}{n_{inv}} + n_{inv} \cdot p_{n,t}^{car} \quad \forall n \in N, \forall t \geq 1 \in T$$

Donde:

**Parámetros:**

$n_{inv}$ : eficiencia del inversor

**Variables:**

$E_{n,t-1}$ : energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{car}$ : carga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

**Ecuación 35**

*Limitaciones de carga y descarga*

$$0 \leq p_{n,t}^{car} \leq B_{n,t} \cdot M \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

$$0 \leq p_{n,t}^{des} \leq (1 - B_{n,t}) \cdot M \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

**Parámetros:**

$M$ : número suficientemente grande

**Variables:**

$B_{n,t}$ : variable binaria de estado de batería en cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{car}$ : carga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$$B_{n,t} \in \{0,1\} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

**Ecuación 36**

*Restricción de estado de carga*

$$0.2 \cdot p^{bess} \leq E_{n,t} \leq 0.9 \cdot p^{bess} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$E_{n,t}$ : energía disponible en el BESS

**Variables:**

$p^{bess}$ : capacidad instalada de la batería

### Modelamiento del inversor

Para poder modelar el inversor, se añade la restricción descrita en la Ecuación 37, que está establecida por los paneles fotovoltaicos y la energía residual de estos, es decir, aquella energía que no está para cargar las baterías en un instante de tiempo  $t$ , adicionada a la energía que está siendo descargada desde las baterías, por lo que debe ser menor o igual a la potencia del inversor.

### Ecuación 37

*Restricción del dimensionamiento del inversor*

$$p_{n,t}^{fv} - p_{n,t}^{car} + p_{n,t}^{des} \leq p^{inv} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$p_{n,t}^{fv}$ : potencia activa del panel fotovoltaico

#### **Variables:**

$p_{n,t}^{car}$ : carga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

#### **Parámetros:**

$p^{inv}$ : potencia nominal del inversor

### Ecuación de balance

La Ecuación 38 describe el balance energético del sistema. Integra a potencia generada por el sistema fotovoltaico, la potencia de carga y descarga de las BESS, y la potencia de la red eléctrica, equilibrándolas con la demanda del sistema. Adicionalmente, se debe incluir variables como la energía no suministrada y el vertimiento de energía del sistema fotovoltaico. La restricción de la Ecuación 39 establece que la energía no suministrada debe ser un valor positivo inferior a la demanda total del sistema. La Ecuación 40 limita el vertimiento de energía



fotovoltaica a un valor inferior o igual a la potencia máxima del generador fotovoltaico. Por último, la Ecuación 41 es la restricción que asegura que la energía no suministrada sea inferior o igual a la demanda máxima instalada.

### Ecuación 38

*Ecuación de balance*

$$p_{n,t}^{fv} + p_{n,t}^{des} - p_{n,t}^{car} + p_{n,t}^{red} = p_{n,t}^{dem} - p_{n,t}^{ens} + p_{n,t}^{ver} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$p_{n,t}^{fv}$ : potencia activa del panel fotovoltaico

#### **Variables:**

$p_{n,t}^{car}$ : carga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{des}$ : descarga de energía de la batería para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{red}$ : potencia suministrada por la red de distribución para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{ens}$ : energía no suministrada a la demanda para cada hora  $t$  y escenario  $n$

$p_{n,t}^{ver}$ : vertimiento de potencia por el sistema fotovoltaico para cada hora  $t$  y escenario  $n$

### Ecuación 39

*Restricción de energía no suministrada*

$$0 \leq p_{n,t}^{ens} \leq p_{n,t}^{dem} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

#### **Parámetros:**

$p_{n,t}^{dem}$ : demanda para cada hora  $h$

#### **Variables:**

$p_{n,t}^{ens}$ : energía no suministrada a la demanda para cada hora  $t$  y escenario  $n$

### Ecuación 40

*Restricción de vertimiento*

$$p_{n,t}^{ver} \leq p_{n,t}^{fv} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$p_{n,t}^{fv}$ : potencia activa del panel fotovoltaico

**Variables:**

$p_{n,t}^{ver}$ : vertimiento de potencia por el sistema fotovoltaico para cada hora  $t$  y escenario  $n$

**Ecuación 41**

*Restricción de la energía no suministrada*

$$ENS \leq p_{n,t}^{dem} \quad \forall n \in N, \forall t \in T$$

Donde:

$ENS$ : energía no suministrada

**Parámetros:**

$p_{n,t}^{dem}$ : demanda para cada hora  $h$

La Ecuación 42 se usa para dar una restricción cuando el sistema fotovoltaico funcione de forma aislada o conectada a la red. De esta manera se puede realizar el modelamiento para que el sistema híbrido sea viable.

**Ecuación 42**

*Restricción de conexión a la red*

$$p_{n,t}^{red} \leq 0$$

Donde:

$p_{n,t}^{red}$ : energía suministrada por la red

## Capítulo IV

### Caso de Estudio

#### Ubicación

La Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE- Sede Latacunga, Campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara, está ubicada en la Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Belisario Quevedo, Barrio el Forastero, sus coordenadas geográficas corresponden al laboratorio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones se ubica en la zona este del centro del campus a una altura de 2820 msnm.

#### Figura 11

*Ubicación del edificio de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*



*Nota.* El gráfico representa la ubicación donde se instalará el sistema híbrido fotovoltaico conectado a la red en el campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara. Fuente: Google Earth.

#### Determinación de la irradiancia en la zona

Permite conocer la cantidad de energía solar que se puede obtener en la zona específica donde se instalará el sistema. Esto es esencial para determinar el tamaño y la capacidad del sistema fotovoltaico y de las baterías necesarias para almacenar la energía generada. Además, la zona de irradiancia también puede influir en la elección de los paneles

solares, en la orientación y ángulo de inclinación óptimos para maximizar la producción de energía.

Los datos obtenidos provienen del sitio web PVGIS, se tomó en cuenta los datos promedios mensuales, de las 24 horas del día en cada mes del año, lo que permite obtener la curva de irradiancia y analizar la irradiancia máxima en la zona, así como las horas pico. Los datos de irradiancia se pueden observar en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Irradiancia promedio mensual*

<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
00:00	0	0	0	0	0	0
00:00	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0	0
07:00	17,04	11,87	16,28	25,46	28,23	21,68
08:00	137,93	123,47	138,36	165,76	166,26	143,75
09:00	343,03	332,33	350,47	379,13	375,61	344,35
10:00	543,36	535,69	548,04	572,24	566,69	527,07
11:00	666,34	667,83	671,22	676,21	650,52	625,74
12:00	730,82	736,78	725,14	724,04	687,42	671,33
13:00	724,06	730,02	720,19	710,35	675,6	675,09
14:00	663,68	677,55	646,34	613,95	598,17	611,65
15:00	544,4	561,63	512,66	481,61	481,19	508,13
16:00	397,96	404,95	361,6	331,34	335,43	366,59
17:00	242,68	255,01	216,38	216,38	216,38	214,63

<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
18:00	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0
Irradiancia Total	5011,3	5037,13	4906,68	4896,47	4781,5	4710,01

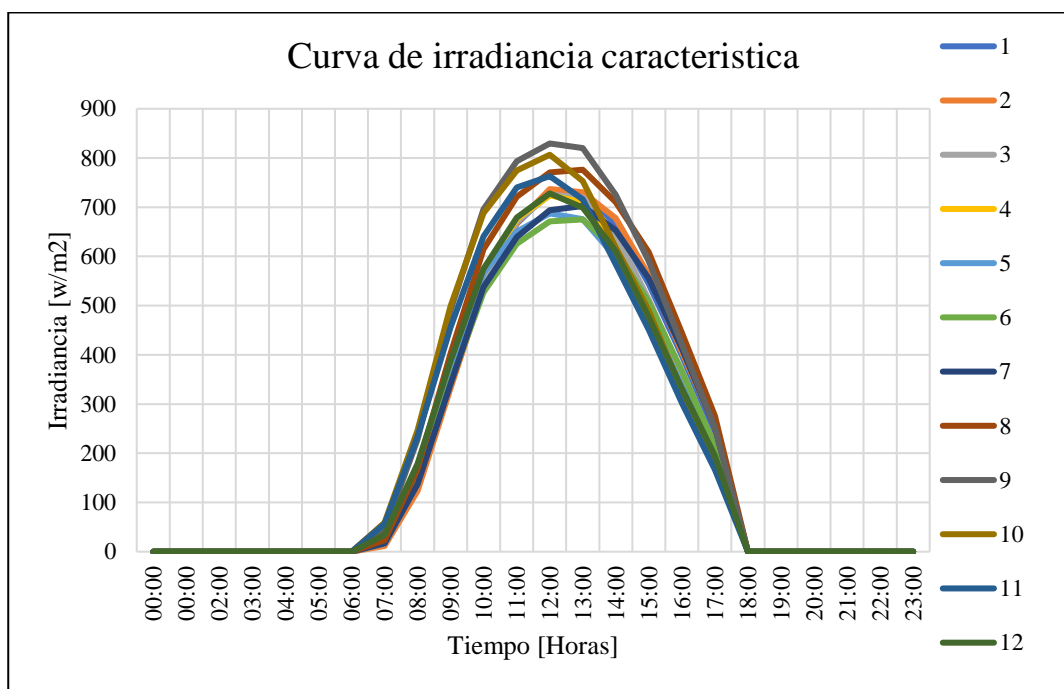
<b>Hora</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
00:00	0	0	0	0	0	0
00:00	0	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0,01	0,02	0
07:00	17,08	23,04	43,43	58,89	56,47	34,18
08:00	137,31	167,83	227,95	246,71	234,19	178,53
09:00	340,89	402,4	490,84	498,82	455,96	387,44
10:00	537,76	614,48	695,69	687,98	640,61	574,68
11:00	639,6	721,21	793,55	774,45	740,15	679,11
12:00	694,05	770,61	829,45	806,53	763,09	727,93
13:00	702,32	776,05	819,86	753,3	716,2	698,96
14:00	652,98	710,44	725,05	619,26	583,7	610,73
15:00	555,4	608,71	590,63	489,47	451,3	476,83
16:00	412,11	443,97	420,98	326,17	301,83	331,26

Hora	7	8	9	10	11	12
17:00	252,56	275,95	251,52	184,43	166,71	194,45
18:00	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0
Irradiancia Total	4942,06	5514,69	5888,95	5446,02	5110,23	4894,1

*Nota.* La tabla muestra los valores de irradiancia que se pueden obtener en la zona donde se encuentra el laboratorio de energías renovables.

**Figura 12**

*Curvas de Irradiancia Mensual*



*Nota.* La figura muestra las curvas de irradiancia que se pueden obtener en la zona donde se encuentra el laboratorio de energías renovables, la curva muestra los valores promedio en el transcurso del día.

### Horas Sol Pico (HSP)

El cálculo de las horas sol pico nos ayuda a determinar la irradiancia y de este modo la energía solar que se convertirá en energía eléctrica, que será aprovechada por los paneles, se obtiene teniendo en cuenta que  $1000 \text{ W/m}^2 = 1\text{kW/m}^2$ . En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra las horas sol pico en cada mes.

**Tabla 2**

*Horas sol pico en la ubicación*

Horas de Sol Pico [kWh/m <sup>2</sup> ]						
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
$\frac{kwh}{m^2}$	5,01	5,03	4,90	4,89	4,78	4,71
HSP	5,01	5,03	4,90	4,89	4,78	4,71
Meses	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
$\frac{kwh}{m^2}$	4,94	5,51	5,88	5,44	5,11	4,89
HSP	4,94	5,51	5,88	5,44	5,11	4,89

*Nota.* La tabla detalla la hora sol pico en la zona cercana a la universidad.

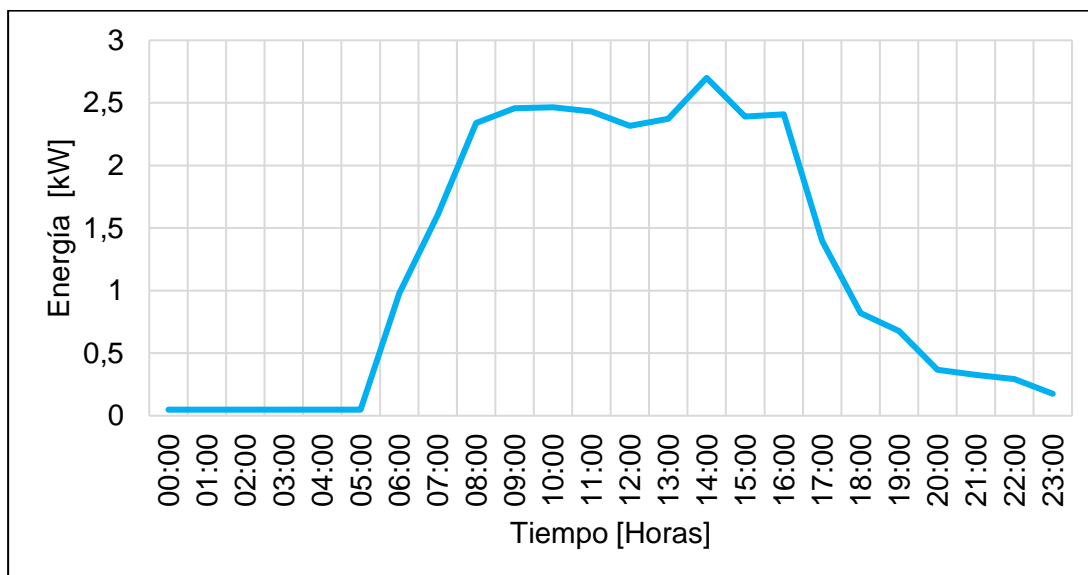
### Caracterización de la demanda

La demanda se obtuvo teniendo en cuenta los diferentes equipos que se encuentran en el lugar y su uso en el transcurso del día en el laboratorio.

**Tabla 3***Estimación de la demanda del laboratorio*

Hora	Demanda [kW]	Hora	Demanda [kW]	Hora	Demanda [kW]
1	1,1	9	1,1	17	2,238
2	0,05	10	2,494	18	0,429
3	1,1	11	2,238	19	0,06
4	1,1	12	2,777	20	0,05
5	2,348	13	2,435	21	0,05
6	1,285	14	2,348	22	0,05
7	2,494	15	1,1	23	0,05
8	1,285	16	1,285	24	0,05

*Nota.* La tabla detalla la demanda del laboratorio en kW.

**Figura 13***Curva de demanda del laboratorio*



*Nota.* La figura detalla la curva de demanda del laboratorio en kW, donde se puede ver el pico más alto es de 2.777kW, es decir que a esa hora se encuentra todos los dispositivos conectados a la red.

Importante destacar que, la demanda caracterizada del laboratorio será utilizará tanto para el método tradicional como para el método optimizado, así mismo como la base de datos de irradiancia también será considerada tanto para el modelo tradicional como para el dimensionamiento optimizado, el cual que se obtuvo del sitio web PVGIS.

## Capítulo V

### Análisis de Resultados

#### Análisis del dimensionamiento tradicional HSP

Se realiza el diseño mediante el método tradicional, tomando en cuenta las diferentes ecuaciones, y los pasos para obtener tanta energía, potencia y la cantidad de componentes necesarios para abastecer la demanda requerida por el laboratorio.

- **Cálculo de la energía total, requerida diariamente:** Se determinó los equipos y la energía promedio requerida por el laboratorio, teniendo en cuenta los equipos y la utilización de estos, al ser un laboratorio el uso de los equipos es variable en el tiempo tanto como los días, teniendo en cuenta la problemática se determinó una demanda para el laboratorio especificada en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Demanda en energía del laboratorio*

DEMANDA CA				
N.º de unidades	Tipo	Potencia [kW <sub>AC</sub> ]	Horas/día	Consumo diario [kWh/día]
1	Laboratorio	28,81	1	28,81
	Total	28,81		28,81

*Nota.* La tabla detalla la demanda en energía estimada para poder realizar el desarrollo del sistema.

Al no contar con equipos que funcionen con corriente continua, se toma en cuenta los equipos que funcionen en corriente alterna; en la Ecuación 5 para el cálculo es necesario tener en cuenta un rendimiento del inversor del 95%, con este dato se procede a calcular la energía total necesaria para el sistema.

$$E_T = E_{CC} + \left( \frac{E_{CA}}{\eta_{Inv}} \right)$$

$$E_T = \frac{28813 [Wh]}{0.95}$$

$$E_T = 30329,473 [Wh]$$

$$E_T = 30,329 [kWh]$$

Esta es la energía total necesaria que debe producir el sistema, para poder solventar la demanda.

- **Cálculo de las HSP**

Para obtener el cálculo de las horas sol pico, es necesario tener los datos de la curva de irradiancia, realizando la sumatoria de la irradiancia presente en cada uno de los meses, para esto se tiene los datos de la Tabla 2.

Para el diseño, en el método tradicional se tiene en cuenta el mes con el menor valor de horas sol pico, para poder garantizar que el sistema pueda abastecer de energía en las peores condiciones de irradiancia.

En este caso el mes con menor irradiancia que es el mes de junio con 4,71 HSP.

- **Determinación del rendimiento genérico de la instalación.**

Se calcula el rendimiento genérico de la instalación en la Ecuación 6, *para este caso se considera los coeficientes  $k_A$ ,  $k_B$ ,  $k_V$  como cero.*

$$R = (1 - k_B - k_C - k_V) \left( 1 - k_A \cdot \left( \frac{N}{P_D} \right) \right)$$

Donde:

$k_A$ : 0

$k_B$ : 0

$k_C$ : 0.05 dato debe ser suministrado por el fabricante

$k_V$ : 0

$N$ : 1

$P_D$ : 80%

$$R = (1 - 0 - 0.05 - 0) \left( 1 - 0 \cdot \left( \frac{1}{0,8} \right) \right)$$

$$R = 0.95$$

- **Cálculo de la energía diaria que debe recibir el acumulador**

Energía diaria que debe recibir el acumulador en el sistema mediante la Ecuación 7.

$$E = \frac{E_T}{R}$$

$$E = \frac{30,329 \text{ [kWh]}}{0.95}$$

$$E = 31925.7617 \text{ [kWh]}$$

- **Cálculo de la capacidad útil del acumulador**

La capacidad útil del acumulador es la cantidad de energía que se puede almacenar.

Mediante la Ecuación 8.

$$C_U = E \cdot N / V_{NS}$$

Donde:

$$E: 31.92 \text{ [kWh]}$$

$$N: 1$$

$$V_{NS}: 48 \text{ [V]}$$

$$C_U = 31.92 \cdot \frac{1}{48}$$

$$C_U = 665,12 \text{ [Ah]}$$

- **Cálculo de la capacidad del acumulador**

Capacidad total de almacenamiento del acumulador, la Ecuación 9 permite obtener el valor.

$$C = \frac{C_U}{P_D \cdot K_T}$$

Donde:

$$C_U: 665,12 \text{ [Ah]}$$

$P_D$ : 80%

$K_T$ : factor de corrección por temperatura

$\Delta T$ : la diferencia de T ambiental entre 20° y la mínima T de trabajo (10°)

$$K_T = 1 - \left( \frac{20 - 10}{160} \right)$$

$$K_T = 0,9375$$

Calculando:

$$C = \frac{665,12}{0,8 \cdot 0,9375}$$

$$C = 886,82 [Ah]$$

- **Cálculo del número de acumuladores en serie**

Para el arreglo de las baterías se determina el número de acumuladores en serie mediante la Ecuación 10.

$$A_S = \frac{V_{NS}}{V_{NA}}$$

Donde:

$V_{NS}$ : 48 [V]

$V_{NA}$ : 12 [V]

Calculando:

$$A_S = \frac{48}{12} = 4$$

Se necesitan 4 baterías en serie.

- **Cálculo del número de grupos de acumuladores en paralelo**

Para completar el arreglo de las baterías se determina el número de acumuladores que irán en paralelo mediante la Ecuación 11.

$$A_p = \frac{C}{C_{NA}}$$

Donde:

$C$ : 886,82 [Ah]

$C_{NA}$ : Se asume un valor de 200 Ah

$$A_p = \frac{886,82}{200}$$

$$A_p = 4,43$$

Se necesitan cuatro baterías en paralelo, de esta manera se obtiene el arreglo de baterías.

- **Cálculo del número total de acumuladores**

El número total del arreglo de baterías se determina multiplicando las baterías en serie y paralelo.

$$A_T = A_S \cdot A_P$$

Donde:

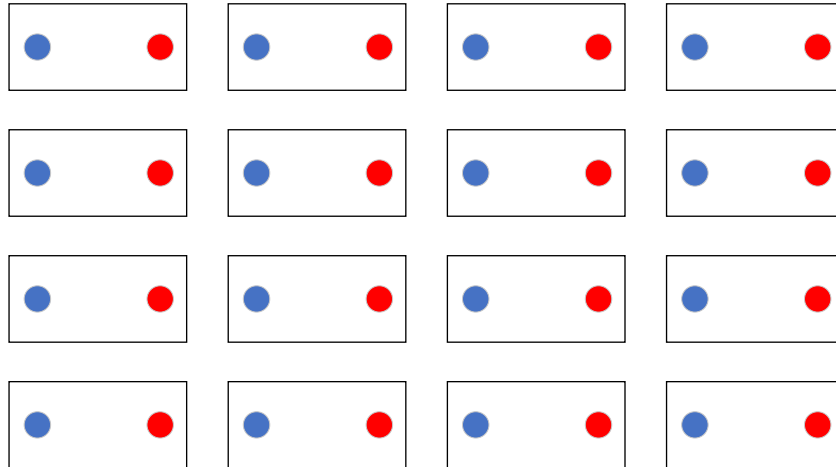
$A_S$ : 4

$A_P$ : 4

$$A_T = 4 * 4$$

$$A_T = 16$$

El número total de baterías es de 16 baterías en serie y cuatro en paralelo.

**Figura 14***Arreglo de baterías*

*Nota.* La figura muestra el arreglo de baterías 4 en serie y 4 en paralelo, detalla la demanda en energía estimada para poder realizar el desarrollo del sistema.

- **Cálculo de potencia del generador fotovoltaico**

Para determinar la potencia del generador fotovoltaico.

$$E_G = \frac{E}{\eta_R}$$

Donde:

$E$ : 31.92 [kWh]

$\eta_R$ : 0.98

$$E_G = \frac{31925.7617 \text{ [kWh]}}{0.98}$$

$$E_G = 32.57 \text{ [kWh]}$$

- **Cálculo de la potencia nominal del generador fotovoltaico**

Se calcula la potencia nominal necesaria que generara el panel fotovoltaico mediante la Ecuación 13.

$$P_N = \frac{E_G}{(HSP \cdot \eta_G)}$$

Donde:

$$E_G: 32.57 \text{ [kWh]}$$

$$HSP: 4,71$$

$$\eta_G: 0,9$$

$$P_N = \frac{32.57}{(4,71 \cdot 0,9)}$$

$$P_N = 7,68 \text{ [W]}$$

- **Cálculo del número de módulos en serie del generador FV**

Para poder obtener la potencia necesaria es necesario conocer la cantidad de los paneles fotovoltaicos que deben colocarse en serie, mediante la Ecuación 15.

$$M_S = \frac{V_{NS}}{V_{NM}}$$

Donde:

$$V_{NS}: 48 \text{ [V]}$$

$$V_{NM}: 24 \text{ [V]}$$

$$M_S = \frac{48}{24} = 2$$

Se necesitan 2 módulos en serie.

- **Cálculo del número de ramas en paralelo del generador FV**

Para determinar el número de ramas en paralelo del generador FV, se determina mediante la Ecuación 16.

$$M_p = \frac{P_N}{M_S \cdot P_p}$$

Donde:

$$P_N: 7.68 \text{ [W]}$$

$$M_S: 2$$

$$P_p: 420 \text{ [W]}$$



$$M_p = \frac{7.68}{2 * 420} = 9,1$$

$$M_p = 9$$

Se requieren 9 paneles en serie.

- **Cálculo del número total de módulos (MT) y potencia pico instalada**

Número total de módulos determinado por los paneles en serie y paralelo, con la Ecuación 17.

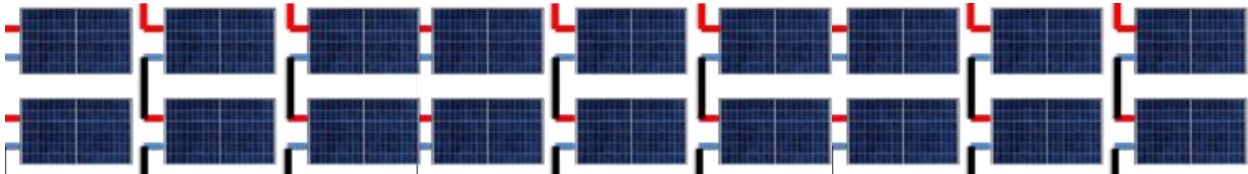
$$M_T = 2 * 9$$

$$M_T = 18 \text{ paneles}$$

Mediante el diseño se determina un arreglo de 18 paneles, 2 paneles en serie y 9 en paralelo.

### Figura 15

*Arreglo de paneles fotovoltaicos 2 en serie y 9 en paralelo*



*Nota.* La figura muestra el arreglo de paneles fotovoltaicos 2 en serie y 9.

La potencia pico instalada se determina mediante la cantidad de paneles instalados y la potencia nominal de cada panel, con la Ecuación 18 se determina:

$$P_{NI} = M_T \cdot P_p$$

Donde:

$M_T$ : 18

$P_p$ : 420 [W]

$$P_{NI} = 420 * 18$$

$$P_{NI} = 7560 \text{ W} = 7.6 \text{ kW}$$

- **Comprobación de compatibilidad entre el generador FV y el acumulador**

Para poder comprobar que el sistema de generación fotovoltaico pueda instalarse se toma en cuenta las corrientes de cortocircuito, mediante la Ecuación 19 se puede calcular.

$$I_{CCG} = I_{CC} \cdot M_p$$

Donde:

$$I_{CC}: 14,07$$

$$M_p: 9$$

$$I_{CCG} = 9 \cdot 14,07$$

$$I_{CCG} = 126,63 [A]$$

$I_{CCG}$  debe ser mayor o igual que la capacidad del acumulador dividida por 25, esto se determina mediante la Ecuación 20.

$$C/25$$

Donde:

$$C: 886,82 \text{ Ah}$$

$$\frac{C}{25} = \frac{886,82}{25} = 35,47$$

$$I_{CCG} > \frac{C}{25}$$

$$126,63 > 35,47$$

Si cumple la condición, por lo tanto, es compatible el panel fotovoltaico y el acumulador.

- **Cálculo del regulador**

Corriente a seleccionar del regulador más adecuado, mediante la Ecuación 21.

$$I_{PG} = M_p \cdot I_p$$

Donde:

$$M_p: 9$$

$$I_p: 13,33 [A]$$

$$I_{PG} = 9 \cdot 13,33$$

$$I_{PG} = 119,97 [A]$$

Para evitar fallas se realiza un sobredimensionamiento de la corriente del regulador en un 25%.

$$I_R = 119,97 \cdot 1.25$$

$$I_R = 149,96 [A]$$

- **Cálculo del inversor**

En este caso seleccionamos el inversor que tiene un valor de potencia nominal de 2,7 kW.

### **Análisis del dimensionamiento optimizado**

#### ***Dimensionamiento optimizado aislado***

Los resultados que se obtuvieron en el método óptimo aislado son los que se presentan en la Tabla 5 después de formular el problema de optimización y realizar la respectiva programación en el software FICO Xpress. El sistema híbrido cuando opera de forma aislada se puede verificar que los módulos fotovoltaicos son 9 unidades, el número de baterías totales a instalar es de 8 unidades. En cuanto a potencia instalada de los paneles fotovoltaicos se obtiene 3,78 kW, la potencia instalada en banco de baterías es de 19,2 kW y se obtiene un inversor de 2,7 kW. Con estos resultados se puede decir que el proyecto es viable para satisfacer la demanda caracterizada del laboratorio de energías renovables.

**Tabla 5**

*Resultados del método optimizado aislado*

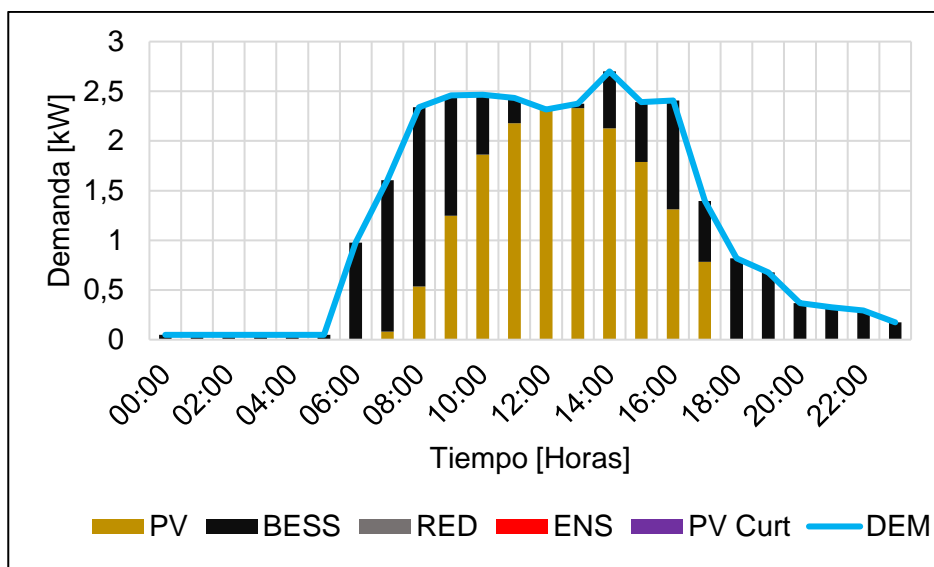
	<b>Unidades</b>	<b>Potencia instalada [kW]</b>
<b>PV</b>	9	3,78
<b>BESS</b>	8	19,2
<b>Inversor</b>	1	2,7

*Nota.* La tabla muestra los resultados del número de unidades PV, BESS e inversor. También muestra la potencia instalada de estos.

En la Ecuación 16 se muestra el suministro del sistema híbrido cuando este opera de manera aislada, se toma en cuenta estos resultados cuando el sistema opera en el mes de junio el cual es el mes con más baja irradiancia, satisfaciendo así la demanda por parte de las baterías, en las horas donde se requiere que la demanda sea abastecida se cumple de manera satisfactoria sin necesidad de depender de la red eléctrica pública. También se puede observar que no existe PV de curtailment o vertimiento.

### Figura 16

*Suministro a la demanda por parte del sistema híbrido aislado*

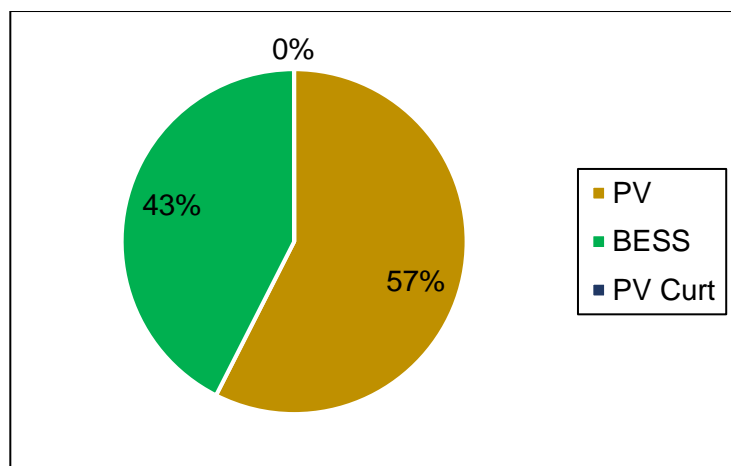


*Nota.* La gráfica muestra el suministro de energía por parte del sistema a la demanda en el mes de junio.

En la Figura 17 se muestra el porcentaje del uso de los paneles fotovoltaicos, BESS y PV curtailment, se observa que la energía de vertimiento hay muy poco tanto así que el sistema lo considera 0%.

**Figura 17**

*Porcentaje de participación de los elementos*

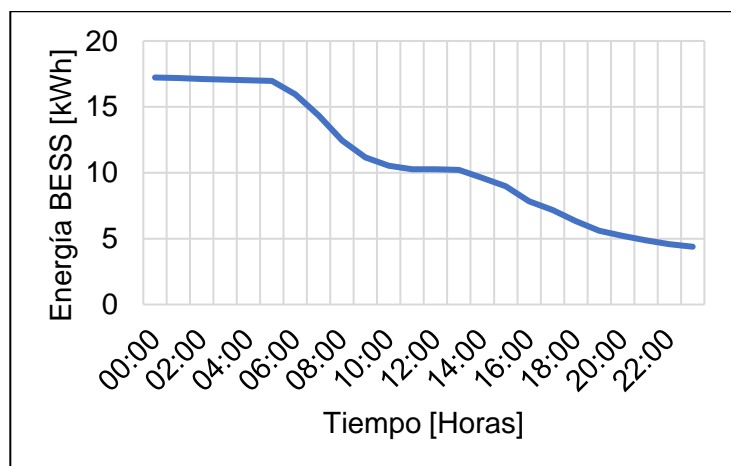


*Nota.* La figura de pastel muestra el porcentaje que presenta el PV, BESS, PV vertimiento.

Se muestra en la Figura 18 el comportamiento de la batería en un día típico, gracias a la restricción realizada en la formulación del problema de optimización del 20% como mínimo como al 80%, se observa que las baterías empiezan a descargar al final del día, se puede observar que entre las 6 am y 13 pm el sistema híbrido abastece a la demanda llegando a ocupar el banco de baterías. El sistema híbrido asilado llega a abastecer a la demanda de manera óptima.

**Figura 18**

*Descarga de las BESS en el modo aislado*

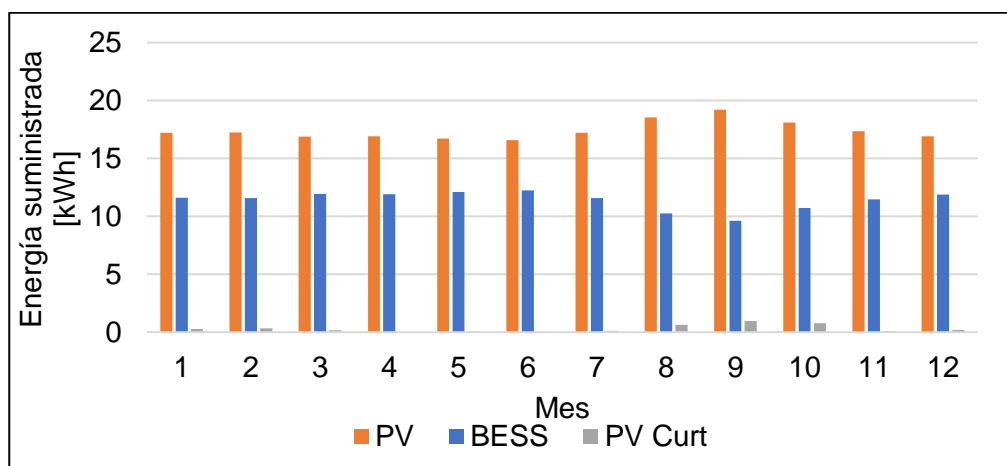


*Nota.* En la figura se muestra como la batería se va descargando en un día típico.

Se muestra en la Figura 19, la energía suministrada por el sistema híbrido en un año, como se puede observar, existe un mínimo de PV de vertimiento, también se puede apreciar que en el mes de agosto, septiembre y octubre aparece este vertimiento, pero como un mínimo. Se puede visualizar en la gráfica que las baterías también llegan suministrar energía a la demanda en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre. El sistema híbrido está operando de una manera óptima abasteciendo a la demanda.

### Figura 19

Energía que suministra el sistema híbrido en un año



*Nota.* La figura muestra la energía suministrada por PV, BESS, PV de vertimiento.

### ***Dimensionamiento optimizado conectado a la red***

Para este método se considera que el sistema híbrido está conectado a la red donde después de realizar la respectiva formulación del problema de optimización y restricciones correspondientes, da como resultados los siguientes valores mostrados en la Tabla 6 tanto para en número de dispositivos como para la potencia instalada de los dispositivos. Como se observa en la tabla, en cuanto a dispositivos a instalar se tiene 10 paneles fotovoltaicos, 4 BESS y un inversor. En cuanto a potencia instalada, se tiene por parte de paneles fotovoltaicos

un valor de 4,2 kW, 9,6 kW en BESS y 2,3 kW en el inversor. Como se puede ver a diferencia del aislado, las baterías se redujeron a 4 de 8 y los pañales fotovoltaicos aumento en un módulo.

**Tabla 6**

*Resultados método optimizado en conexión a la red*

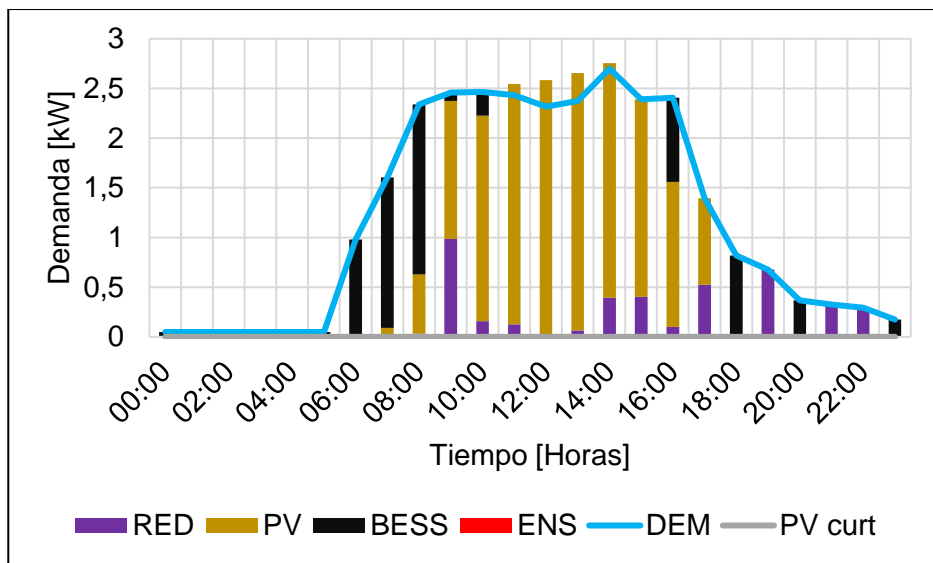
	<b>Unidades</b>	<b>Potencia instalada [kW]</b>
<b>PV</b>	10	4,2
<b>BESS</b>	4	9,6
<b>Inversor</b>	1	2,3

*Nota.* La tabla muestra los resultados del sistema óptimo conectado a la red.

De la misma manera se tiene en consideración el mes con menor irradiancia siendo este el mes de junio, a continuación, en la Figura 20, se muestra el suministro de energía por parte del sistema optimizado conectado a la red, donde se observa que la demanda es abastecida por baterías, paneles y muy poco por la red. La demanda es suministrada por la red a las 10 am en el mes de junio con un valor de 1 kW aproximadamente, pero la mayoría del tiempo se observa que el sistema suministra la demanda con BESS y PV.

**Figura 20**

*Suministro a la demanda por parte del sistema híbrido conectado a la red*

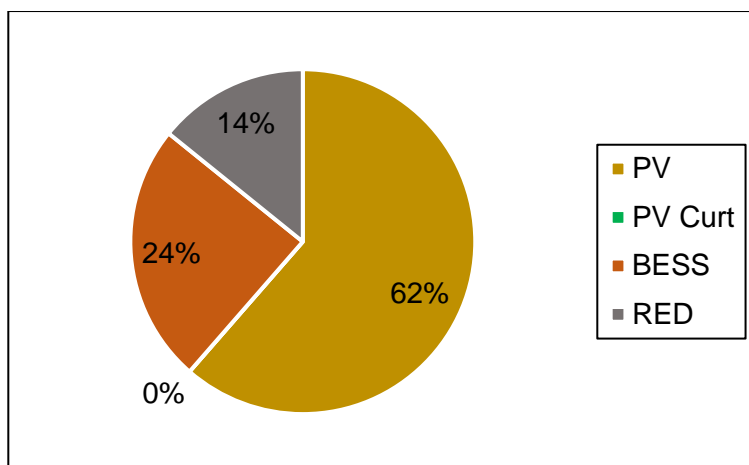


*Nota.* En la figura se muestra la demanda diaria suministrada por el sistema híbrido conectado a la red en el mes de junio.

En la siguiente Figura 21 se muestra el porcentaje de participación por parte de los elementos y se ve en que porcentaje la demanda es suministrada por la red. De la misma manera que en el método optimizado aislado se observa que el vertimiento es mínimo, cabe destacar que se presenta resultados para el mes de junio, ya que es el mes con menos irradiancia. Se observa que los paneles fotovoltaicos suministran en su mayoría con 62% y tan solo un 14% decide abastecer la demanda usando la red, también se puede ver que un 14% usa las BESS, llegando a mucho menor con respecto al método optimizado aislado, ya que el sistema cubre una parte tomando energía eléctrica de la red.

**Figura 21**  
Porcentaje de participación de los elementos del sistema híbrido





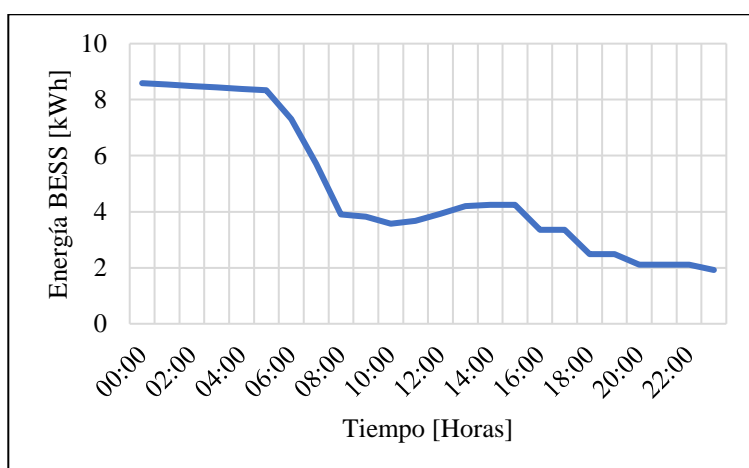
*Nota.* La figura muestra el porcentaje de uso de PV, BESS y la red.

Así mismo como en el aislado se obtuvo resultados de la descarga de la batería en un día típico del mes de junio. Se puede observar en la

Figura 22, como se comporta la BESS, a las 5pm empieza suministrar la demanda y se hace uso de las baterías, llegando a un pico pequeño de carga entre las 3pm y 4pm, pero después empieza hacer uso de las BESS para satisfacer la demanda.

## Figura 22

*Energía que suministra la BESS*

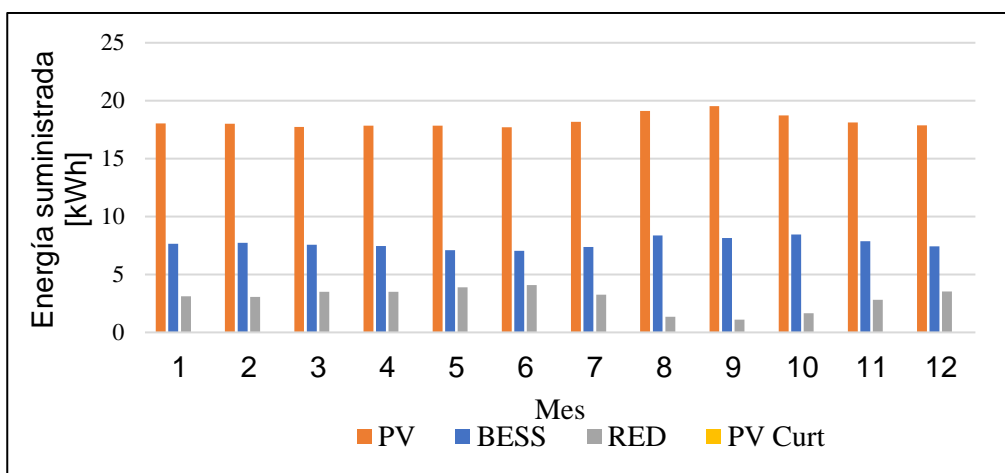


*Nota.* La figura muestra la curva de descarga de la BESS en un día tipo del mes de junio.

También se muestra en la Figura 23 la energía que se suministra a la demanda en un año de operación, donde se observa que el sistema híbrido conectado a la red ya hacer uso de la red eléctrica pública, siendo en el mes de junio con valor aproximado de 4,5 kW, se observa también que los paneles fotovoltaicos suministran es la que más suministra a la demanda.

### Figura 23

*Energía que suministra a la demanda en un año*



*Nota. La figura muestra la energía que suministra el sistema híbrido en la demanda.*

### Implementación

Para la implementación se adjunta evidencias de las instalaciones realizadas y las pruebas respectivas del sistema en funcionamiento.

En la Figura 24 se observa la instalación de los paneles fotovoltaicos en la azotea del laboratorio de energías renovables. Donde se puede observar el arreglo de los paneles el cual es 3 paneles en serie y 3 paneles en paralelo dando una potencia instalada de 3,8 kW ya que cada panel tiene una potencia de 420W dato proporcionado por el datasheet del módulo.

### Figura 24

*Arreglo fotovoltaico instalado en la azotea del laboratorio*



*Nota.* La figura muestra una fotografía de los módulos implementados en el laboratorio de energías renovables.

Se muestra en la Figura 25 la instalación del centro de monitoreo y la ubicación del inversor, también se encuentra instalado un tablero donde se encuentra el regulador y los diferentes dispositivos que conforman el sistema híbrido.

### Figura 25

*Tablero de monitoreo e inversor*



*Nota.* La figura muestra el tablero y el inversor ubicado en la mesa de monitoreo.

También se encuentra un lugar donde se ubican las baterías, estas quedan debajo de la mesa para evitar que ocupen espacio adicional. Las baterías están en una configuración de 4 baterías en serie y 2 hileras en paralelo dando un resultado en total de 8 baterías, la potencia que se dispone es de 19,2kW ya que cada batería es de 24V y 200Ah.

**Figura 26**

*Banco de baterías*



*Nota.* La figura muestra la ubicación de las baterías.

**Figura 27**

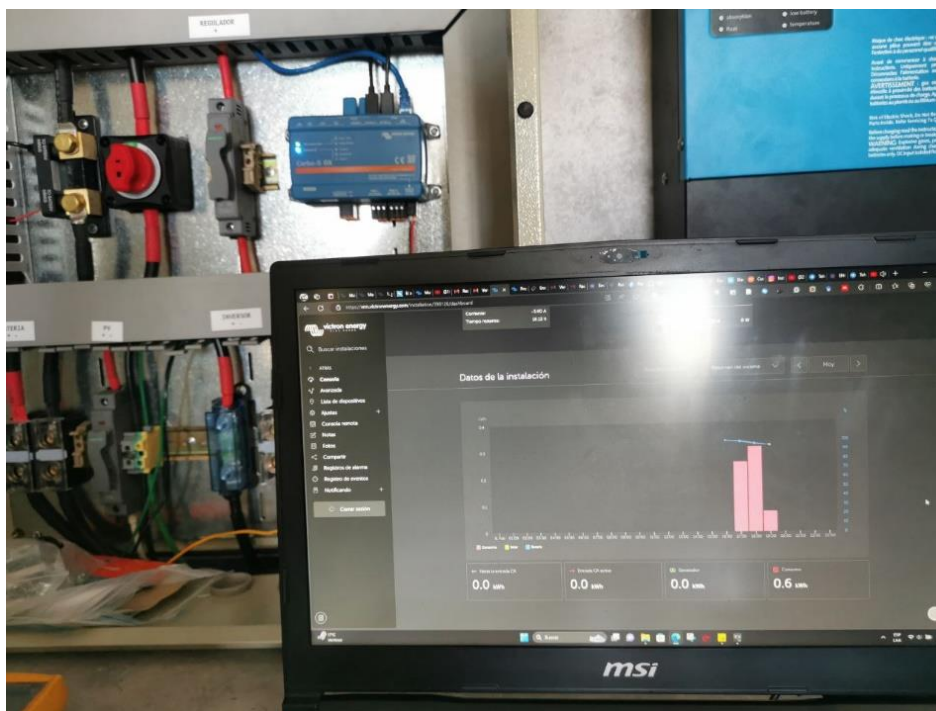
*Pruebas del sistema con cargas de 100W y 200W*



*Nota.* La figura muestra las cargas conectadas al sistema híbrido instalado.

**Figura 28**

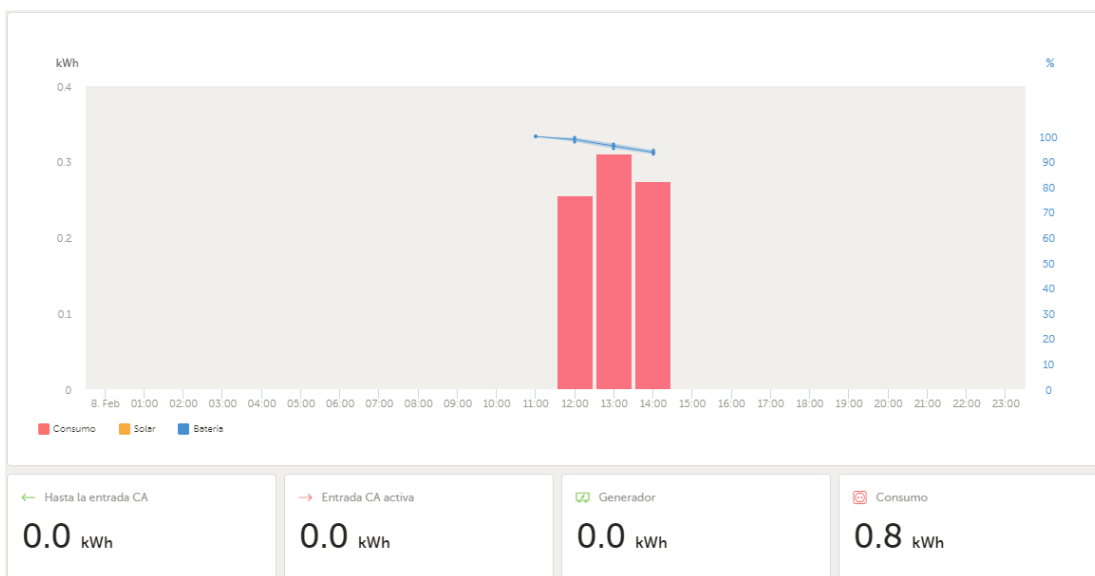
*Monitoreo del sistema híbrido*



*Nota.* La figura muestra el monitoreo en línea del sistema híbrido.

**Figura 29**

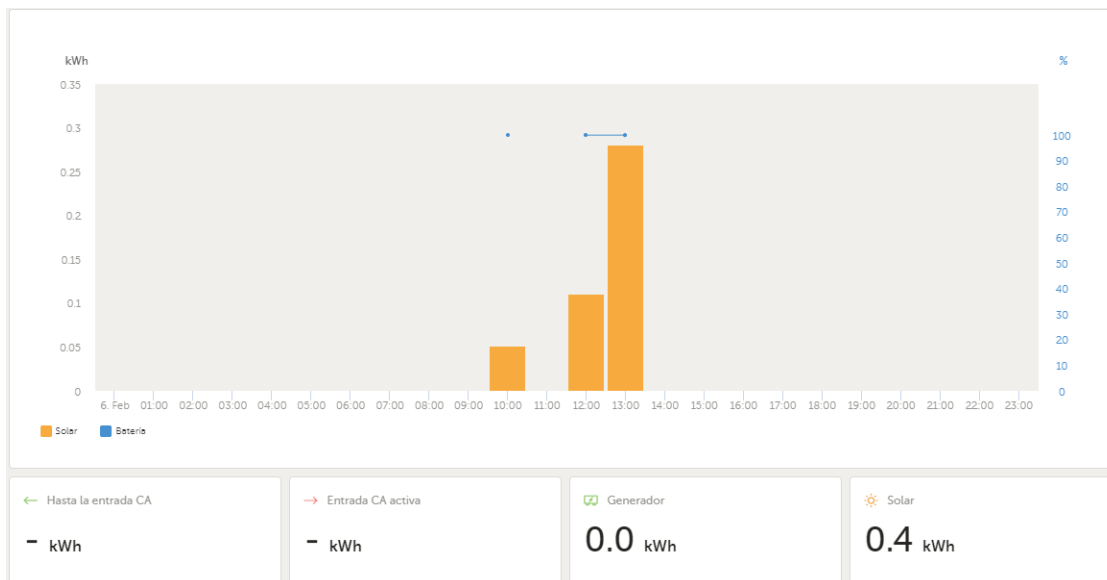
*Datos de la instalación y consumo de las cargas colocadas*



*Nota.* La figura muestra los datos adquiridos de consumo por las cargas conectadas a al sistema híbrido.

### Figura 30

*Datos de monitoreo del recurso solar de 0,4 kWh*

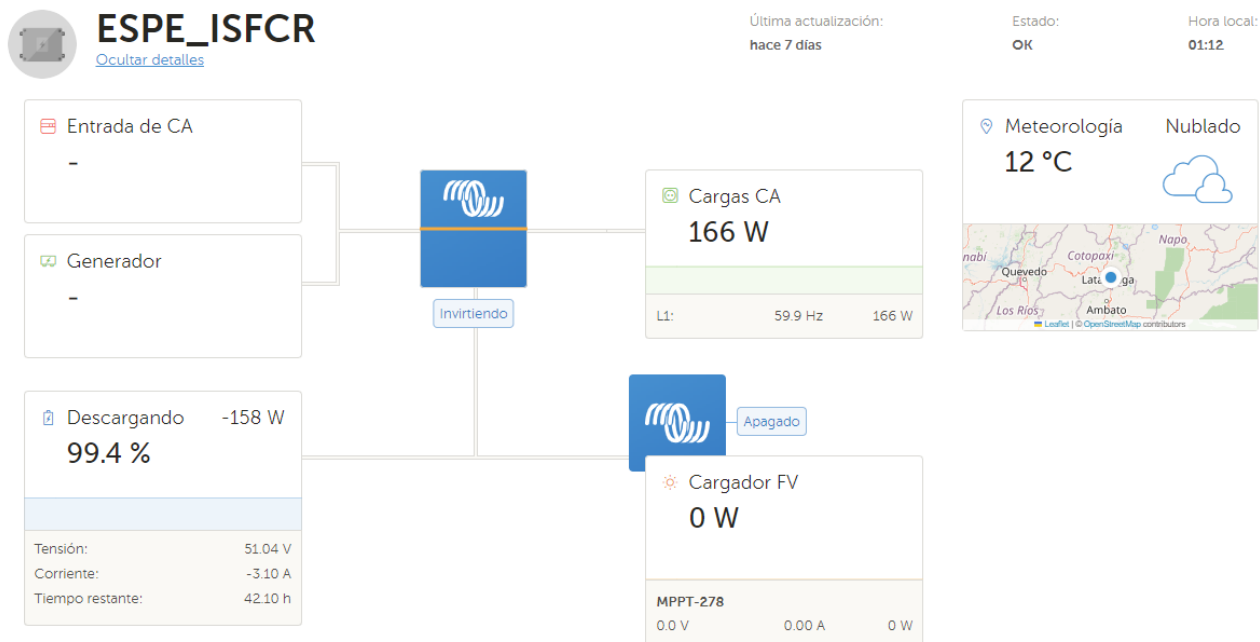


*Nota.* Se muestra en la figura los datos recolectados del recurso solar captado por los paneles solares.

A continuación, se presenta el centro de monitoreo del sistema en el cual se muestra las cargas que están conectadas al sistema fotovoltaico, donde se evidencia que las cargas consumen 166W, las baterías, mientras que las baterías presentan un porcentaje de descarga del 99,4%, también se muestra que las baterías suministran 158W y presentan una corriente de 3,10 A.

Figura 31

Centro de monitoreo online del sistema híbrido



*Nota.* La figura muestra el centro online de monitoreo de los dispositivos y el sistema híbrido en la plataforma Victron Energy. Tomado de (Victron Energy, s.f.)



### **Análisis comparativo entre los dimensionamientos tradicional HSP, optimizado (aislado y conectado a la red) e implementado**

Como se observa a continuación en la Tabla 7, método tradicional se tiene un sobredimensionamiento en el número de módulos PV y baterías, así mismo como la potencia de los módulos PV, en cuanto al el método optimizado aislado se tiene un número de módulos PV y baterías óptimas con el cual el sistema puede abastecer a la demanda satisfactoriamente y para el implementado se tiene los mismos valores que el de óptimo aislado. Para el método optimizado conectado a la red se tiene un número mayor de módulos PV y un número menor baterías en comparación con el aislado, esto debido a que el sistema híbrido necesita por lo menos un día de autonomía desconectado de la red.

**Tabla 7**

*Comparación de los métodos utilizados*

		Métodos							
		Tradicional	Optimizado		Implementado	Potencia [kW]	Optimizado		Implementado
Cantidad	Módulos PV Baterías Inversor		Aislado	Conectado a la red			Tradicional	Aislado	
			Módulos PV	24	9	10	9	7,68	3,78
	Baterías	16	8	4	8	19,2	19,2	9,6	19,2
	Inversor	1	1	1	1	2,7	2,7	2,3	3

*Nota.* La tabla muestra los resultados de los *métodos* tanto en cantidad de elementos como en potencia instalada del sistema híbrido fotovoltaico.

Es importante considerar que la restricción de conexión a la red hace que el sistema híbrido tenga como mínimo un día de autonomía desconectado de la red por los problemas que enfrenta el país de escasez de energía eléctrica debido a la sequias.

### **Selección del dimensionamiento**

El sistema tiene la posibilidad de operar en dos modos, conectado a la red y aislado, frente a los cortes de energía eléctrica que pasa el Ecuador, el sistema híbrido dará el respaldo y solventará este problema, por lo que es conveniente optar por el dimensionamiento aislado, ya que este podrá abastecer la demanda teniendo una potencia instalada de 22.98 kW. Otro criterio de selección del dimensionamiento aislado es que el campus Belisario Quevedo sea un campus sustentable, bajo este criterio lo más conveniente sería el dimensionamiento tradicional, pero debido al área que ocupa por el número de paneles no se puede implementar, por eso se sigue seleccionando el aislado. Un criterio adicional de la selección del dimensionamiento optimizado aislado es porque representa una implementación de laboratorio con los fines académicos y no de lucro, ya que no es una generadora. Y por último, un criterio importante es que se tuvo que ajustar a los fondos de un proyecto de investigación que auspicio la compra de los equipos.

### **Análisis de Costos**

Mediante el análisis de costo se puede determinar qué tipo de método se acopla a la implementación que se quiere realizar, a continuación, se presentan las tablas de costos de cada uno de los métodos realizados mediante el diseño.

**Tabla 8***Costos de Equipos Diseño Tradicional*

<b>Método Tradicional</b>			
	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Costo total</b>
<b>Panel fotovoltaico</b>	18	\$ 293,00	\$ 5.274,00
<b>Batería</b>	16	\$ 411,60	\$ 6.585,60
<b>Inversor</b>	1	\$ 910,54	\$ 2.458,46
<b>Total</b>			\$ 16.076,06

*Nota.* En la figura se muestra el costo de inversión cuando se realiza un diseño tradicional.

El sistema diseñado mediante el método tradicional requiere de más módulos y equipos, lo que eleva el costo de inversión.

**Tabla 9***Costos de Equipos Diseño Optimizado Aislado*

<b>Método Optimizado: Aislado</b>			
	<b>Unidades</b>	<b>Costos [USD]</b>	<b>Costo total</b>
<b>PV</b>	9	\$ 293,00	\$ 2.637,00
<b>BESS</b>	8	\$ 411,60	\$ 3.292,80
<b>Inversor</b>	1	\$ 910,54	\$ 2.458,46
<b>Total</b>		-	\$ 8.388,26

*Nota.* En la figura se muestra el costo de inversión cuando se realiza un diseño mediante modelo aislado.

El método aislado se adapta a lo establecido, en los datos y los requerimientos económicos, ya que logra cubrir la demanda, sin inconvenientes, con autonomía de un día.

**Tabla 10**

*Costos de Equipos Diseño Optimizado Conectado a la red*

<b>Método Optimizado: Conectado a red</b>				
	<b>Unidades</b>	<b>Costos [USD]</b>	<b>Costo total</b>	
<b>PV</b>	10	\$ 293,00	\$	2.930,00
<b>BESS</b>	4	\$ 411,60	\$	1.646,40
<b>Inversor</b>	1	\$ 910,54	\$	2.101,74
<b>Total</b>		-	\$	6.678,14

*Nota.* En la figura se muestra el costo de inversión cuando se realiza un diseño mediante modelo conectado a la red.

Los sistemas conectados a la red se adaptan con un menor número de BESS, ya que el suministro de la red juntamente con el sistema de generación, por esto el costo es menor.

### **Análisis VAN y TIR**

El análisis del Valor Actual Neto (VAN) juntamente con la Tasa Interna de Retorno (TIR), permite definir la mejor manera de maximizar la rentabilidad y minimizar el riesgo de los costos de inversión de un proyecto, permitiendo evaluar si el método es viable o no, para este análisis se tiene en cuenta varios aspectos como:

Costo de energía eléctrica sin subsidio:  $0,20 \left[ \frac{USD}{kWh} \right]$

Años de recuperación: 5 años

Interés: 3%

Tasa de recuperación de capital (TRC): la tasa de recuperación de capital se determina mediante.

### **Ecuación 43**

*Tasa de recuperación del capital*

$$TRC = \frac{i(i+1)^{\#años}}{(i+1)^{\#años-1}}$$

$$TRC = \frac{0,03(0,03 + 1)^5}{(0,03 + 1)^{5-1}}$$

$$TRC = 0,21835457$$

Una vez establecidos estos parámetros se calcula el Valor actual neto, que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{valores_i}{(1 + años)^i}$$

Las funciones de Excel permiten realizar el cálculo del VAN, teniendo en cuenta la inversión, y los costos de producción de energía.

### Dimensionamiento optimizado Aislado

Se toma en cuenta los datos de producción de energía y el costo de producción de la misma presente en la siguiente tabla:

**Tabla 11**

*Producción y costos de producción de energía modelo aislado*

	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Energía [MWh]</b>	10,52	10,52	10,52	10,52	10,52
<b>Beneficio</b>	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00

*Nota.* En la tabla se muestra la producción de energía y el costo de producción cuando se realiza un diseño mediante modelo aislado.

**Tabla 12**

*Inversión y producción de energía en 5 años*

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Flujo de caja</b>	\$-8.388,26	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00	\$ 2.104,00

*Nota.* En la tabla se muestra la producción de energía y el costo de producción cuando se realiza un diseño mediante modelo aislado.

Con los siguientes datos se realiza el análisis para obtener el VAN y el TIR, del proyecto mediante el método optimizado.

**Tabla 13**

*Tabla de VAN y TIR dimensionamiento Aislado*

<b>Inversión</b>	\$8.388,26
<b>TD</b>	3%
<b>BNA</b>	\$9.635,70
<b>VAN</b>	\$1.247,45
<b>TIR</b>	8%

*Nota.* En la tabla se muestra los valores del VAN y TIR cuando se realiza un diseño mediante modelo aislado.

Como se tiene un valor de VAN positivo, demuestra que el sistema es viable, pero se debe tener en cuenta que el costo de la energía eléctrica es de 20 ctvs./ kWh.

## Dimensionamiento Optimizado Conectado a red

**Tabla 14**

*Producción y costos de producción de energía modelo conectado a la red*

	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Energía [MWh]</b>	9,456	9,456	9,456	9,456	9,456
<b>Beneficio</b>	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20

*Nota.* En la tabla se muestra la producción de energía y el costo de producción cuando se realiza un diseño mediante modelo conectado a la red.

**Tabla 15**

*Inversión y producción de energía, dimensionamiento conectado a la red*

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>
<b>Flujo de caja</b>	\$-6.678,14	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20	\$ 1.891,20

*Nota.* En la tabla se muestra la producción de energía y el costo de producción en 5 años cuando se realiza un diseño mediante modelo conectado en la red.

**Tabla 16**

*Tabla de VAN y TIR dimensionamiento conectado a la red*

<b>Inversión</b>	\$6.678,14
<b>TD</b>	3%
<b>BNA</b>	\$8.661,14
<b>VAN</b>	\$1.983,00
<b>TIR</b>	13%

*Nota.* En la tabla se muestra los valores del VAN y TIR cuando se realiza un diseño mediante modelo aislado.

Como se tiene un valor de VAN positivo, demuestra que el sistema es viable, pero se debe tener en cuenta que el costo de la energía eléctrica es de 20 ctvs./ kWh. En este diseño

el sistema modelado de manera aislada es el que más se acerca al diseño implementado ya que este, está diseñado para poder abastecer la energía en 1 día de autonomía mientras este no se encuentre conectado a la red, asumiendo el peor de los casos.



## Capítulo VI

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

- La incorporación del sistema híbrido que usa como energía primaria, energía solar, permiten dar un paso importante en el uso de sistemas renovables, esta transición ayuda a la universidad a que se pueda generar energía y dar un paso a universidad más sustentable y con mayor autonomía, dando así un aporte al país a cumplir su plan maestro de electricidad cumpliendo con la diversificación de la matriz energética, reduciendo la dependencia del uso del petróleo en sistemas de generación, y con ello el impacto ambiental.
- Los sistemas de generación fotovoltaica presentan una problemática referente a la política de producción energética del país, ya que la energía eléctrica producida, es subsidiada presentando un costo de 9 centavos por kilovatio hora (0,09 USD/kWh), esta política hace que en empresas generadoras estos sistemas fotovoltaicos no sean rentables; sin embargo, al ser una institución educativa, la implementación es viable, ya que permite abastecer la demanda del laboratorio, con previsión a suministrar en un futuro toda la demanda del edificio mediante energías renovables.
- En este trabajo de titulación se recopiló la suficiente información relevante para el diseño de un sistema de generación híbrida. Lo más importante de la recolección de datos fue la caracterización de la demanda porque en base a esta curva característica que presenta el consumo del laboratorio es que se pueden diseñar y dimensionar el sistema híbrido en base a los modelos que presenta este proyecto. Lo que más ayudo a la recopilación de los datos fue también el uso de plataformas digitales como PVGIS porque nos permite adquirir información de irradiancias en el lugar que se ha dispuesto a instalar los paneles fotovoltaicos.

- En este proyecto de titulación se realizó el diseño e implementación de un sistema de generación híbrida fotovoltaica baterías, que operará de modo aislado o estará conectado a la red. Siendo uno de los principales beneficios del sistema el aporte que tiene cuando el suministro de energía es suspendido ya que actualmente Ecuador pasa por cortes de energía eléctrica debido a las sequías que se presentan en la época. Además, este proyecto promueve al uso de energías renovables, Sin embargo, proyectos de este tipo aún no se han masificado, principalmente porque la inversión frente al beneficio económico, tal como están las condiciones del país en donde la energía es subsidiada no ha generado mucho incentivo económico masivo.
- El dimensionamiento del sistema de generación híbrido se puede realizar mediante varias metodologías, en este trabajo se usaron dos técnicas, la primera denominada tradicional y una segunda en donde se propone un problema de optimización. La metodología tradicional utiliza ecuaciones matemáticas y usando como datos de entrada la menor irradiancia de la zona, y un perfil de demanda establecido, se seleccionan equipos presentes en el mercado que se acoplen a lo requerido para dimensionar los equipos faltantes. Por otro lado, el dimensionamiento optimizado, que tiene en cuenta la variabilidad del recurso solar, curvas características, estableciendo un objetivo y restricciones que permiten modelar el sistema de generación correctamente, para poder optimizar el sistema, a su vez la propuesta optimizada se analiza en dos modos de operación uno conectado a la red y otro en modo asilado. Se puede concluir, el método tradicional es más costoso de implementar debido a que sobredimensiona las unidades, mientras que al resolver un problema de optimización es más económico.
- Al aplicar la técnica de diseño óptimo aislado del sistema híbrido fotovoltaico con baterías se presenta una reducción de costo de inversión de 52.1% en comparación al diseño tradicional. Pese a que este proyecto no es concebido con un lucro

económico, se analizó y concluyó que el retorno de inversión en el óptimo asilado es de 5 años, mientras que en el tradicional es de 10 años.

- El dimensionamiento mediante el método tradicional permite una mayor generación de potencia instalada, debido a la mayor cantidad de equipos de sistemas híbridos fotovoltaicos se puede realizar por varias metodologías, pero hay que tener en cuenta que el recurso solar al ser un elemento inherentemente variante en el tiempo, que no puede ser considerado de manera determinista sino más bien como estocástica. Para solventar esta estocasticidad es necesario que los sistemas adopten otras alternativas de diseño, como la optimización del diseño, la optimización permite analizar datos considerando restricciones, variables y parámetros, de esta manera el optimizador emite resultados en base al modelamiento del sistema, así se pueden reducir costos, maximizar la producción de energía, dependiendo del objetivo que se plantee en el modelo.
- El diseño de sistemas híbridos fotovoltaicos mediante el enfoque tradicional, dan una propuesta de un sistema de generación, en base a decisiones y ecuaciones, estos sistemas toman en cuenta las peores condiciones del sistema, como el rendimiento de los equipos, así como la menor irradiancia que pueda presentarse en la zona de estudio, si bien estas decisiones pueden servir para poder modelar, los sistemas resultan sobredimensionados, ya que evalúan el peor de los casos, por otro lado, un modelo optimizado, toma en cuenta el recurso solar como una variable aleatoria, evalúa la demanda en base a curvas características, de este modo evita sobredimensionar los sistemas para que estos funcionen con el menor recurso posible, y sean capaces de entregar lo solicitado en el modelo.
- El sistema implementado en el campus Belisario Quevedo, en el laboratorio de energías renovables, posee las características del diseñado por optimización, el mismo que actualmente se encuentra funcionando y posee un sistema fotovoltaico

de 9 arreglos, 3 en serie y 3 en paralelo con una potencia instalada de 3.78 kW, y un sistema de almacenamiento por baterías de 8 baterías de potencia instalada de 19.2kW, con el que se espera apoyar al sistema híbrido existente de 2.1kW Con este proyecto implementado se ha logrado incrementar la potencia instalada con fuentes renovables en el campus.

## Recomendaciones

- Para el dimensionamiento optimizado se debe formular de manera correcta la función objetivo, la penalización a la generación, teniendo en cuenta también las restricciones que están ligadas a este, por lo que de esto dependerá el dimensionamiento correcto del sistema híbrido.
- Es muy importante la caracterización de la demanda, ya que de esto dependerá la potencia instalada que deberá tener la instalación del sistema híbrido de generación fotovoltaica.
- Se recomienda que para la instalación de los paneles fotovoltaicos se delimite el área a ocupar por todo el arreglo fotovoltaico, ya que de esto dependerá las distancias resultantes entre los equipos, y de ahí se tomará como referencia el cableado y conductores a ocupar en las conexiones.
- Al momento de la implementación es importante poseer las aplicaciones de conectividad de los dispositivos actualizado caso contrario ninguno de los dispositivos será identificado para el monitoreo.

## Bibliografía

- AactivoSolar. (18 de diciembre de 2023). *Inversores híbridos*. 25 de febrero de 2024, de Aactivo Solar: <https://activosolar.com/inversores-solares/inversores-hibridos/>
- Aguilera, J., y Hontoria, L. (s.f.). *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos*. 22 de febrero de 2024, de GRUPO IDEA. DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA: <https://manuelberaun.files.wordpress.com/2011/12/dimensionado-de-sfv-autonomos.pdf>
- AIE. (2022). *Is renewable energy capacity in the European Union making windfall profits de high wholesale prices?* 12 de febrero de 2024, de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/is-renewable-energy-capacity-in-the-european-union-making-windfall-profits-de-high-wholesale-prices>
- Ávila, D., Alesanco, R., y Veliz, J. (abril de 2011). Sistemas híbridos con base en las energías renovables para el suministro de energía a plantas desaladoras. *Ingeniería Mecánica*, 14(1), 22-30. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1815-59442011000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1815-59442011000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Cañizares, A. (26 de octubre de 2023). *El Gobierno de Ecuador anuncia apagones ante “la peor sequía de los últimos 50 años”: ¿cuándo empiezan, en qué horarios y hasta cuándo?* 21 de febrero de 2024, de CNN español: <https://cnnespanol.cnn.com/2023/10/26/ecuador-apagones-sequia-cuando-empiezan-horarios-orix/>
- Carrión, D., y Ortiz, L. (diciembre de 2013). Generation distributed de static bicycles and hybrid systems. *Ingenius*(10), 44-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.17163/ings.n10.2013.05>
- Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., García, R., y Alguacil, N. (2022). *Formulacion y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*. <http://dia.fi.upm.es/~jafernan/teaching/operational-research/LibroCompleto.pdf>
- Confirmado.net; Roger. (13 de diciembre de 2023). *Crisis de Energía en Ecuador: ¿Qué pasaría con la economía sin Coca Codo Sinclair?* 15 de febrero de 2024, de

- Confirmado.net: <https://confirmado.net/2023/12/13/crisis-de-energia-en-ecuador-que-pasaria-con-la-economia-sin-coca-codo-sinclair/>
- Fossati, J. (2011). Revisión bibliográfica sobre micro redes inteligentes. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*(9), 13-20.  
<http://www.revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/286>
- Hassan, R., y Radman, G. (2010). Survey on Smart Grid. *SOUTHEASTCON 2010* (pp. 210-213). Concord, NC, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/SECON.2010.5453886>
- Inca, G., Cabrera, D., Villalta, D., Bautista, R., y Cabrera, H. (mayo-junio de 2023). Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: avances, desafíos y perspectivas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 9493-9509.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6835](https://doi.org/https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6835)
- Interempresas. (14 de noviembre de 2017). *Sistemas híbridos para garantizar el suministro eléctrico*. 25 de febrero de 2024, de Interempresas:  
<https://www.interempresas.net/Electricidad/Articulos/204002-Sistemas-hibridos-para-garantizar-el-suministro-electrico.html>
- Kurbatova, T., y Perederii, T. (2020). Global trends in renewable energy development. *IEEE*, 260-263. <https://doi.org/10.1109/KhP|Week51551.2020.9250098>
- Kwon, R. (2014). *Introduction to linear optimization and extensions with MATLAB*. CRC Press.
- Lamo, P. (s.f.). Energía Solar Fotovoltaica. *Tema 9: Instalaciones autónomas*. 22 de febrero de 2024.
- Latorre, J., Ramos, A., y Palacios, R. (1 de agosto de 2008). Optimización bajo incertidumbre. Técnicas de descomposición y aplicación en Grid. *Revista: Anales de Mecánica y Electricidad*, 85(4), 28-36. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/5230>
- Llano, M. (2015). La Micro-Red inteligente: una ciudad eficiente, en miniatura. *Revista Universitas Científica*, 18(1), 24-29.  
<https://revistas.upb.edu.co/index.php/universitas/article/view/1452>

- Ministerio de Energías y Minas. (5 de enero de 2024). *Central Mazar garantizará el abastecimiento de energía eléctrica al país mientras Coca Codo Sinclair entra en mantenimiento*. 21 de febrero de 2024, de Ministerio de Energías y Minas: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/central-mazar-garantizara-el-abastecimiento-de-energia-electrica-al-pais-mientras-coca-codo-sinclair-entra-en-mantenimiento/#>
- Mulkern, A., y News, E. (mayo de 2022). California Faces Summer Blackouts de Climate Extremes. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/california-faces-summer-blackouts-de-climate-extremes/>
- Ojeda, J. (2022). *Revisión de contenido teórico sobre microrredes y estudios previos acerca de su implementación como suministro de energía en Colombia [Tesis de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomas - Bucaramanga]*. Repositorio Institucional. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/49251/2023OjedaFabian.pdf?sequence=1>
- Paredes, L., Serrano, B., y Molina, M. (2019). Microgrids - a Methodological Review in the Current Context of Electric Systems. *Colegio de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de Ecuador (CIEEPI)*, 12(49), 9-18. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/125005>
- Pérez, R. (2019). *Introducción a los modelos de optimización*. Sello Editorial UniPiloto. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6637>
- Perino, E., Kiessling, R., Silnik, A., y Perelló, A. (mayo de 2021). Energías renovables y sustentabilidad: una eficiente forma de gestionar los recursos naturales. *Revista Digital Universitaria*, 22(3), 30-39. <https://doi.org/http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2021.22.3.4>
- Pesantez, J., Ríos, A., y González, J. (2021). Integration of Photovoltaic Solar Systems in the Intensive and Extensive Shrimp Sector of Ecuador: El Oro Province Study Case. *Revista Politécnica*, 47(2), 7-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.33333/rp.vol47n2.01>



- Primicias, R. (7 de noviembre de 2023). *Aumenta la inseguridad y bajan ventas por cortes de luz en Quito, según encuesta*. 24 de febrero de 2024, de Primicias:  
<https://www.primicias.ec/noticias/economia/apagones-negocios-cortes-luz-quito/#:~:text=Por%20su%20parte%2C%20la%20C%C3%A1mara,hasta%20el%207%20de%20noviembre.>
- Ramos, A., y Cerisola, S. (2016). *OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA*.  
[https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/apuntes/a\\_sp.pdf](https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/simio/apuntes/a_sp.pdf)
- Sidrach, M. (mayo de 2001). *INTRODUCCIÓN AL DISEÑO Y DIMENSIONADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS*. 22 de febrero de 2024], de Academia:  
[https://www.academia.edu/43548737/INTRODUCCI%C3%93N\\_AL\\_DISE%C3%91O\\_Y\\_DIMENSIONADO\\_DE\\_SISTEMAS\\_FOTOVOLTAICOS\\_AUT%C3%93NOMOS](https://www.academia.edu/43548737/INTRODUCCI%C3%93N_AL_DISE%C3%91O_Y_DIMENSIONADO_DE_SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS_AUT%C3%93NOMOS)
- Sioshansi, R., y Conejo, A. (2017). *Optimization in engineering: models and algorithms* (Vol. 120). Springer Nature.
- Velásquez-Lozano, A., Aguirre-Velasco, M., Saltos-Rodríguez, M., Ortiz-Villalba, D., Macias-Bermudez, M., Llanos, J., y Martínez, W. (s.f.). Practical framework for optimal planning of isolated rural microgrids. *XV Multidisciplinary International Congress on Science and Technology* (pp. 227-241). Springer International Publishing.
- Victron Energy. (s.f.). *ESPE\_ISFCR - VRM Portal*. Victron Energy:  
<https://vrm.victronenergy.com/installation/398126/dashboard>

## Anexos