



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO**  
**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**MAESTRÍA EN MATEMÁTICA CON MENCIÓN EN**  
**MODELACIÓN MATEMÁTICA**

**Tema:**

Evaluación y optimización del suministro energético en edificios de consumo cercanos a zero nZEB, caso de estudio Ecuador

**AUTOR:**

Mgr. Jhonny Darwin Ortiz Mata

**DIRECTOR TFM:**

MSc. José Martín Muñoz Salcedo

**Milagro, 29 de abril 2022**

**ECUADOR**

## ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Por la presente hago constar que he analizado el proyecto de informe de investigación presentado por el Mgtr. Jhonny Darwin Ortiz Mata con el tema “*Evaluación y optimización del suministro energético en edificios de consumo cercanos a Zero nzeb, caso de estudio Ecuador*”, para optar al título de Magister en Matemática, mención en Modelación Matemática y que acepto tutoriar al estudiante, durante la etapa de desarrollo del trabajo hasta su presentación, evaluación y sustentación.

Milagro, a los 30 días del mes de noviembre de 2021

---

MSc. José Martín Muñoz Salcedo

C.C 0104226725

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El autor de esta investigación declara ante el Comité Académico del Programa de Maestría en Matemática, mención en Modelación Matemática de la Universidad Estatal de Milagro, que el trabajo presentado es de mi propia autoría, no contiene material escrito por otra persona, salvo el que está referenciado debidamente en el texto; parte del presente documento o en su totalidad, no ha sido aceptado para el otorgamiento de cualquier otro Título de una institución nacional o extranjera.

Milagro, a los 29 días del mes de abril de 2022

---

Mgtr. Jhonny Ortiz Mata

C.C 0927159111

## CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

EL TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de Magister en Matemática, mención en Modelación Matemática otorga al presente proyecto de investigación las siguientes calificaciones:

MEMORIA CIENTÍFICA	[ 58.67 ]
DEFENSA ORAL	[ 40.00 ]
<b>TOTAL</b>	[ 98.67 ]
<b>EQUIVALENTE</b>	[Excelente]

---

Mgtr. Byron Romero Romero  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

---

MSc. José Muñoz Salcedo  
DIRECTOR TFM

---

MSc. Arístides Reyes Bacardí  
SECRETARIO DEL TRIBUNAL

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico en especial a mis padres Juan y Rosa, gracias a ellos he llegado donde estoy, siempre con su apoyo incondicional, sus consejos, su guía, por enseñarme a ser una persona de bien y por su valiosa ayuda a lo largo del proceso, ellos son el motor de mi vida. A Xiomara porque siempre está conmigo para compartir alegrías y tristezas, por ser mi compañera y por ser mi motivación para alcanzar mis metas. A toda mi familia por el ánimo y apoyo, con su ayuda he logrado concluir con éxito esta meta. Este trabajo va por todos ustedes.

Mgtr. Jhonny Darwin Ortiz Mata

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, a Jehová Dios por darme la vida, por guiarme y darme sabiduría en cada una de mis decisiones y por permitirme alcanzar mis metas.

A mis padres Juan y Rosa por su confianza, por su ayuda, por su guía y por su valioso ejemplo.

Al tutor del trabajo de titulación y amigo, MSc. José Martín Muñoz por todo su apoyo, por su guía en las diferentes etapas del trabajo, por su disponibilidad para atender requerimientos y toda la enseñanza brindada de su parte.

Al profesor, colega y amigo Ing. Byrone Almeida Salazar, por su enseñanza, los consejos y guía para la obtención de datos requeridos para el proyecto, ha sido de gran aporte sus conocimientos para la realización del trabajo.

A las autoridades de la Universidad Estatal de Milagro por su ayuda en el crecimiento profesional de la planta docente.

Mgtr. Jhonny Darwin Ortiz Mata

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Doctor

Fabrizio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Mediante el presente documento, libre y voluntariamente procedo a hacer la Cesión de Derecho de Autor del Trabajo realizado como requerimiento para la obtención del mi Título de Cuarto Nivel, cuyo tema fue “***Evaluación y optimización del suministro energético en edificios de consumo cercanos a Zero nzeb, caso de estudio Ecuador***” y que corresponde al Vicerrectorado de Investigación y Postgrado

Milagro, a los 29 días del mes de abril de 2022

---

Mgtr. Jhonny Ortiz Mata

C.C 0927159111

## ÍNDICE GENERAL

<b>ACEPTACIÓN DEL TUTOR .....</b>	<b>II</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>VI</b>
<b>CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Alcances y Limitaciones .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Planteamiento Hipotético .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Marco Teórico .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.1 Edificios de consumo cero.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5.2 Generación Eléctrica.....</b>	<b>8</b>
<b>1.5.3 Balance Neto Energético.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5.4 Sistemas de Generación Eléctrica.....</b>	<b>11</b>
<b>1.5.5 Energía Convencional.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5.6 Energía Alternativa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.5.7 Repercusiones de la Explotación de Fuentes Energéticas .....</b>	<b>23</b>
<b>1.5.8 Demanda Eléctrica .....</b>	<b>27</b>
<b>1.5.9 Análisis de Cálculo de Cargas .....</b>	<b>31</b>
<b>1.5.10 Normativa para Energías Alternativas .....</b>	<b>33</b>
<b>1.6 Energía Solar Fotovoltaica .....</b>	<b>35</b>
<b>1.6.1 Componentes del Sistema Solar Fotovoltaico .....</b>	<b>35</b>
<b>1.6.2 Conexión de Sistemas Fotovoltaicos .....</b>	<b>42</b>
<b>1.7 Algoritmos de Optimización.....</b>	<b>43</b>
<b>1.8 Software para Optimización .....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>54</b>
<b>Materiales y Métodos .....</b>	<b>54</b>
<b>2.1 Tipo y Diseño de Investigación .....</b>	<b>54</b>
<b>2.2 Obtención de Perfiles de Generación y Consumo .....</b>	<b>54</b>
<b>2.2.1 Perfil Solar .....</b>	<b>55</b>

2.2.2	Perfil Eólico .....	57
2.2.3	Perfil de Consumo .....	60
2.3	Datos de Clima Promedio en Milagro-Guayas .....	62
2.4	Algoritmo MILP .....	64
2.4.1	Función Coste .....	64
2.4.2	Coste Térmico .....	65
2.4.3	Fuente Termosolar .....	65
2.4.4	Caldera de Gas .....	66
2.4.5	Bomba de Calor .....	66
2.4.6	Cogeneración .....	66
2.4.7	Coste Eléctrico .....	67
2.4.8	Fuente Fotovoltaica .....	68
2.4.9	Aerogenerador .....	68
2.4.10	Red .....	69
2.4.11	Cogeneración Eléctrica .....	70
2.4.12	Coste e Batería .....	71
2.4.13	Balance Energético .....	71
2.4.13.1	Balance Térmico .....	72
2.4.13.2	Balance Eléctrico .....	72
2.5	Equipos y Materiales .....	73
2.6	Fuentes de Generación Gestionable .....	74
2.7	Costos de las Tecnologías .....	75
CAPÍTULO 3 .....		77
3.1	Resultados y Discusión .....	77
3.2	Conclusiones y Recomendaciones .....	84
3.3	Referencias Bibliográficas .....	86
ANEXOS .....		91

## Índice de Tabla

<b>Tabla 1</b>	Uso de la energía eólica según la velocidad del viento. ....	17
<b>Tabla 2</b>	Fuentes de biomasa en el Ecuador .....	23
<b>Tabla 3</b>	Clasificación para consumidores de alto voltaje. ....	28
<b>Tabla 4</b>	Categorías de tarifa y nivel de voltaje .....	28
<b>Tabla 5</b>	Costos de energía según categoría y nivel de voltaje .....	31
<b>Tabla 6</b>	Tipos de paneles fotovoltaicos .....	36
<b>Tabla 7</b>	Tipos de baterías para instalaciones con paneles solares. ....	39
<b>Tabla 8</b>	Agregación de perfiles mensuales radiación Milagro (W/m <sup>2</sup> ) .....	56
<b>Tabla 9</b>	Agregación de perfiles mensuales, velocidad del viento Milagro (m/s).....	58
<b>Tabla 10</b>	Agregación mensual de consumo eléctrico Fabrica de balanceado. ....	61
<b>Tabla 11</b>	Especificaciones y parámetros de operación Panel eléctrico. ....	73
<b>Tabla 12</b>	Especificaciones de Batería de Plomo ácido.....	73
<b>Tabla 13</b>	Especificaciones de Inversor.....	73
<b>Tabla 14</b>	Especificaciones técnicas del Aerogenerador .....	74
<b>Tabla 15</b>	Precios y vida útil de las diferentes fuentes de generación eléctrica. ....	75
<b>Tabla 16</b>	Unidades, potencia a instalar y producción de las fuentes eléctricas.....	77

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b>	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.....	8
<b>Figura 2</b>	Capacidad instalada para generación de electricidad en Ecuador .....	9
<b>Figura 3</b>	Producción de energía eléctrica en Ecuador por diversas fuentes.....	9
<b>Figura 4</b>	Facturación de energía eléctrica en el Ecuador .....	10
<b>Figura 5</b>	Generación de electricidad centralizada.....	11
<b>Figura 6</b>	Generación distribuida en modo red .....	12
<b>Figura 7</b>	Tecnologías para generación de electricidad .....	13
<b>Figura 8</b>	Mapa de radiación solar Ecuador .....	16
<b>Figura 9</b>	Curva de potencia de aerogenerador Smarttister ST-10000 .....	20
<b>Figura 10</b>	Procesos para obtención de energía a partir de biomasa húmeda y seca...21	
<b>Figura 11</b>	Procesos bioquímicos y termoquímicos para procesar biomasa.....	22
<b>Figura 12</b>	Curva de potencia de un panel fotovoltaico.....	38
<b>Figura 13</b>	Regular de voltaje para paneles fotovoltaicos.....	41
<b>Figura 14</b>	Conexión tipo isla.....	42
<b>Figura 15</b>	Sistema eléctrico con conexión modo red.....	43
<b>Figura 16</b>	Variación de la radiación solar período 2015.....	55
<b>Figura 17</b>	Variación horaria de perfiles de radiación mensual .....	57
<b>Figura 18</b>	Variación de la velocidad del viento, período 2015 .....	58
<b>Figura 19</b>	Variación horaria de perfiles de velocidad del viento.....	59
<b>Figura 20</b>	Demanda anual energía eléctrica Fabrica de Balanceado .....	61
<b>Figura 21</b>	Demanda estacional Fabrica de Balanceado.....	62
<b>Figura 22</b>	Temperatura promedio anual en la ciudad de Milagro-Ecuador .....	63
<b>Figura 23</b>	Humedad relativa en la ciudad de Milagro-Ecuador .....	63
<b>Figura 24</b>	Producción diaria por mes de las fuentes eléctricas en día bueno.....	78
<b>Figura 25</b>	Producción diaria por mes de las fuentes eléctricas en día bueno.....	81
<b>Figura 26</b>	Producción por cada fuente en los escenarios 1 y 2 .....	83
<b>Figura 27</b>	Participación de la red eléctrica y las fuentes alternativas en los escenarios 1 y 2.....	83

## Glosario de Términos

**CIP:** Programación de enteros de restricción

$d_t^{edif}$ : El perfil de demanda eléctrica del edificio

**DF:** Demanda facturable mensual

**DHI:** Irradiación horizontal difusa

**DM:** Demanda máxima

**DNI:** Irradiación normal directa

$F_e^{pv}$ : Función de coste fuente fotovoltaica.

$F_e^{aero}$ : Función de coste fuente de aerogenerador.

$F_e^{red}$ : Función de coste fuente de red.

**FF:** Factor de forma de la celda solar

**FGD:** Registrador de demanda horaria

**FGDI:** Factor de gestión de demanda

**FSPEE:** Factura por servicio público de energía eléctrica

**GHI:** Irradiación global horizontal

$i_b$ : La inversión inicial de la batería.

$i_e^{pv}$ : La potencia de cada unidad.

$i_e^{aero}$ : El coste de la inversión inicial aerogenerador.

$i_e^{red}$ : El precio de la potencia contratada.

$I_L$ : Corriente de iluminación en una celda solar

$I_m$ : Tensión máxima de la celda solar

$I_{sc}$ : Corriente de cortocircuito de la celda solar

**kBEP:** Miles de barriles equivalentes de petróleo

**MILP:** Programación lineal entera mixta

**MINLP:** Programación no lineal entera mixta

**nZEB:** Edificios de energía casi nula

**NZEB:** Edificios de energía cero neta

$p_b^{car}$ : El precio eléctrico de carga.

$p_b^{des}$ : El precio eléctrico de descarga.

$p_e^{pv}$ : Producción eléctrica que genera la fuente fotovoltaica a lo largo del día (horas).

$p_e^{aero}$ : El valor que se considera en la producción.

$p_e^{red}$ : El coste del servicio prestado por la red.

**PL:** Programación lineal

**SGDA:** Sistema de generación distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados.

**TWh:** Teravatio hora.

$u_e^{pv}$ : Unidades a instalar de tecnología fotovoltaica.

$u_e^{aero}$ : La potencia de cada sistema.

$u_e^{red}$ : La potencia de cada unidad en control.

$u_b$ : La capacidad de la batería.

$v_e^{aero}$ : La vida útil del aerogenerador.

$v_e^{pv}$ : El costo de inversión de la fuente fotovoltaica.

$v_e^{red}$ : La vida útil de la red.

$v_b$ : La vida útil.

$V_m$ : Tensión máxima en la celda solar

**Voc:** Tensión de circuito abierto de la celda solar

**VPP:** Central energética virtual

$x_e^{pv}$ : Costes variables de la función coste.

$x_e^{aero}$ : La producción del día (horas).

$x_e^{red}$ : La producción del día (horas).

$x_b^{des}$ : La potencia de descarga de la batería.

$x_b^{car}$ : La potencia de carga de la batería.

$z_e^{pv}$ : Costes fijos de la función coste.

$z_e^{aero}$ : Unidades a instalar de aerogeneradores.

$z_e^{red}$ : Unidades de red a contratar.

$z_b$ : El número de baterías a instalar.

**ZEB:** Edificios de consumo cero

## Resumen

El presente trabajo se basa en la gestión óptima de diferentes fuentes de generación eléctrica para reducir los costos por consumo eléctrico, el algoritmo de optimización es MILP (Programación lineal entera mixta), que incorpora fuentes tradicionales como la red eléctrica y fuentes alternativas solar, eólica y caldera de biomasa, se incorporan baterías para almacenar los excedentes de energía. El perfil de demanda eléctrica se obtuvo de una fábrica de balanceado ubicada en Milagro-Guayas, los perfiles solar y eólico se obtuvieron de una estación meteorológica ubicada en la Universidad Estatal de Milagro. Los parámetros de vida útil, costos de inversión y producción se obtuvieron de estudios preliminares. Se analizaron dos escenarios, día bueno y día malo para los perfiles solar y eólico. En ningún caso el algoritmo instala fuente eólica, debido a que la velocidad promedio del viento en Milagro es 1.5m/s y se requiere 3 m/s en adelante para generar.

En el día bueno, el algoritmo indicó que se deben instalar 164 unidades de potencia de paneles fotovoltaicos, 2 unidades de calderas de biomasa, 64 unidades de la red y 8 unidades de baterías. De marzo a septiembre se obtiene mayor generación de electricidad mediante los paneles fotovoltaicos, llegando a 0 el consumo de la red eléctrica en intervalos durante el día, la caldera de biomasa genera electricidad en los intervalos donde no hay generación eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos.

En el día malo, se deben instalar 59 unidades de potencia de paneles fotovoltaicos, 2 unidades de caldera y 72 unidades de red eléctrica, no se instalan unidades de baterías.

En ambos escenarios se observó que el consumo de la red disminuyó al generar con fuentes alternativas que tienen menor costo de producción que la red eléctrica y menor impacto en el medioambiente.

**Palabras clave:** Gestión energética, MILP, energía solar, energía eólica, biomasa.

## Abstract

The present work is based on the optimal management of different sources of electricity generation to reduce costs for electricity consumption, the optimization algorithm is MILP (Mixed Integer Linear Programming), which incorporates traditional sources such as the electrical network and alternative sources solar, wind and biomass boiler, batteries are incorporated to store excess energy. The electricity demand profile was obtained from a balancing factory located in Milagro-Guayas, the solar and wind profiles were obtained from a meteorological station located at the Milagro State University. The parameters of useful life, maintenance and production costs were obtained from preliminary studies. Two scenarios were analyzed, a good day and a bad day for the solar and wind profiles. In none of the cases does the algorithm install a wind source, because the average wind speed in Milagro is 1.5m/s and 3m/s is required to generate.

On the good day, the algorithm indicated that 164 power units of photovoltaic panels, 2 units of biomass boilers, 64 units of the network and 8 units of batteries should be installed. From March to September, a greater generation of electricity is obtained through the photovoltaic panels, reaching 0 the consumption of the electrical network at intervals during the day, the biomass boiler generates electricity in the intervals where there is no electricity generation by the photovoltaic panels.

On the bad day, 59 photovoltaic panel power units, 2 boiler units and 72 grid power units must be installed, no battery units are installed.

In both scenarios, it was observed that the consumption of the network decreased when generating with alternative sources that have a lower production cost than the electricity network and less impact on the environment.

**Keywords:** Energy management, MILP, solar energy, wind power, biomass.

# CAPÍTULO 1

## 1.1 Introducción

La sostenibilidad ambiental ha pasado como prioridad a marcar la agenda económica, política y empresarial a nivel mundial. En vista de que estamos inmersos en la cuarta revolución industrial y que los datos se consideran el petróleo del siglo XXI, los sectores eléctricos, de comunicaciones y transporte están desvinculándose de los combustibles fósiles con el propósito de disminuir las emisiones que provocan el calentamiento global.

Los estados con el propósito de hacer frente al cambio climático, están implementando normativas para incentivar el uso de recursos renovables con fines energéticos para reducir el uso de combustibles fósiles y otras fuentes de energías no renovables que alteran los ecosistemas y destruyen la capa de ozono. El sector eléctrico se ha comprometido a tener cero emisiones antes de 2050, la tendencia del mundo está a la electrificación y la descarbonización, la clave para ello está en la generación distribuida donde cada edificio produce su propia energía y el excedente pueda inyectar a la red, además se reducen las pérdidas por transporte al no tener que recorrer grandes distancias desde las centrales eléctricas hasta los consumidores.

La energía eléctrica puede ser generada mediante tecnologías renovables, mejorar su capacidad de almacenamiento, que exista flexibilidad en el transporte, distribución y consumo. Se estima que para el 2040 el 40% de la necesidad energética global (Prysmian, 2020), será cubierta por la energía eléctrica y los edificios están en el centro de este sistema porque reúnen las características del modelo energético sostenible en un mismo centro de consumo.

En el campo de la construcción existen nuevas regulaciones para exigir que los nuevos edificios residenciales, comerciales e industriales cumplan con el requisito de cero emisiones (Prysmian, 2020), para ello deben reducir la demanda energética y cubrir con energías renovables parte de ella o la totalidad.

Las construcciones futuras de edificios irán incorporando de forma progresiva, software que impulsa la digitalización de la construcción, el IoT, sensores inteligentes, sistemas nanointegrados para tomar datos, el Big Data para analizar la información proveniente de los datos y realizar ajustes automáticos. Dentro de poco la domótica tendrá una nueva generación de sistemas inteligentes que serán accesibles en todo tipo de hogares. Sin las evoluciones tecnológicas no habría transición energética.

El cambio a la edificación 4.0 es un reto que conlleva algunos aspectos como: consumir menos recursos, generar menos emisiones y residuos, incorporar sistemas más eficientes y reducir los costos de las edificaciones.

El objetivo de la edificación sostenible es optimizar los recursos naturales y los elementos estructurales del edificio para minimizar el impacto de los mismos en usuarios y su entorno. En la edificación sostenible uno de los factores de mayor análisis es de optimización del consumo energético, sin dejar de lado el confort de los usuarios (Castilla Nieto, 2016).

Con la creciente penetración de los recursos de energías renovables como: solar, eólica, biomasa, etc. es necesaria la implementación de sistemas de gestión de energía para combinar de forma óptima la energía de la red, las fuentes renovables y almacenamiento, todo esto con el propósito de reducción del consumo energético y ahorro en el pago de la planilla eléctrica. Estos sistemas son multivectoriales, se requiere de algoritmos sofisticados y software para implementación de optimización multiobjetivo.

En el presente trabajo se realiza el estudio de la optimización del consumo energético en un edificio mediante generación distribuida con un mix de fuentes de energía renovable como solar, eólica y biomasa, para ello se utiliza el algoritmo de programación lineal entera mixta (MILP).

En el capítulo 1 se detallan los objetivos de la investigación, alcance y limitaciones, tipos de generación eléctrica, balance energético, tipos de demanda eléctrica, fuentes de energía renovables y no renovables, se analizan en detalle cada uno de los componentes de un sistema solar fotovoltaico, componentes de un aerogenerador, distintas fuentes de biomasa, los precios de la electricidad en

Ecuador. Se describen también algunas normativas para instalaciones eléctricas que utilizan energías alternativas.

En el capítulo 2 se obtienen los perfiles de demanda, solar y eólico, los datos de clima promedio en el lugar donde se realiza el estudio y se definen las funciones de coste y restricciones de la parte térmica y eléctrica, los equipos a utilizar y los parámetros de entrada correspondientes a los costos fijos y variables de cada tecnología a utilizar en el mix de generación.

En el capítulo 3 se describen los resultados obtenidos, las potencias a instalar por cada fuente y la generación que se obtuvo por cada una de ellas haciendo uso de graficas con regiones sombreadas que permiten una mejor lectura del aporte de cada fuente.

## **1.2 Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar un modelo de optimización del consumo energético en un edificio mediano aplicando el algoritmo MILP

### **Objetivos específicos**

- Definir los tipos de energías renovables a aplicar en el mix de generación distribuida y sus componentes.
- Obtener los perfiles de demanda eléctrica, perfil solar y eólico.
- Investigar los costos de inversión, operación y mantenimiento de las tecnologías a utilizar en el algoritmo de optimización.
- Realizar la programación del algoritmo MILP en Matlab
- Analizar los resultados del modelo de optimización.

## **1.3 Alcances y Limitaciones**

El presente trabajo tiene como alcance realizar el estudio de la aplicación de diferentes fuentes de energías renovables para reducir el consumo energético de la red en un edificio mediano. Los cálculos de costos y fuentes de energía a emplear se realizan mediante el algoritmo de programación lineal de enteros mixtos (MILP). Con la implementación del algoritmo de optimización se realiza el

análisis de los resultados obtenidos y cuál es la mejor combinación de mix de energías a utilizar para la reducción de costos por demanda eléctrica de la red. Este estudio servirá como base para implementación de tecnologías que aprovechan recursos renovables para la generación de energía, destacando los beneficios para el medioambiente, reducción de costos y cumplir normativas para nuevas edificaciones que requieren de materiales y tecnologías que aumenten la eficiencia eléctrica.

Entre las limitaciones están los valores máximos de generación eléctrica con fuentes renovables que establece la normativa del ARCONEL, en el sector comercial e industrial se puede generar hasta 1000kW. Otra de las limitaciones es el espacio disponible en la edificación para la instalación de equipos que aprovechan la energía del sol y del viento. También se debe considerar que las condiciones climáticas son muy variables y de esto depende la cantidad de energía que se genera, por último, están los costos iniciales que se requieren para llevar a cabo una instalación de este tipo.

#### **1.4 Planteamiento Hipotético**

Como se trata de un problema de optimización de costos de energía eléctrica, las preguntas que se plantean como hipótesis en la investigación son:

- ¿Existirán las condiciones ambientales adecuadas en la ciudad de Milagro-Guayas para tener producción de energías con fuentes alternativas y que satisfagan el perfil de consumo de la instalación?
- ¿Cuáles son los costos de inversión, operación y mantenimiento asociadas con la generación mediante energías renovables y de la red eléctrica?
- ¿Será que los costos de producción con energías renovables no serán rentables y el algoritmo indicará que se debe instalar únicamente la energía proveniente de la red eléctrica?
- ¿Cuántas y qué tipos de fuentes indicará el algoritmo que se deben instalar?

## **1.5 Marco Teórico**

### **1.5.1 Edificios de consumo cero.**

La Agencia Internacional de Energía indica que el 40% de la energía mundial es consumida por los edificios y producen el 33% de emisión de gases de efecto invernadero (D'amanzo, 2020). Para reducir este impacto surgen los edificios de consumo energético nulo ZEB, con mirada en la arquitectura sustentable y cambio en la forma de construir. Estos edificios responden a reducir el balance energético entre generación y demanda produciendo ahorro energético. Uno de los propósitos de reducir el consumo energético, es debido a que algunas fuentes primarias de energía usan combustibles fósiles y recursos no renovables, esto ocasiona emisión de gases que provocan el efecto invernadero, otro propósito es el ahorro económico en el pago de la planilla mensual por consumo eléctrico.

Existen tres denominaciones para edificios de consumo cero: edificios de consumo cero (ZEB), edificios de energía cero neta (NZEB) y edificios de energía casi nula (nZEB).

Los edificios de consumo cero (ZEB) poseen tecnología para bajo o nulo consumo de energía de la red eléctrica. Utilizan fuentes de energía renovables para su funcionamiento y en el caso de los edificios autónomos dependen exclusivamente de ellas. La energía se distribuye de acuerdo al tipo de cargas y si se producen excedentes pueden inyectarse a la red o almacenarse en bancos de baterías para posterior consumo.

Los NZEB poseen características similares que los ZEB con baja demanda de energía de la red y producción de energía mediante fuentes renovables, una de las características de estos edificios es el balance energético nulo que se mide en un periodo de un año.

En los edificios de consumo energético casi nulo (nZEB) se analizan estrategias bioclimáticas que permitan aumentar la eficiencia en sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (Soto Barrionuevo, 2019). Es importante satisfacer los requerimientos de confort de los usuarios en los sistemas de climatización de forma que se garantice calidad de aire al interior. Un nZEB utiliza diferentes medios y/o tecnologías para reducir el consumo energético. El

indicador que mide la demanda de energía primaria en una edificación se expresa en kWh/m<sup>2</sup> año.

Las tecnologías que se aplican para un edificio de consumo cero ZEB son:

1. **Tecnologías pasivas y de conservación de energía:** Diseño de envolvente, orientación, sistemas de ventilación natural, sombreado, materiales de cambio de fase, espacios bajo tierra.
2. **Eficiencia energética:** Sistemas de climatización, calefacción, automatización de accionamiento de equipos.
3. **Generación de energía:** aprovechamiento de fuentes renovables como fotovoltaica, eólica, biomasa, etc. para cubrir parte o la totalidad de la demanda del edificio

En el modelo de edificios de energía casi nula (nZEB) juegan un papel importante las fuentes de energía locales (generación, almacenamiento y gestión de carga), la automatización de edificios y la monitorización electrónica de los sistemas técnicos de edificación (Martirano, Habib, Giuseppi, & Di Giorgio, 2018). El modelo (nZEB) con su micro-red inteligente, permite implementar estrategias de gestión del lado de la demanda. Las principales políticas de gestión del sistema de control de energía son:

1. **Ahorro económico:** con el fin de operar con tarifa eléctrica de bajo costo.
2. **Energía:** para alertar al usuario si el consumo de energía cumple o no con el objetivo de consumo máximo mensual.
3. **Potencia:** definir un límite inferior a la potencia contractual.
4. **Almacenamiento térmico:** para aprovechar la inercia térmica del sistema.

El 40% de la demanda de energía en un edificio corresponde a los equipos de climatización (Soto Barrionuevo, 2019), por ello es importante el diseño de la edificación para aprovechar magnitudes físicas de temperatura y presiones, diseño óptimo de envolventes, elección adecuada de materiales de construcción. Una alternativa para la climatización es la ventilación natural, que circulen corrientes de aire para desplazar el aire caliente e introducir el aire más frío por ello es importante analizar la dirección del viento al realizar el diseño de la

edificación. Otra estrategia de climatización es la ventilación controlada de apertura de ventanas, puertas y respiraderos. Para la circulación de aire en la edificación se puede utilizar tuberías enterradas 2-3 metros bajo tierra y así mantener la temperatura constante. Los materiales de construcción para un edificio de consumo cero se diseñan con tecnología de micro-cápsulas fabricadas con cera, parafina y otros materiales de punto de fusión bajo. Finalmente se realiza el diseño de la envolvente del edificio que controla la radiación solar que provoca ganancia de calor interna, para la envolvente del edificio se considera orientación, forma, voladizos, persianas, aleros y auto-sombreado, así como barreras de calor radiante que no permiten la entrada de calor por reflexión al interior.

Todos estos edificios no sólo tienen como propósito conseguir un balance energético nulo entre generación y demanda, sino también reducir el consumo de agua y desechos, disminuyendo así la huella de carbono. También buscan mejorar la calidad de aire al interior y aumentar la eficiencia en variables como temperatura, humedad e iluminación con materiales de construcción adecuados.

La conexión de edificios ZEB, NZEB y nZEB es en modo red o generación distribuida, cuando la energía no es suficiente para cubrir la demanda, se toma de la red externa. En algunos casos se instalan bancos de baterías para almacenar excedentes de energía, pero se deben analizar los costos y tipos de cargas antes de decidir si la instalación contará o no con banco de baterías.

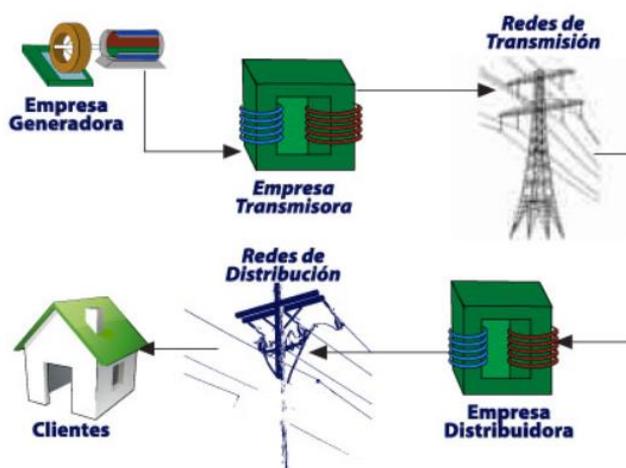
En los edificios inteligentes se habla de Central energética virtual (VPP), que es un nuevo concepto de gestión energética con la ayuda de tecnología (Internet de las cosas), para enlazar diferentes fuentes de energía en un flujo de demanda eléctrica. La descentralización del suministro eléctrico se realiza a través de microrredes, las viviendas y edificios no sólo producen su propia energía, sino que la almacenan e inyectan a la red. Quién se encarga de hacer dicha gestión es la microrred, que une todas las plantas renovables en un único punto. El software remoto se encarga de regular el consumo de energía mediante la conexión de generadores de energía descentralizada, almacenaje y carga controlada. Los edificios inteligentes deben poseer contadores de energía bidireccionales, monitoreo de demanda horaria, dispositivos de automatización y control de cargas como equipos de climatización, electrodomésticos,

iluminación, bancos de baterías, puntos para recargar vehículos eléctricos y redes de comunicación. Con estos dispositivos las tecnologías como el IoT, Big Data y algoritmos de optimización, se integran para la gestión energética.

### 1.5.2 Generación Eléctrica.

Figura 1

*Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.*



Fuente: (Edeeste, 2022)

#### Generación de electricidad

La generación de electricidad se realiza en las centrales que transforman la energía (hidráulica, térmica, solar, eólica, biomasa, nuclear, etc.) en energía eléctrica mediante generadores eléctricos y turbinas.

El sector eléctrico en el Ecuador ha venido desarrollando su infraestructura para garantizar un servicio de calidad, continuidad y seguridad adecuadas, priorizando las fuentes de energías renovables, energía térmica eficiente. La principal fuente de energía eléctrica en el Ecuador son las centrales hidroeléctricas.

#### Transmisión y distribución de energía

La red de transporte de energía eléctrica está constituida por los elementos que permiten llevar la electricidad de los puntos de generación hasta los puntos de consumo a grandes distancias con altos valores de voltaje. Para transportar la

energía de las centrales de generación de forma técnica y eficiente se utilizan líneas de 500kV, 230kV y 138kV (MERN, 2020).

Para medir la calidad del servicio se utilizan indicadores como la frecuencia media de interrupciones (FMIk) y el tiempo total de interrupciones (TTIk). La cobertura del servicio eléctrico en el Ecuador en el año 2018 alcanzó el 97.05% y se ha reducido el índice de pérdidas.

La red de distribución eléctrica tiene como función el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales.

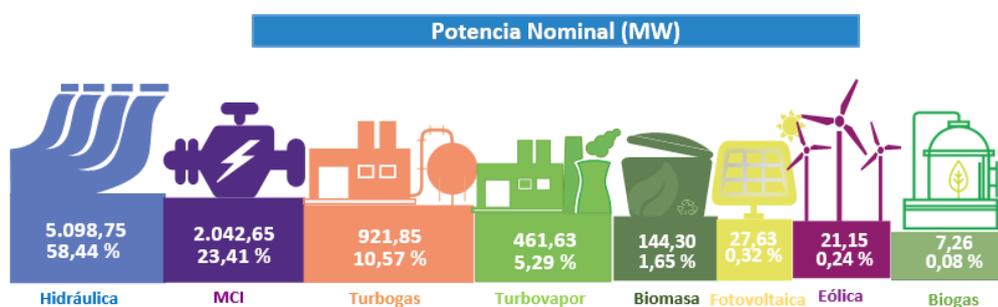
### 1.5.3 Balance Neto Energético

#### Capacidad instalada para generación eléctrica

En el año 2021 la capacidad instalada existente en el país tuvo una participación del 58,44% de hidroeléctricas, 39,27% de térmicas y 2,29% distribuido entre plantas de otras energías renovables.

**Figura 2**

*Capacidad instalada para generación de electricidad en Ecuador*



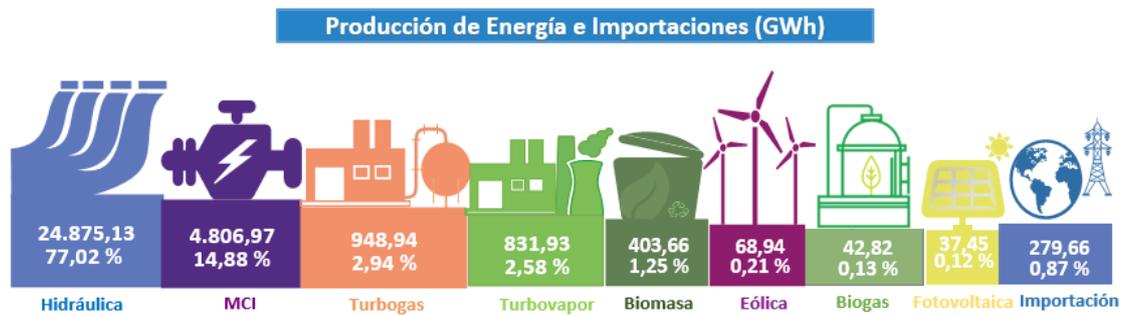
*Fuente: (BNEE, 2021)*

#### Oferta de electricidad

La oferta de energía eléctrica en el Ecuador en el 2020 fue de 31,499GWh, de los cuales el 77.3% fue aporte de hidroelectricidad, 20.1% de fuentes térmicas y 1.8% de otras fuentes de energías alternativas como eólica, biogás, biomasa y solar (MERN, 2020).

**Figura 3**

*Producción de energía eléctrica en Ecuador por diversas fuentes*



Fuente: (BNEE, 2021)

Los principales consumidores de electricidad fueron los sectores: residencial, industrial y comercial para el año 2021 se obtuvieron los porcentajes que se muestran en la figura 4.

**Figura 4**

*Facturación de energía eléctrica en el Ecuador*



Fuente: (BNEE, 2021)

### **Energía renovable no convencional**

Para el año 2020 el bagazo de caña y la leña constituyeron el principal aporte para producción de energías renovables, obteniendo un total de 2230 kBEP (MERN, 2020). De los 1.6 millones de toneladas de bagazo de caña, el 74.9% fue para uso industrial y el 25.1% para generación de electricidad. El uso de leña como fuente de energía primaria se redujo en un 3.6% comparado con el año 2019 y el uso de energías renovables se incrementó en 2.5%. La producción para el año 2020 de energía: eólica, solar y biogás fue de 231kBEP.

## 1.5.4 Sistemas de Generación Eléctrica

### Tipos de Generación

**Generación centralizada:** En este tipo de generación existen grandes centrales producción de energía como (carbón, hidráulicas, térmicas, gas, etc.) estas vierten a las redes de transporte y distribución hasta llegar a los consumidores, el flujo de energía es unidireccional desde plantas generadoras hasta consumidores. La desventaja de este tipo de generación son las grandes pérdidas por transportación, debido a que la energía recorre grandes distancias hasta llegar a los usuarios.

#### Figura 5

*Generación de electricidad centralizada*



*Fuente: (Endesa, 2020)*

**Generación distribuida:** Se trata de un conjunto de sistemas de generación de energía que se encuentran dentro de las redes de distribución, son de potencia pequeña y cercanos al punto de consumo, lo que reduce notablemente las pérdidas por transportación. En este tipo de instalaciones el usuario hace uso de recursos renovables como el viento, sol, biomasa, etc. para producir energía eléctrica que consumirá en su inmueble, esta energía reduce la factura de consumo mensual y si produce más energía que la que consume puede inyectar a la red y tener como saldo para el mes siguiente.

## Figura 6

### Generación distribuida en modo red



Fuente: (SuriaEnergy, 2021)

Se estima generación distribuida, a la energía eléctrica proporcionada por medio de fuentes de energías renovables en el punto de uso y por los usuarios que están conectados a la red eléctrica de distribución (Navntoft et al., 2019).

### Tipos de generación distribuida

- **GD Incrustada:** El sistema solo se utiliza para distribución local de la red.
- **GD no despachada centralmente:** El sistema no se somete a despacho ni a control

### Aplicaciones de la Generación Distribuida

La aplicación de las tecnologías va a depender de lo que requiera el usuario.

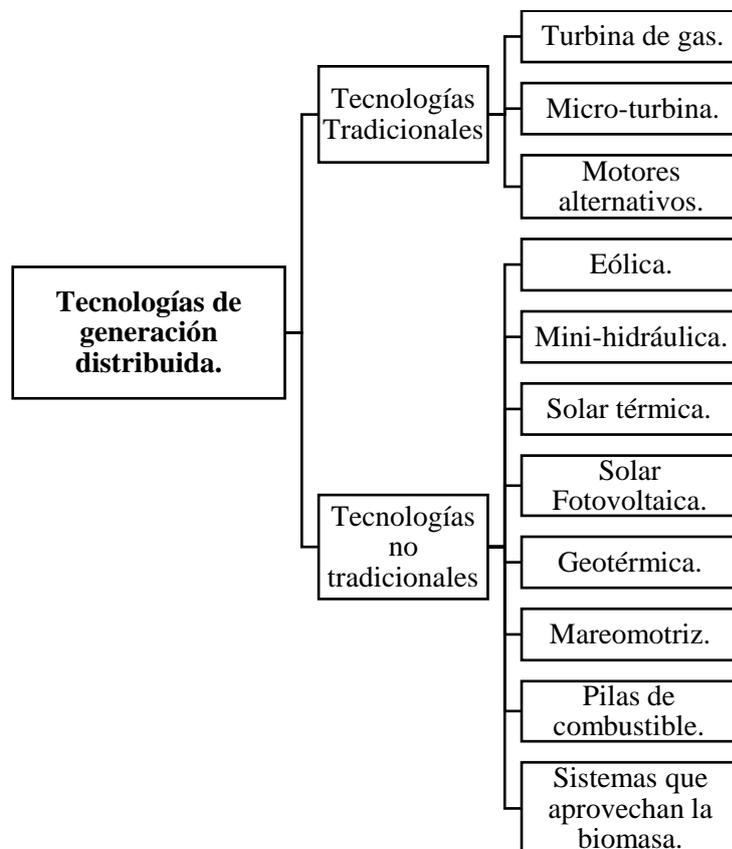
- **Carga base.** Es utilizada para producir energía eléctrica continua; funciona igual con la red de distribución; pudiendo recibir o vender parte de la energía, y usar la red para respaldarse y hacer mantenimiento.
- **Despacho de carga en punta.** Se usa para proporcionar electricidad durante las horas pico, lo que reduce la demanda máxima de los consumidores, durante esta demanda los costos de energía son más altos.

- **Generación aislada o remota.** El arreglo se utiliza para generar energía eléctrica en modo autónomo, ya que no es posible desde la red eléctrica (sistema aislado o falta de capacidad del recurso).
- **Soporte a la red de distribución.** Ocasionalmente la empresa eléctrica tiene que fortalecer su red realizando la instalación de plantas pequeñas, incluyendo la subestación de potencia, por la gran demanda en ciertas épocas del año o simplemente por fallas en la red.
- **Almacenamiento.** Esta alternativa se puede considerar cuando la tecnología utilizada es rentable, hay apagones frecuentes o se dispone de fuentes de energía renovable.

### Tecnologías de Generación Distribuida.

Figura 7

*Tecnologías para generación de electricidad*



Fuente: (Gomez, 2018)

### **1.5.5 Energía Convencional**

#### **Energía del Carbón**

El carbón es el principal combustible fósil, su origen se debe a la transformación de masas de vegetación subterránea y sufre procesos de descomposición anaeróbica. La mayor parte del carbón se produjo hace más de 300 millones de años, con las mayores reservas de carbón en América del Norte, Rusia, China y Europa. Para el año 1950 el carbón cubría el 60% de la demanda energética mundial, ahora esta se ha reducido a la mitad

Uno de los grandes problemas que plantea el uso de carbón como fuente de energía es la contaminación ambiental, por lo que se está investigando métodos para transformar el carbón en combustible líquido o gaseoso.

El carbón se utiliza para generar calor y mediante este evapora agua que impulsa una turbina y transformar a energía mecánica, también se utiliza para fundir hierro en hornos y obtener diversos productos para la industria química. (Carta, Calero, & Colmenar, 2009).

#### **Energía del Petróleo y Gas Natural**

Es el combustible fósil más utilizado, es la principal fuente de energía, aunque está disminuyendo su participación. El petróleo es formado por organismos microscópicos como el plancton depositado en el fondo del mar, así como los residuos de animales y plantas muertas que forman lodos en la profundidad del mar (Carta, Calero, & Colmenar, 2009). La aparición de bolsas de petróleo requiere condiciones geológicas precisas para su formación.

El petróleo se utiliza para producir calor, vaporizar agua, mover turbinas y convertirlo en energía mecánica, también se utiliza para impulsar tierra, mar y aviación, y en menor medida para calefacción y en industrias que requieren energía térmica. Del petróleo se obtienen compuestos químicos para producir plásticos, medicinas, fibras, etc. Se produce gas para consumo doméstico y vapor para mover turbinas que generan electricidad. Se estima que las reservas de petróleo se agotarán en 40 años.

Con respecto al potencial energético (Carta, Calero, & Colmenar, 2009)

1 kg de petróleo equivale a 11kWh o 3960kJ

1000 m<sup>3</sup> de gas natural son el equivalente a 900 kg de petróleo

Las mayores reservas de **gas natural** están en países de oriente medio denominados como conflictivos lo cual dificulta el transporte a través de grandes gasoductos. El gas natural es un combustible conveniente y limpio debido a que sólo genera residuos de dióxido de carbono y agua.

### **1.5.6 Energía Alternativa**

#### **Energía Hidráulica**

La energía potencial contenida en aguas a diferentes alturas sobre la tierra, se transforma en energía cinética cuando el agua se precipita a zonas más bajas. La energía del agua contenida en estas condiciones es la energía hidráulica, que es una fuente de energía renovable y se origina a partir de la evaporación del agua por acción de la energía solar

La energía potencial del agua se transforma en energía cinética, esta energía mueve una turbina hidráulica transformando a energía mecánica, la turbina tiene acoplado un generador eléctrico que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009) indica que 1 tonelada de agua situada a 10 metros de altura tiene una energía de 278kWh.

En el Ecuador, la energía hidráulica aporta con el 77% de la oferta de energía eléctrica.

#### **Energía Solar**

Es la energía procedente del sol, de la cual el 30% es reflejada por la atmósfera y el 70% llega a la superficie de la tierra es un tipo de energía renovable con diferentes formas de captación y aprovechamiento. La energía que no experimenta cambios sensibles al atravesar la atmósfera se denomina energía solar directa y es la que provee a los seres vivos de luz y calor.

Los métodos de aprovechamiento de la energía solar son: térmicos y fotovoltaicos. El primer tipo de energía se aprovecha para calentar aire, agua y

otras sustancias. El segundo tipo de energía se utiliza para convertir la energía solar en energía eléctrica mediante células solares.

La energía que llega del sol es de 1.559.280 TWh en un año, sólo el 1% son utilizables. La potencia solar que se aprovecha en la tierra está por encima de los 1.000 TW.

### Radiación solar

La radiación solar sobre la superficie terrestre depende del lugar geográfico, mes, hora del día. Esta radiación puede ser absorbida o redireccionada cuando atraviesa la atmósfera. La irradiación normal directa (DNI) es la radiación que atraviesa sin interacción con la atmósfera, la irradiación horizontal difusa (DHI) es la redireccionada por la atmósfera o reflejada por la superficie de la tierra.

La irradiación global horizontal (GHI) se define en la ecuación 1.

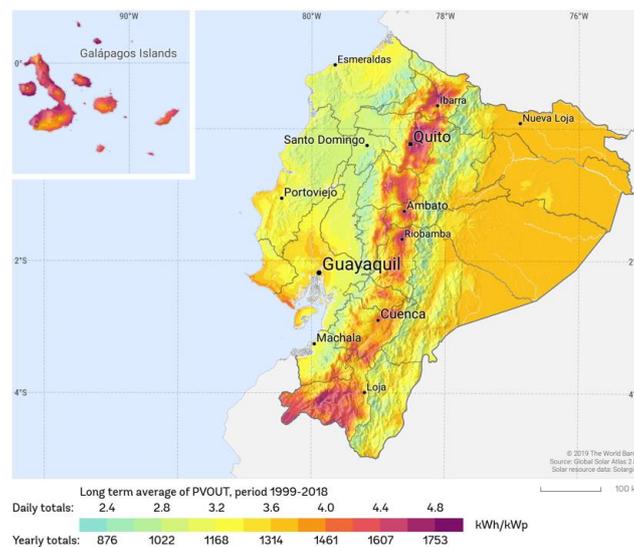
$$GHI = DHI + DNI * \cos(\theta) \tag{1}$$

### Mapa de radiación solar del Ecuador

De acuerdo al Atlas solar del Ecuador para Generación Eléctrica, el valor promedio de insolación difusa es de 2737,05 Wh/m<sup>2</sup>/día, la insolación directa promedio es 2543,01 Wh/m<sup>2</sup>/día y la insolación global promedio de 4574,99 Wh/m<sup>2</sup>/día.

### Figura 8

Mapa de radiación solar Ecuador



Fuente: (CONELEC, 2008)

## Energía Eólica

La energía eólica llamada también energía cinética del viento, se produce por medio de la fuerza del viento usada para generar corriente. Su punto de partida viene de la tierra en masas de aire a varias temperaturas, causadas por distintas magnitudes de radiación solar, produciendo corrientes descendentes y ascendentes. (Carta, Calero, Colmenar, et al., 2009)

Se considera una energía renovable y consiste en convertir la energía del viento en energía mecánica a través del movimiento de una turbina eólica. No es posible quitar completamente la energía que existe en una corriente de aire debido a la Ley de Betz. La energía mecánica se puede convertir en energía potencial o en energía eléctrica mediante una máquina generadora de electricidad unido a una turbina.

El potencial energético del viento depende de algunos factores como hora del día, topografía, día del año y localización geográfica. Con una corriente de viento con velocidad promedio de 8 m/s se extrae 2.800 KWh por m<sup>2</sup> y año. Con velocidad de viento de 13 m/s en una superficie de 150m<sup>2</sup> se obtiene una potencia de 198kW.

**Tabla 1**

*Uso de la energía eólica según la velocidad del viento.*

<b>RANGOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 m DE ALTURA</b>	<b>POSIBLE DE USO DE LA ENERGÍA EÓLICA</b>
Menos de 3 m/s	En este rango no es factible la generación de electricidad con aerogeneradores a no ser que se pueda evaluar de mejor forma los recursos.
Entre 3 y 4 m/s	Sería una buena opción para equipos de bombeo eólico, no es muy posible generar electricidad con equipos eólicos.
Entre 4 y 5 m/s	Aerobombas son económicamente competitivas para los equipos diesel, son posible la aerogeneración con sistemas automatizados.
Entre 5 y 6 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración con sistemas autónomos.
Más de 6 m/s	Posible para aerogeneración y aerobombeo con sistemas autónomos y sistemas que se encuentre con la conexión de una red eléctrica.

*Fuente: (Mendoza Uribe, 2018)*

## Aerogeneradores

Una turbina eólica (aerogenerador) es un tipo de máquina que tiene una serie de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos y estructurales que permiten la conversión de la energía cinética del viento en energía eléctrica.

### **Componentes de los aerogeneradores**

**Subsistema de captación.** – Transforma la energía cinética en energía mecánica, la conversión de energía se realiza por medio del rotor que está compuesto por paletas y bujes. El eje del rotor va en forma vertical. Una pala es un dispositivo que convierte la energía eólica en el par necesario para generar energía útil. El buje conecta la hoja al sistema de transmisión principal y al resto del sistema de energía.

**Subsistema de transmisión mecánica.** – Las turbinas tienen árboles de baja velocidad o árbol del rotor. Los acoplamientos conectan los árboles y estos se instalan entre el árbol principal y caja de engranajes que reduce la velocidad para evitar que las palas alcancen velocidades supersónicas en los extremos libres. Los reductores utilizados en las turbinas eólicas son engranajes planetarios y engranajes de eje paralelo.

**Subsistema de generación eléctrica.** – Incluye todos los dispositivos para la conversión de energía mecánica en energía eléctrica como el alternador, este elemento puede ser síncrono o asíncrono. El generador asíncrono más empleado es el de jaula de ardilla porque requiere bajos niveles de mantenimiento, también se fabrica en rotor devanado. Para crear el campo de excitación del estator se requiere que el generador asíncrono tome energía de la red, mientras que el generador síncrono requiere de un campo magnético giratorio para realizar la conversión de energía, este campo se crea mediante imanes permanentes.

**Subsistema de orientación.** – El rotor debe estar perpendicular a la dirección del viento. Existen dos sistemas de orientación: activa y pasiva. Los sistemas de orientación activa poseen un sistema de actuación de tipo eléctrico o hidráulico para posicionar el rotor en función de la dirección del viento, la opción preferida en este tipo de orientación es mediante motor-reductor. Los orientadores pasivos son elementos mecánicos que se posicionan aprovechando sus propias fuerzas aerodinámicas.

**Subsistema de regulación.** – Se encargan de hacer el enlace de todos los dispositivos para obtener un funcionamiento óptimo es decir lograr una mejor captación del viento, mejorar la potencia eléctrica y garantizar la seguridad de operación.

**Subsistema de soporte.** – Está formado por la góndola y la torre. La góndola es la base de acero donde se monta el aerogenerador y la torre eleva el nivel del rotor con respecto al nivel del suelo.

### **Curva de potencia de un aerogenerador**

La curva de potencia de un aerogenerador representa la potencia eléctrica teórica producida por la turbina eólica a diferentes velocidades del viento. Estas curvas son proporcionadas por el fabricante de la turbina eólica, por lo tanto, el valor de generación de energía preciso del valor de la velocidad del viento no siempre está disponible. (Rodríguez, 2019)

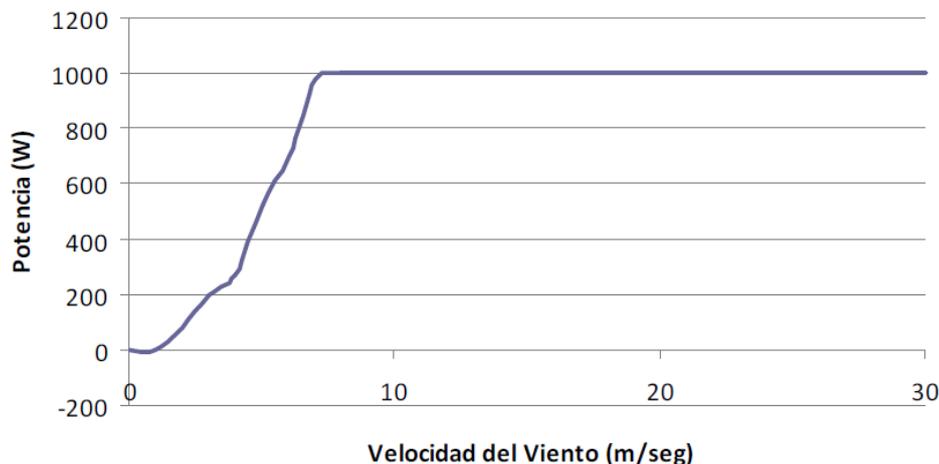
La curva de potencia se basa en mediciones en un laboratorio o en un área de prueba de turbulencia de baja intensidad, así como en la falla directa de los aerogeneradores aguas arriba.

El concepto de curva de potencia del aerogenerador se aplica al modelado de eficiencia de aerogeneradores, en el que se considera la influencia de la potencia generada por la velocidad del viento. Un conjunto de modelos de parámetros se utiliza ampliamente, como regresión polinomial, exponencial, etc. La principal razón para aplicar estos modelos a este tipo de datos es la forma de la curva, y la aplicación del análisis de regresión es muy sencilla.

El rendimiento de los aerogeneradores varía según diferentes variables. Por ejemplo, temperatura, densidad del aire, configuración de la turbina eólica en terrenos rigurosos.

**Figura 9**

*Curva de potencia de aerogenerador Smarttister ST-10000*



*Fuente: (Smarttwister, 2022)*

### **Energía de la Biomasa.**

La biomasa es un grupo de sustancias orgánicas renovables derivadas de plantas o animales, derivadas de su transformación natural o artificial. Cualquier tipo de biomasa es el resultado de la fotosíntesis de las plantas, que utiliza la energía del sol para sintetizar sustancias a partir del dióxido de carbono del aire y otras sustancias simples.

La biomasa desde el punto de vista de aprovechamiento energético se caracteriza por tener bajo contenido de carbono, alto contenido de oxígeno y compuestos volátiles. El poder calorífico de la biomasa depende de la humedad y el tipo de biomasa, por esa razón estos valores se dan en base seca o en base húmeda.

Para los residuos ligno-celulósico el poder calorífico de la biomasa oscila entre 3000-3500 kcal/kg, para los residuos urbanos entre 2000-2500kcal/kg y 1000kcal/kg para los combustibles líquidos que provienen de cultivos energéticos (Coordinación de Energías Renovables, 2008).

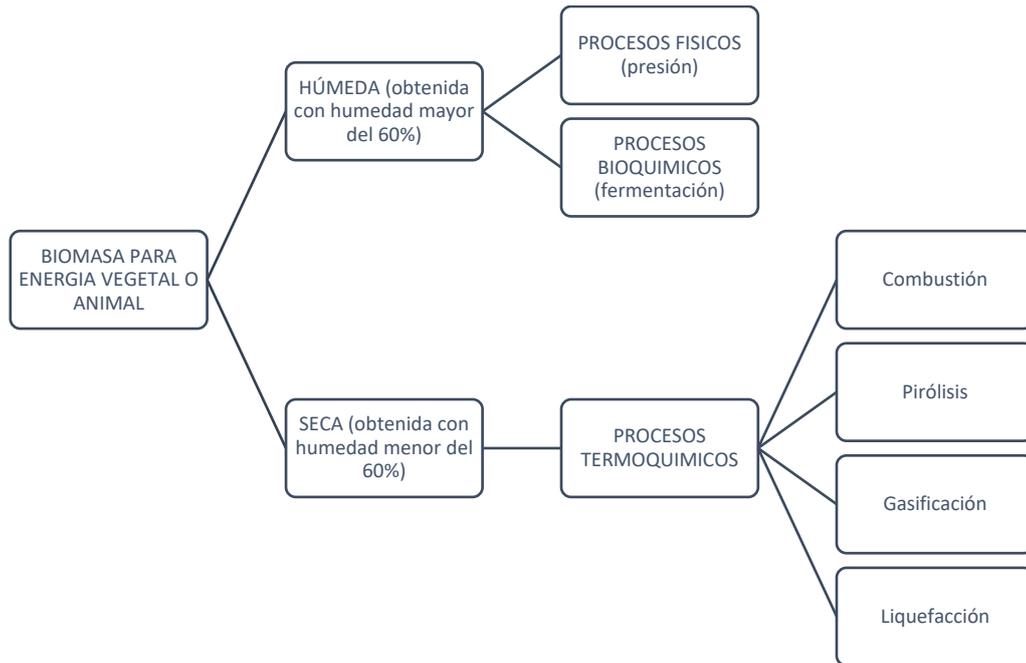
El aprovechamiento energético de la biomasa no provoca el aumento de gases de efecto invernadero debido a que es neutro el balance de emisiones de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> generado por la combustión es reabsorbido por las plantas para su

fotosíntesis, al contrario de los combustibles fósiles cuyo carbono queda presente en la atmosfera.

Resulta conveniente dividir en dos grupos a la biomasa desde el punto de vista energético.

**Figura 10**

*Procesos para obtención de energía a partir de biomasa húmeda y seca.*



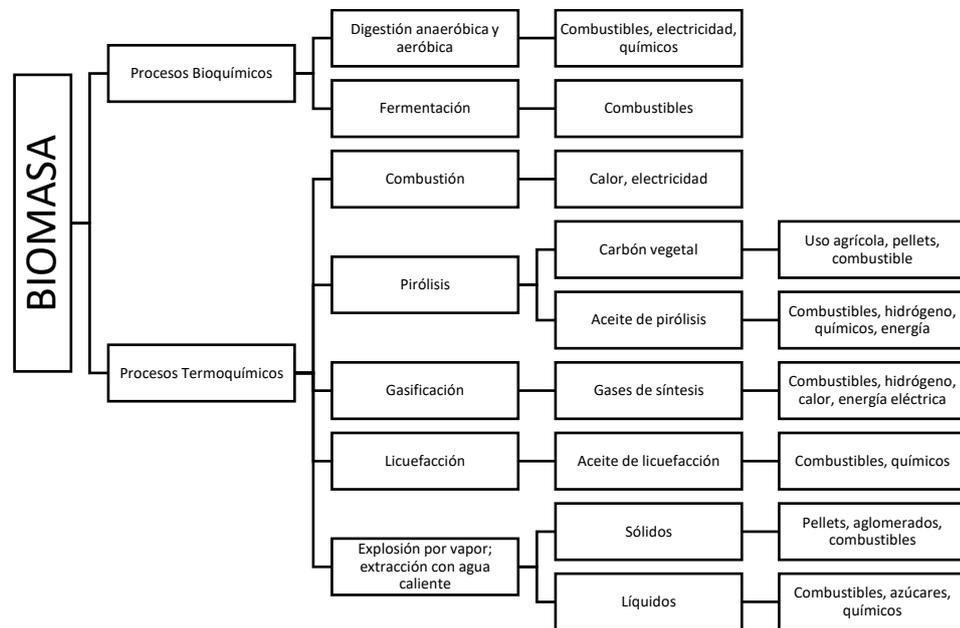
**Fuente:** (Coordinación de Energías Renovables, 2008)

La **biomasa seca** la humedad es inferior al 60%, como leña, paja, etc. Se utiliza mediante procesos termoquímicos o fisicoquímicos que producen calor o productos secundarios como combustible, sólido, líquido o gas.

La **biomasa húmeda** supera el 60% y dentro de este grupo están los residuos animales, vegetales y acuáticos. Son adecuadas para tratamiento mediante procesos químicos o procesos físicos.

**Figura 11**

*Procesos bioquímicos y termoquímicos para procesar biomasa.*



*Fuente: (Espinoza & Martínez, 2015)*

## **Recursos de biomasa**

**Recursos agroindustriales.** - Corresponde a los residuos de productos agropecuarios como el bagazo de la caña, cascara de arroz que se queman para producir vapor y mediante este producir electricidad (Coordinación de Energías Renovables, 2008). Otro tipo de residuos agrícolas son los efluentes de industrias como las azucareras y la industria láctea, que por su alto contenido en materia orgánica pueden utilizarse para producir biogás por descomposición.

**Residuos urbanos.** – Corresponde a residuos sólidos o líquidos. Los residuos sólidos pueden ser procesados para obtener combustibles para calderas que produzcan vapor y/o energía eléctrica. Los residuos cloacales pueden ser utilizados para producir biogás mediante fermentación anaeróbica.

**Tabla 2***Fuentes de biomasa en el Ecuador*

<b>Producto</b>	<b>Provincias productoras importantes</b>	<b>Tecnologías de aplicación</b>	<b>Poder Calorífico</b>	<b>Producción de Energía Eléctrica</b>
Banano	Los Ríos, El Oro y Guayas	Combustión, gasificación y Ciclos ORC	12,625 (MJ/kg)	698,20 kWh/t (base seca)
Arroz	Guayas y Los Ríos	Gasificación y combustión	13,349 (MJ/kg)	744,38 kWh/t (base seca)
Cacao	Guayas, Los Ríos, Esmeraldas y Manabí	Combustión	15,526 (TJ/kg)	374,05 kWh/t (base seca)
Café	Manabí, Loja, Sucumbíos y Orellana	Combustión	13,460 (TJ/kg)	533,95 kWh/t (base seca)
Caña de azúcar	Guayas, Cañar, Loja, Imbabura y Los Ríos	Combustión y cogeneración	19,849 (TJ/kg)	1.097,71 kWh/t (base seca)
Maíz duro	Guayas y Los Ríos	Combustión	12,553 (TJ/kg)	689,59 kWh/t (base seca)
Palma africana	Los Ríos, Esmeraldas y Sucumbíos	Combustión y cogeneración	16,404 (TJ/kg)	706,80 kWh/t (base seca)
Palmito	Pichincha, Orellana y Santo Domingo de los Tsáchilas	Combustión	12,603 (TJ/kg)	732,23 kWh/t (base seca)
Piña	Guayas, Santo Domingo de los Tsáchilas y Los Ríos	Combustión	11,081 (TJ/kg)	501,18 kWh/t (base seca)
Plátano	Los Ríos, Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas y Guayas	Combustión, gasificación y Ciclos ORS	12,625 (TJ/kg)	698,20 kWh/t (base seca)

**Fuente:** (Ministerio Coordinador de Producción et al., 2014)

### 1.5.7 Repercusiones de la Explotación de Fuentes Energéticas

#### Efecto Invernadero

Es necesario que los sistemas vivos estén protegidos ante una abundante radiación que daña enlaces. La primera atmósfera que poseía el globo terráqueo, antes no poseía oxígeno libre, era bastante transparente a la radiación ultravioleta y además era rica en  $CO_2$ . Con la aparición de bacterias y algas en el océano, fueron capaces de realizar la fotosíntesis, es decir la producción del oxígeno. Una vez que se difundían las moléculas de  $O_2$ , la radiación UV la dividía en átomos de oxígeno, en donde se formaba también el ozono ( $O_3$ ), el cual actúa

como filtro y se encarga de la absorción UV. Quedó protegida la tierra de estas peligrosas radiaciones, pero seguía obteniendo luz visible.

El  $CO_2$  atmosférico, debido al trascurso de la fotosíntesis se fue poco a poco convirtiendo en sustancia orgánica y su densidad fue disminuyendo. La atmósfera posee un 0,032% de  $CO_2$  (320 ppm) para la fotosíntesis y es sustancial, debido a que la planta absorbe este carbono y lo transforma en hidratos de carbono por medio de la energía solar. (Carta, Calero, Colmenar, et al., 2009)

### **Cambio Climático**

Las burbujas de aire capturadas en glaciares que fueron compuestos en 160.000 años, muestra una cantidad de  $CO_2$  entre 180 y 280 ppm. La proporción había crecido a 350 ppm en el año 1960. Si continuara la emisión de  $CO_2$  a la atmósfera al mismo ritmo, la proporción se doblaría en el año 2100. Lo más notorio que sucedería por este incremento de  $CO_2$ , sería que la atmósfera sufriría un fatal calentamiento y como consecuencias la expansión de aguas oceánicas y pérdida de masas glaciares, además también un cambio climático, lo que implicaría el incremento de los fenómenos tormentosos, incremento de las precipitaciones globales, entre otros.

Otra causa es que debido al aumento del  $CO_2$  en la atmósfera, se producen fenómenos que potencian las destrucciones e incendios en las selvas tropicales y ecuatoriales. Además, posee cierta influencia el metano ( $CH_4$ ) como creador de efecto invernadero, pero la cantidad que se tramite en la atmósfera es bastante pequeña. Estos efectos siempre son en un periodo prolongado es decir que el  $CO_2$  emanado, permanece en la atmósfera entre 50 y 200 años y el metano unos 15 años.

### **Lluvia Ácida**

La lluvia ácida es un efecto colateral importante. La combustión del azufre crea dióxido de azufre ( $SO_2$ ), el cual se dirige a la atmósfera. También al mismo tiempo se mezcla con el vapor de agua y se crea el ácido sulfúrico ( $SO_4H_2$ ), que provocan una lluvia ácida. Así mismo sucede con los óxidos de nitrógeno

( $NO_2NO_3$ ), estos terminan haciéndose nítrico ( $NO_3H$ ), durando en la atmósfera unos 150 años.

Cuando la lluvia ácida cae en los suelos se acidifican y no será posible poder cultivar en esa tierra nunca más, además los árboles quedarían destruidos y enfermos. Si esta lluvia ácida cae en los ríos o lagos, ocasiona un mayor impacto debido que al disminuir el pH del agua estos se transforman en nutrientes poderosos que multiplica las algas y así bloquearían la luz solar que se introduce en el mar, causando la reducción de oxígeno diluido en el agua y con ello la asfixia en los animales y plantas.

### **Conferencia de las naciones unidas sobre el cambio climático (cop 26).**

Este encuentro fue celebrado en Glasgow (Reino Unido) del 31 de octubre al 12 de noviembre del 2021. Es la reunión número 26, donde estuvieron representantes de alrededor de 200 estados, con el objetivo de hacer más rápidas las acciones ante el cambio climático para cumplir con el Acuerdo de París (Iberdrola, 2022).

En la COP26, grandes dirigentes políticos anuncian nuevos compromisos para acabar con el cambio climático, donde se dio origen al pacto climático de Glasgow. Se trata de un documento que posee guías de acciones políticas en la que todos los países reunidos quedaron de acuerdo. Los representantes de las principales economías del mundo y las más contaminantes, han alcanzado un acuerdo en el que se proponen limitar el calentamiento global a 1,5 °C, con objetivos cuantitativos y explícitas referencias hacia la disminución del carbón y el uso de combustibles fósiles. Además, se reconoce la importancia de ejecutar acciones para prevenir efectos catastróficos. Se ordena a los países a realizar más rápido su acción climática y se insta a verificar e incrementar sus objetivos a 2030, en cumplimiento con el Acuerdo de París. Los países desarrollados deben destinar 100.000 millones de dólares para lograr el objetivo lo antes posible a 2025, se define un plan de 2 años para establecer un objetivo global de adaptación al cambio climático. Los puntos más destacables en la COP26 fueron que: Brasil hizo un comunicado donde informa que tiene como objetivo erradicar la deforestación ilegal para el año 2028, mientras que Israel quiere lograr hacer de su país una nación de innovación climática, el presidente de

España Pedro Sánchez ha prometido dar hasta 1.350 millones al fondo verde del clima para ayudar a luchar contra el cambio climático a los países más pobres, a diferencia de India quien a pesar de ser uno de los países más contaminantes del mundo anunció que retrasa otros 20 años su compromiso de cero emisiones.

### **Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC)**

Fue creado en el año de 1988, su misión es tratar de forma objetiva el cambio climático, así como sus impactos, alternativas de adaptación y reducción. El IPCC toma informes que ya fueron publicados para realizar una recopilación y poder llegar a una versión global. IPCC ha creado cinco informes de evaluación de distintos volúmenes y en la actualidad ya están por el sexto ciclo de evolución.

El sexto informe menciona un momento decisivo para la humanidad, este informe fue realizado por los mejores expertos en ciencia climática por orden de la ONU e indica que existe más deforestación, emisión, fenómenos meteorológicos extremos y que existe cada vez menos presupuesto para reducción de emisión de carbono (Montón, 2021). Este informe se centra en el análisis sobre los cambios bruscos como, por ejemplo, el deshielo de la Antártida y del Ártico. Además, analiza el papel de los contaminantes de vida corta, como las partículas que provienen de los vehículos de Diesel, todo esto para lograr el objetivo del 1,5 °C.

Se está en un momento decisivo en términos de progreso, el surgimiento de la energía solar y eólica como fuentes más baratas de producción de electricidad, ha desestabilizado los sistemas tradicionales de energía de combustibles fósiles y el sector financiero está despertando, lento pero seguro; las demandas y decisiones judiciales relacionadas con el clima (alrededor de 1.500 en 38 países) están abriendo nuevas vías legales, el impulso y el aumento del movimiento climático juvenil es muy poderoso, por lo que hay más investigación y una comprensión más clara del pasado, presente y futuro y lo que está en juego.

Este informe insta a los gobiernos a aumentar sus compromisos y cumplirlos, respecto a lo de la cumbre climática de Glasgow (Reino Unido) la COP 26, para alinearlos con estos nuevos datos científicos del IPCC. El informe indica que toda la clase política debería trabajar día y noche para coordinar todos los esfuerzos

humanos enfocados en detener el cambio climático catastrófico. Se necesitan políticas más ambiciosas y abandonar aquellas que son dañinas o intratables para reducir las emisiones de carbono lo más rápido posible, eliminar los combustibles fósiles, transformar los sistemas alimentarios y financiar a los países más afectados respecto a la crisis climática.

### **1.5.8 Demanda Eléctrica**

#### **Tipos de Demanda**

En Ecuador, el aumento de la demanda eléctrica se da conforme a las actividades que realizan las personas y a la creación de industrias con cargas grandes de electricidad. (Muela, 2019).

**Residencial:** También llamado uso de energía en el hogar, es el segmento donde están los refrigeradores o neveras, además de otros electrodomésticos útiles para vivir, el uso de esta energía cambia dependiendo del hogar, es decir varía de acuerdo a su economía, su cultura, geografía y vivienda, generalmente los países desarrollados utilizan más gas natural y electricidad para cubrir la demanda residencial, en cambio los países en desarrollo utilizan más biocombustibles. En Ecuador la demanda de energía del sector residencial para el año 2021 corresponde al 35,26% de la demanda total (Boechler, Garcia, Hanania, Vargas, & Donev, 2021).

**Comercial:** Es la energía proporcionada a las organizaciones, escuelas, universidades y edificios públicos, etc. El uso de energía comercial no es igual a la industrial, ciertamente los 2 son para negocios, pero la energía comercial es para justamente dedicarse al negocio. Para el año 2021 un 16.06 % de usuarios comerciales en Ecuador consumen este tipo de energía. El cobro de la tarifa por kWh depende del horario.

**Industrial:** El uso de energía eléctrica, permite a las industrias extraer recursos y producir bienes a partir de materia prima. Las industrias pueden utilizar la energía de formas diferentes; por ejemplo, las empresas de mayor consumo eléctrico son: industria del metal, industrias de papel y celulosa, química y alimentaria, el año 2021 el sector industrial representa el 24,66% de la demanda total. Para este tipo de sector el factor de potencia mínimo para evitar penalizaciones es de 0,92 y si baja de 0,6 la empresa comercializadora podría suspender el servicio previa notificación.

## Tarifas Eléctricas

En el Ecuador se consideran dos categorías de tarifas que son: residencial y general, además se consideran los niveles de voltaje: bajo, medio y alto.

La categoría residencial corresponde exclusivamente al uso doméstico, también dentro de esta categoría se incluyen a los consumidores de escasos recursos que tienen en su domicilio una pequeña actividad sea esta artesanal o comercial.

La categoría general comprende actividades diferentes al uso doméstico, entre ellas, prestaciones de servicios públicos y privados, comercio e industria.

## Niveles de Voltaje

Se establece los siguientes niveles de voltaje.

**Tabla 3**

*Clasificación para consumidores de alto voltaje.*

Nivel de voltaje - NV	Grupo	Voltaje de suministro en el punto de entrega
Alto	Bajo	$NV < 0,6 \text{ kV}$
	Medio	$0,6 \text{ kV} \leq NV \leq 40 \text{ kV}$
	Grupo 1 – AV1	$40 \text{ kV} < NV \leq 138 \text{ kV}$
	Grupo 2 – AV2	$NV > 138 \text{ kV}$

Fuente: (ARCONEL-035/19, 2019)

**Tabla 4**

*Categorías de tarifa y nivel de voltaje*

Categoría	Nivel de voltaje - NV	Grupo de consumo	Registro de demanda
Residencial		Residencial	Sin demanda Sin demanda
		Comercial	Con demanda Con demanda horaria
General	Bajo voltaje – BV $NV < 600 \text{ V}$	Industrial	Sin demanda Con demanda horaria
			Sin demanda Con demanda horaria
		Otros	Con demanda horaria Con demanda horaria diferenciada
			Comercial

$600 V \leq NV$ $\leq 40 kV$	Industrial Otros Comercial Otros	Con demanda horaria Con demanda horaria
Alto voltaje - AV AV1: $40 kV \leq NV \leq 138 kV$ AV2: $NV \leq 138 kV$	Industrial Comercial Otros Industrial Industrial	Con demanda horaria diferenciada Con demanda horaria Con demanda horaria Con demanda horaria diferenciada

Fuente: (ARCONEL-035/19, 2019)

### Demanda Máxima

La demanda facturable es el resultado de la comparación entre la demanda máxima registrada en el medidor y la potencia contratada. La demanda facturable mensual ( $DF$ ) corresponde a la demanda máxima ( $DM$ ) del mes en curso registrada en cada cuadro de demanda, y no podrá ser inferior al 60% del valor de la demanda máxima de los últimos doce meses incluido el mes de facturación ( $DM_{max12}$ ).

$$DF = \begin{cases} 60\% \times DM_{max12}, & \text{si } DM < 60\% \times DM_{max12} \\ DM, & \text{si } DM \geq 60\% \times DM_{max12} \end{cases} \quad (2)$$

### Registrador de Demanda Horaria (FDG)

Corresponde a los consumidores que disponen de un registrador de demanda horaria, excepto consumidores en medio y alto voltaje. Para el cálculo se considera la Demanda pico ( $DP$ ) en el horario de (18:00 a 22:00 horas) y la demanda máxima mensual del consumidor ( $DM$ ).

$$FDG = \begin{cases} 0.6 & \text{si } \frac{DP}{DM} < 0.6 \\ \frac{DP}{DM} & \text{si } 0.6 \leq \frac{DP}{DM} \leq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

### Industriales en Medio y Alto Voltaje – FGDI

Para equipos eléctricos industriales de media y alta tensión con registradores de demanda horaria, el factor de gestión de la demanda (FGDI) se obtiene de la siguiente forma:

$$FGDI = \begin{cases} 0.50 & \text{si } \frac{DP}{DM} < 0.6 \\ 0.5833 \times \frac{DP}{DM} + 0.4167 \times \left(\frac{DP}{DM}\right)^2 & \text{si } 0.6 \leq \frac{DP}{DM} \leq 0.9 \\ 1.00 & \text{si } 0.9 < \frac{DP}{DM} \leq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

### Factor de Potencia

Corresponde a los consumidores de la categoría general con medición de energía reactiva.

$$P_{BFP} = \begin{cases} P_{BFP} = 0 & \text{si } FP \geq 0.92 \\ P_{BFP} = B_{FP} \times FSPEE_i & \text{si } FP < 0.92 \rightarrow B_{FP} = \frac{0.92}{FP} - 1 \end{cases} \quad (5)$$

Donde:

$P_{BFP}$  = Penalización por bajo factor de potencia

$FP$  = Factor de potencia registrado

$B_{FP}$  = Factor de penalización

$FSPEE_i$  = Factura por servicio público de energía inicial

Si el factor de potencia es menor a 0.6 para cualquier consumidor de tipo general con medición de energía reactiva, la distribuidora podrá suspender el servicio de energía eléctrica previa notificación, hasta que el consumidor corrija el factor de potencia.

### Facturación

Para la facturación del servicio de energía se considera los componentes de: energía, potencia, pérdidas de transformadores, comercialización y penalización por bajo factor de potencia.

$$FSPEE = E + P + PIT + C + P_{BFP} \quad (6)$$

$FSPEE$  = Factura por servicio público de energía eléctrica – USD

$E$  = Facturación de Energía (USD)

$P$  = Facturación de demanda (USD)

$PIT$  = Pérdidas de Transformadores (USD)

$C$  = Comercialización (USD)

$P_{BFP}$  = Penalización por bajo factor de potencia

## Costos de Energía

**Tabla 5**

Costos de energía según categoría y nivel de voltaje

<b>Categoría</b>	<b>Nivel de voltaje</b>	<b>Energía (USD/kWh)</b>	<b>Comercialización</b>
Residencial	110/220V	0,093	1,414
Comercial sin demanda	1-300 superior	0,092 0,103	1,414 1,414
<b>General medio voltaje con demanda</b>			
<b>Categoría</b>	<b>Demanda (USD/ kW-mes)</b>	<b>Energía (USD/kWh)</b>	<b>Comercialización</b>
Comercial	4,790	0,095	1,414
Industrial	4,790	0,083	1,414
<b>Medio Voltaje con demanda horaria</b>			
<b>Horario</b>	<b>Demanda (USD/ kW-mes)</b>	<b>Energía (USD/kWh)</b>	<b>Comercialización</b>
<b>Comercial</b>			
08:00 hasta 22:00 horas	4,576	0,095	1,414
22:00 hasta 08:00 horas		0,077	
<b>Industrial</b>			
L-V 08:00 hasta 18:00 horas		0,0897	
L-V 18:00 hasta 22:00 horas	4,576	0,1037	1,414
L-V 22:00 hasta 08:00 horas		0,0501	
S,D,F 18:00 hasta 22:00 horas		0,0897	
<b>Alto Voltaje con demanda horaria</b>			
<b>Comercial</b>			
08:00 hasta 22:00 horas	4,400	0,089	1,414
22:00 hasta 08:00 horas		0,081	
<b>Industrial</b>			
L-V 08:00 hasta 18:00 horas	4,400	0,0837	
L-V 18:00 hasta 22:00 horas		0,0967	1,414
L-V 22:00 hasta 08:00 horas		0,0501	
S,D,F 18:00 hasta 22:00 horas		0,0837	

Fuente: (ARCONEL-035/19, 2019)

### 1.5.9 Análisis de Cálculo de Cargas

#### Uso Eficiente de la Energía

El uso eficiente de la energía incluye reducir la cantidad de electricidad y combustible que se consume y mantener la calidad y accesibilidad de los bienes y servicios. En general, la reducción del consumo energético está relacionada con los cambios tecnológicos, ya sea mediante la creación de nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los electrodomésticos, el nuevo diseño de máquinas y espacios habitables que reducen la pérdida de energía térmica. Sin embargo, no siempre es así, ya que la reducción del consumo de energía puede estar asociada a una mejor gestión o cambios en los hábitos y actitudes. Por otro lado, el ahorro de energía puede significar reducir o detener determinadas actividades para no desperdiciar energía. Por ejemplo, apagar las luces cuando no sea necesario, por otro lado, si se sustituyen las bombillas incandescentes por bombillas de alta eficiencia, se está tomando medidas de eficiencia energética que reducen el consumo energético, sin afectar el desarrollo de las actividades.

### **Requerimientos de cargas.**

Normalmente la potencia en watts requerida por las cargas, se indica en la hoja de especificaciones proporcionada por los fabricantes y/o en las placas informativas de los propios artefactos. En otros casos no se indica la potencia, pero si parámetros como el voltaje y la corriente nominal, entonces se calcula la potencia requerida por una carga, multiplicando el voltaje por la corriente (International, 2016).

- **Cargas cíclicas:** La mayoría de las cargas seguirán consumiendo energía cuando estén encendidas, sin embargo, algunas cargas se encenderán y apagarán automáticamente siempre que estén conectadas a la fuente de alimentación. El ciclo de trabajo es el porcentaje de tiempo que el dispositivo alimentado consume energía. Los refrigeradores y congeladores son ejemplos de equipos con un ciclo de trabajo del 50% o 60%. Además, los dispositivos que generan o usan calor, generalmente operan en ciclos de trabajo (encendido y apagado), como ejemplo están, mantas aislantes, calentadores, planchas y electrodomésticos de cocina.
- **Cargas de sobretensión:** Son cargas que tienen una gran demanda de energía, especialmente en los arranques, por ejemplo, los motores

eléctricos requieren de 5 a 7 veces el valor nominal de corriente para el arranque, con este tipo de cargas no se debería instalar bancos de baterías ya que produciría rápidas descargas y provocar daño en ellas.

- **Cargas fantasmas:** Hay muchas cargas eléctricas que consumen energía incluso cuando están "apagadas". Estas cargas fantasmas deben tenerse en cuenta al calcular el consumo de energía. Las cargas fantasmas son cargas pequeñas que consumen energía y requieren un suministro de energía constante, por ejemplo, televisores, router, cargadores de celulares y laptop, microondas, etc. Otras cargas fantasmas son aplicaciones con "cajas de pared" o transformadores externos, contestadores automáticos, cargadores de baterías y colectores de polvo. Las cargas fantasmas pueden parecer insignificantes a primera vista, pero la realidad es que consumen energía las 24 horas del día, los 7 días de la semana, y acumulan mucha energía.
- **Cargas desplazables y no desplazables:** Las cargas no desplazables son las que se utilizan en un periodo específico sin cambios en la potencia como calentador de agua, cocina eléctrica, nevera y aire acondicionado. Cargas desplazables como lavadora, aspiradora se puede mover a otro tiempo de uso.

#### **1.5.10 Normativa para Energías Alternativas**

La ley orgánica de servicio público de energía eléctrica en el Ecuador señala en su artículo 15 *"el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto"*.

En el artículo 26 de la LOSPEE se menciona que el ministerio rector promoverá el uso de energías limpias y alternativas con base en el aprovechamiento de los recursos renovables de energía.

En la Resolución Nro. ARCONEL-057/18 se establece que *"hasta que se emita una regulación sobre generación distribuida, el desarrollo, implementación y participación de consumidores que cuenten con sistemas fotovoltaicos de hasta 100 kW de capacidad nominal, serán aplicables para consumidores"*

*residenciales que tengan interés en instalar sistemas fotovoltaicos de hasta 300 KW de capacidad nominal instalada; y, de menos de 1000 kW, para consumidores comerciales o industriales”.*

Para la instalación de un Sistema de Generación Distribuida para el autoabastecimiento de consumidores regulados (SGDA) se deben cumplir las siguientes condiciones:

- La potencia nominal instalada debe ser menor que 1000Kw
- La conexión debe ir en sincronía al sistema de distribución o mediante instalaciones internas del consumidor.
- Aprovecha los recursos energéticos distribuidos que están dentro del área de servicio.
- Hace uso de fuentes de energías renovables con o sin almacenamiento de energía.

El artículo 18 de la LOSPEE hace referencia al balance de energía. Si se presentaran eventuales excedentes de energía debido a las condiciones operativas de la SGDA o por variación de consumo, estos serán inyectados a la red de distribución. La Distribuidora por su parte determinará el balance de energía neto mensual como la diferencia entre la energía consumida de la red y la energía inyectada por el SGDA obtenido la energía neta.

$$E_{neta\_i} = E_{red\_i} - E_{SGDA\_i} \quad (7)$$

Siendo

$E_{neta\_i}$  : La energía neta en el mes de consumo i

$E_{red\_i}$  : La energía consumida de la red en mes de consumo i

$E_{SGDA\_i}$  : La energía inyectada por el SGDA en mes de consumo i

Si la energía neta es menor o igual a cero, la distribuidora facturará con valor de cero al consumidor, si hubo más producción de energía que la que se consumió, se guarda como crédito de energía en el mes i.

Si por el contrario la energía neta es mayor a cero, significa que hubo más consumo de energía que la que se produjo con la SGDA, en ese caso la

distribuidora verificará si el consumidor dispone de un saldo acumulado de energía del mes anterior, si es así se debita una parte o la totalidad del saldo total de energía disponible del consumidor para cubrir el consumo neto de energía en el mes i. Si se cubre la totalidad de energía del consumo neto, el valor a facturar será cero, caso contrario si se cubre solo una parte con el saldo de energía, se facturará el saldo aplicando el pliego tarifario del SPEE.

Mensualmente se actualizará el saldo total de energía disponible del consumidor en base a créditos generados y débito de valores para cubrir la energía neta en el mes i, para considerarlo en el cálculo de energía facturable del siguiente mes. Contando desde el inicio de operación del SGDA el valor SEA (saldo total de energía disponible en el mes i) se reseteará a cero cada 24 meses, sin derecho a compensación económica por la energía producida en exceso.

## **1.6 Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica consiste en transformar la energía luminosa del Sol en energía eléctrica mediante la utilización de determinados materiales tratados (silicio purificado a partir de arena mediante complejos procedimientos) que se exponen al Sol y recogen los rayos solares, convirtiéndolos en electricidad. Estas instalaciones se denominan sistemas solares fotovoltaicos.

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes electrónicos, mecánicos y eléctricos que suceden para transformar y captar la energía solar aprovechable, haciéndola útil como energía eléctrica.

### **1.6.1 Componentes del Sistema Solar Fotovoltaico**

#### **Módulo Fotovoltaico**

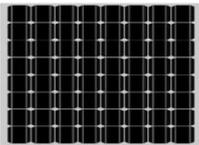
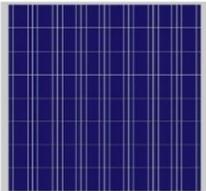
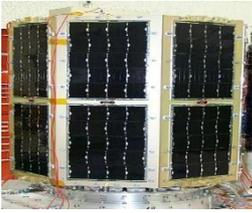
Es el elemento principal de la instalación, capaz de convertir la energía solar en energía eléctrica como corriente continua, está formada por la combinación de varios paneles para alcanzar la potencia necesaria con la instalación.

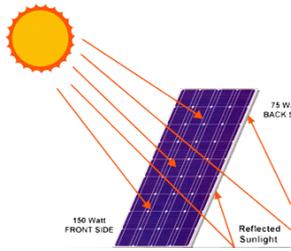
Las celdas fotovoltaicas son mecanismos compuestos por metales delicados a la luz que emanan electrones cuando los rayos repercuten sobre estos, produciendo energía eléctrica. Son un conjunto de celdas hechas a sustento de

silicio puro sumándole la impureza de elementos químicos, con la capacidad de crear cada una de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0.46 a 0.48 V. (Carballo, 2016)

**Tabla 6**

*Tipos de paneles fotovoltaicos*

Células	Panel	Características
	<b>Monocrystalino</b>	Es uno de los tipos de paneles más usados e instalados, el nombre se debe al tipo de células fotovoltaicas que usan para fabricarlos (silicio cristalino), para diferenciar este tipo de panel nos fijamos en su color negro, estos son los paneles más eficaces en el mercado de los paneles fotovoltaicos debido a su productividad con las células y tienen un rendimiento del 15-18%
	<b>Policristalino</b>	El material con el que se fabrica este tipo de panel, es con la unión de diversos cristales de silicio, el silicio después de ser fundido es colocado en molde dejándolo enfriar con un cristal granulado, en este proceso se emplea el “método de moldeado”, es por eso que se los denomina “policristalino”, es adecuado para suministrar la tensión en lugares de poco consumo.
	<b>Amorfo</b>	Al igual que los tipos de paneles anteriores este está hecho de células de silicio, además se diferencian por atrapar más radiación difusa que los cristalinos normales, se sabe que son mejores en zonas cálidas, estos segmentos tienen la protección de un cristal especial que asegura el ingreso de luz.
	<b>Células fotovoltaicas de película delgada</b>	Es la capa de material en el rango de fracciones de nanómetro hasta varios micrómetros de espesor, por lo que son muy flexibles pudiéndose doblar sin dañarse, una película se forma cuando esta crece a partir de átomos o moléculas, además la corriente eléctrica puede ser transferida a un banco de baterías para ser usada luego.
	<b>Células fotovoltaicas de arseniuro de galio</b>	Funcionan con la misma base indispensable que las células solares típicas enfocadas en silicio, pero la implementación de materiales diversos posibilita lograr eficiencias en conversión más grandes, puesto que pueden usar más parte del espectro solar para generar electricidad.



### Células bifaciales

Se define la bifacialidad como la conexión entre la eficiencia del lado trasero y delantero que se mide en condiciones de prueba estándar, las células bifaciales están elaboradas con una lámina transparente trasera de vidrio templado doble o reforzado. Los paneles bifaciales con o sin marco comúnmente están producidos de células mono cristalinas, aunque también se podría utilizar poli cristalino.

Fuente: (Días & Carmona, 2010)

## Parámetros de Funcionamiento de Una Célula Solar

**Corriente de iluminación ( $I_L$ ):** Es la corriente producida al incidir sobre la célula la radiación solar.

**Corriente de oscuridad:** Se origina por la recombinación del electrón-hueco que es proporcionado dentro del semiconductor.

**Tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ):** La mayor tensión se alcanza en los límites de la célula y se da cuando no ninguna carga está conectada.

**Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ):** Mayor valor de corriente que logra pasar por la célula solar, se produce cuando sus terminales se encuentran cortocircuitados.

Al estar conectada a una carga la célula cambia sus valores en tensión e intensidad, por los cuales se hallan dos valores en los que la potencia dada sea la mayor:

- $V_m$  como tensión máxima,  $I_m$  es intensidad máxima, ambas serán menores que  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ .

Teniendo los valores anteriores la mayor potencia que entregará la célula es:

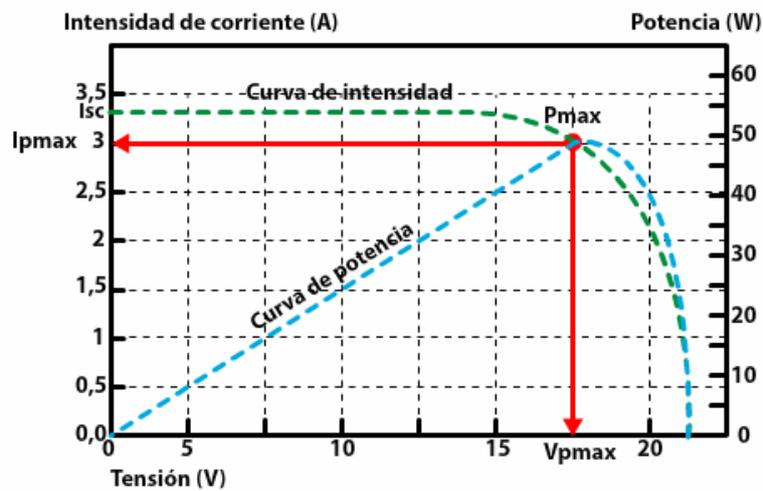
$$P_m = V_m I_m \quad (8)$$

Para determinar el parámetro de la célula solar que lleva el (FF) factor de forma y es calculado con la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{SC}} \quad (9)$$

**Figura 12**

Curva de potencia de un panel fotovoltaico.



Fuente: (ECO-sistemas, 2019)

### Factor de forma, resistencia serie y paralelo

El factor de forma  $FF$  se lo puede calcular mediante la siguiente ecuación de una manera aproximada para la célula de silicio.

$$FF = FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1} \quad (10)$$

Donde

$$v_{oc} = \frac{v_{oc}}{mkT/e} \quad (11)$$

La característica ideal que se describió puede ser alterada por dos factores los cuales son:

- **Resistencia serie ( $R_s$ ):** Es una resistencia interna provocada por la resistencia de la rejilla metalizada del contacto y la resistencia del propio semiconductor. La compensación entre el factor de cobertura de la célula y este parámetro se ha mencionado anteriormente, cuando el factor de cobertura tiende a cero, la resistencia en serie tiende a aumentar infinitamente.
- **Resistencia paralelo ( $R_p$ ):** Se origina por defectos en la calidad de la unión  $pn$  que constituye la batería y provoca una fuga de corriente.

Estos dos factores se pueden tener en cuenta en el modelo de célula solar, por lo que su ecuación característica viene determinada por la siguiente ecuación.

$$I = I_L - I_0(T) \left( \exp \frac{e(V + R_S I)}{mkT} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (12)$$

## Baterías

Se encuentra en las instalaciones autónomas, es la encargada de suministrar energía a la instalación en periodos donde no se tenga luz solar o poca luminosidad, acumulando energía para la instalación.

Tabla 7

*Tipos de baterías para instalaciones con paneles solares.*

	<b>Batería</b>	<b>Características</b>
	<b>Baterías de plomo ácido abierto</b>	Son sencillas y económicas, una batería monoblock que tiene 6 compartimientos separados pero conectados en serie, están sumergidos en ácido sulfúrico, esto le otorga 12 voltios de tensión nominal y se encuentra en capacidades que van desde los 50 a los 250 o 300 amperios/horas (Ah).
	<b>Batería solar</b>	Son dispositivos que almacenan energía que se genera en las placas solares cuando incide la radiación solar. Se almacena el excedente de energía para utilizarlo en las noches, en días nublados o cuando la demanda supera la generación con paneles solares.
	<b>Baterías AGM (Absorption Glass Mat).</b>	Su tecnología permite que las placas de plomo absorban mejor y más rápido el ácido. No requieren de mantenimiento debido a que son selladas, soportan un gran número de ciclos y se recomienda para instalaciones exigentes. Otra aplicación es para trabajar como baterías de arranque.
	<b>Baterías estacionarias</b>	Tienen incorporado un regulador para alimentar el consumo y recargar la batería. Dentro de este grupo están las baterías OPzV, baterías de electrolito absorbido, OPzS, TOPzS o baterías de electrolito líquido. Estas baterías son muy recomendadas en instalaciones fotovoltaicas, tiene ciclos de descarga profunda y larga vida útil.

	<b>Baterías de ION-Litio</b>	<p>Estas baterías se cargan más rápido que los otros tipos de baterías, presentan mayor densidad energética y mayor vida útil. Pueden descargarse al 100% o al 50% sin que sufra la batería. Las baterías de litio presentan características físicas diferentes del resto, tiene más autonomía y son menos pesadas.</p>
	<b>Baterías con electrolito tipo GEL</b>	<p>Las baterías de gel son similares a la estructura de una batería húmeda tradicional donde los electrodos positivos y negativos son contorneados por un electrolito. Tiene un diseño envolvente que es fácil de manejar y mayor seguridad. Tiene ciclos de descarga profunda, puede tener hasta 800 ciclos de vida. Se usan en instalaciones pequeñas y medianas, son eficaces y extraordinaria funcionalidad.</p>

Fuente: (Días & Carmona, 2010)

### Especificaciones de las baterías

Para diseñar un sistema isla se deben considerar las siguientes especificaciones.

- Días de autonomía
- Capacidad de batería
- Tasa de profundidad de descarga
- Tiempo de vida útil
- Condiciones ambientales
- Precio y garantía
- Cronograma de mantenimiento

### Controlador de Panel Fotovoltaico

El controlador o también conocido como regulador, es un dispositivo electrónico que se encarga de mantener el estado de carga de las baterías para poder garantizar que está posea una cantidad óptima y como resultado su vida útil sea larga.

La función del controlador solar es de ajustar y regular la corriente directa que sale del panel, al estar en función de la radiación solar es posible que pueda sobrecargar el nivel de las baterías, su principal función es proteger las baterías de las sobrecargas y sobre-descargas, además brinda información al usuario del estado de las mismas.

El controlador es denominado como el corazón de un sistema fotovoltaico, debido a que se encarga de saber su comportamiento y el tiempo de vida de todo el sistema. Si una unidad de control extrae bastante electricidad de la batería provocará fallas anticipadas, que incluso pueden destruir los dispositivos y cables. Si un controlador antes de tiempo apaga los paneles, este será responsable de la eficiencia que tendrá el sistema, por eso se recomienda utilizar solo diseños probados.

### Figura 13

*Regular de voltaje para paneles fotovoltaicos.*



Fuente: (Ingemecanica, 2022)

### Inversor

Los inversores son elementos electrónicos que tienen el objetivo de transformar la corriente directa en corriente alterna con una frecuencia de 50 o 60 HZ. Es muy necesario el inversor en las instalaciones fotovoltaicas, debido a que la mayor parte de cargas instaladas, funcionan con corriente alterna. Se denominan inversores interactivos a los que alimentan la red eléctrica, estos se encuentran en plantas de generación como en zonas residenciales.

Por medio de transistores se realiza la conversión, después se usa un transformador para reducir o aumentar el voltaje, teniendo en cuenta el número de vueltas que sean necesarias hasta proveer el voltaje alterno que se necesita en la instalación.

Actualmente los inversores cuentan con circuito integrados, transformadores de alta frecuencia y transistores de efecto campo. Hay muchos tipos de inversores según el tipo de onda que puede ser sinusoidal, cuadrada y cuadrada modificada.

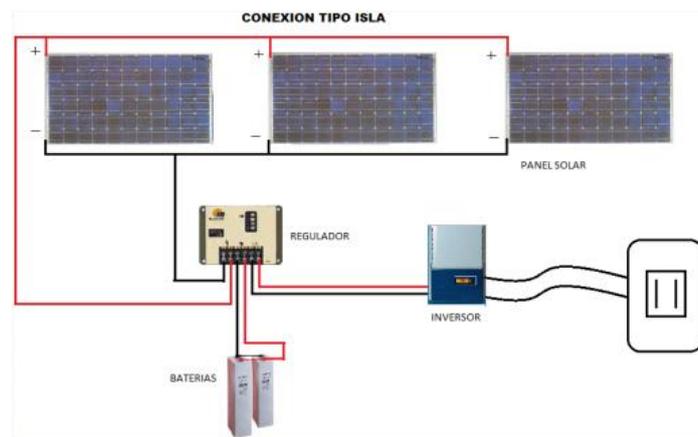
## 1.6.2 Conexión de Sistemas Fotovoltaicos

### Conexión Modo Isla

También denominados sistemas aislados (OFF-GRID), necesitan de un sistema de almacenamiento con banco de baterías, esto incrementa el costo de la instalación y conlleva a que el usuario esté pendiente del mantenimiento de baterías, para que su vida útil sea más prolongada. La vida útil de una instalación fotovoltaica ronda entre 15 - 20 años y depende de los cuidados y el mantenimiento, generalmente estos sistemas se los instala en lugares donde no se tiene un suministro de electricidad (Madero, 2020) o cuando no hay cargas con sobretensión como las de los motores, en el sector comercial e industrial no se realiza este tipo de instalación.

**Figura 14**

*Conexión tipo isla*



Fuente: (UNAM, 2010)

### Conexión Modo Red

Este sistema opera con la red eléctrica que proviene del sistema nacional interconectado, no necesita de baterías o acumuladores para funcionar, en caso de mayor demanda que la generación, el sistema se alimenta de la red, por el contrario, si hay mayor generación, el excedente se inyecta a la red, al no tener banco de baterías requiere menos mantenimiento. La generación con fuentes renovables es consumida de forma instantánea por la instalación, cabe destacar que, debido a su diseño y características, no actúan como fuentes de respaldo de energía, por lo que no pueden suministrar energía a sus cargas cuando falla el suministro eléctrico en la red. Cuando no hay energía solar o existe baja

irradiación, la energía es proporcionada por el organismo encargado de la gestión de energía del país, estos sistemas tienen alrededor de 25 años de vida útil. (Días & Carmona, 2010).

### Figura 15

*Sistema eléctrico con conexión modo red*



Fuente: (McGrawHill, 2019)

## 1.7 Algoritmos de Optimización

La generación distribuida está impulsando un cambio en los sistemas de energía tradicionales, permitiendo la producción de electricidad y energía térmica con fuentes renovables. Con la generación distribuida se consigue la interconexión de recursos energéticos (renovables, calor combinado y generadores de energía), sistemas de almacenamiento y cargas (eléctricas y térmicas). El suministro y demanda se despachan de forma local. Los sistemas multienergéticos integran múltiples vectores energéticos (electricidad, calor, etc.) denominado mix de energías y tecnologías de generación, conversión y almacenamiento que interactúan a diferentes niveles, desde la demanda hasta la generación. Por lo tanto, debe existir una óptima gestión del mix de energías que se incorporan, para conseguir aumentar prestaciones técnicas económicas y medioambientales. El mix de energías es un conjunto de tecnologías para generación de electricidad a un coste total mínimo y tiene en consideración limitaciones técnicas, económicas y políticas. Los enfoques basados en

optimización son populares para el control de la administración de energía, mejoran la eficiencia del sistema y cumplen con múltiples objetivos del sistema.

Se han desarrollado varios modelos matemáticos para optimización de un mix de energías como el enfoque de (arriba hacia abajo/ de abajo hacia arriba), el primero se centra en cuestiones económicas de operación del sistema, mientras que el segundo representa un enfoque más de ingeniería. Otros métodos son programación lineal (PL), programación lineal entera mixta (MILP), programación dinámica, programación difusa, programación no lineal entera mixta (MINLP) y algoritmos genéticos. Los avances en los solucionadores MILP permite el aumento de la eficiencia computacional, por tanto, se pueden implementar MILP para problemas más grandes y complejos. Estos modelos permiten incluir restricciones de la red eléctrica, análisis económico detallado, reglas de mercado de electricidad y operación del sistema eléctrico.

En (Del Pero et al., 2019) se propone un sistema que integra múltiples fuentes de energías renovables (fotovoltaica, y aguas subterráneas) y tecnologías de almacenamiento de energía (acumuladores térmicos sensibles), obteniendo así un mejor emparejamiento con cargas térmicas y eléctricas. Como indicadores de desempeño del estudio se consideran, el porcentaje de energía de los paneles fotovoltaicos que es instantáneamente auto consumida (PV), proporción de horas que un edificio está actuando autónomo a la red (NGIP) y fracción de demanda cubierta por energías renovables (TFC).

Algunas de las técnicas de gestión energética están enfocadas en la minimización de costes de energía. En la gestión energética se consideran elementos como generación despachable (fuentes de energía eléctrica usadas a demanda) y no despachable (energías no renovables como solar y fotovoltaica, etc.), demanda controlada (lavadora, secadora, calentador, A/C, refrigeradora, etc.) y no controlada (cocina eléctrica, ocio y entretenimiento, etc.), conexión de la red y dispositivos de almacenamiento (banco de baterías). En (Gruber, Huerta, & Matatagui, 2014) se presenta una gestión energética para edificios mediante programación lineal entera mixta, la optimización en dos etapas minimiza la función coste sujeta a restricciones físicas del sistema y un horizonte deslizante.

Dado que la energía fotovoltaica es intermitente y variable, introducirla a la red pública provocaría fluctuaciones de voltaje y frecuencia. Una de las soluciones a este inconveniente es introducir más elasticidad en los perfiles de demanda, lo cual implica cambiar la demanda de electricidad en un horizonte de planificación. (Wang et al., 2015) propone la programación lineal de enteros mixtos (MILP) para acoplar más edificios con sistema fotovoltaico integrado a las redes de distribución. Debido a que grandes cantidades de energía no se pueden almacenar fácilmente y las tecnologías de almacenamiento son caras, se propone utilizar almacenamiento de cargas térmicas en búfer. El modelo de optimización tiene como objetivo minimizar el gasto energético global en un edificio en el contexto de precios dinámicos ya que en un futuro no lejano llegará a estar generalizado en el mercado energético.

En (Lindholm, 2020) se aplica el método de optimización MILP para almacenamiento de energía estacional en edificios. Se utiliza una celda de óxido sólido reversible para convertir la electricidad generada en los paneles solares fotovoltaicos en gas hidrógeno, el gas hidrógeno se convierte en electricidad que a su vez genera calor. La energía proveniente de paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos se almacena para ser utilizada en periodos de baja generación, aumentando así la tasa de utilización de energía solar de esa forma se contribuye a conseguir un balance energético anual neto cero. La inversión en dispositivos de almacenamiento de energía tiene un factor importante en la parte económica, debido a que los precios de importación de energía son más altos que los precios de exportación. Al almacenar energía se evita vender el exceso de energía barata en verano y volver a comprar a un precio más barato en invierno. Los problemas MILP incluyen variables enteras y reales, tienden a ser computacionalmente costosos a medida que aumenta el número de variables enteras. El método puede optimizar los sistemas de almacenamiento de energía que contiene dispositivos multimodo donde se utilizan variables enteras para controlar los modos de funcionamiento. La función objetivo es minimizar el gasto operativo anual, en el modelo se introduce una variable de decisión binaria que determina el modo de operación en cada paso de tiempo, las otras variables consisten en tasas de transferencia de energía, que pueden describirse como variables no enteras. El problema de optimización considera un modelo MILP

computacionalmente costoso debido al alto número de variables enteras y no enteras. Por ello la importancia de la reducción a la mitad del intervalo.

(Javanmard, Ghaderi, & Sangari, 2020) proponen un modelo de optimización del consumo de energía en edificios con energía neta cero (nZEB), el modelo reduce el consumo de energía de los dispositivos del edificio en un horario específico y reduce la emisión de CO<sub>2</sub>. El modelo propuesto para la optimización multiobjetivo es el MILP. Se emplean tecnologías de generación fotovoltaica y pila de combustible, junto con sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que componen la microrred, conectado en generación distribuida de esa forma puede utilizar la energía de la red local cuando la generación con fuentes renovables es baja y vender el excedente de energía generada con los módulos fotovoltaicos. El sistema fotovoltaico tiene una potencia de generación de 10kW, se definieron dos escenarios probables, uno en verano y otro en invierno, para el escenario 1 se consideró agosto donde el nivel de radiación solar es adecuado para la producción de energía y en el escenario 2 se incluyó un clima bajo en el cual se emplearon celdas de hidrógeno y electricidad de la red local para satisfacer la demanda del edificio. En el primer escenario se suministra el 66% de la energía del edificio con fuentes fotovoltaicas, las tasas de energía importada de la red y emisión de CO<sub>2</sub> disminuyen en un 73% y 77% respectivamente. En el segundo escenario se produce el 35% de la energía necesaria. Las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía son dos importantes indicadores de equilibrio para evaluar los edificios de consumo cero. Los algoritmos de optimización que se utilizan en este tipo de edificaciones son: métodos de optimización basados en gradientes y métodos de optimización directa sin restricciones, el primer algoritmo se aplica a funciones continuas y uniformes, pero no son adecuados dada la no linealidad de la mayoría de edificios, en lugar de esto se aplican los algoritmos genéticos para obtener una solución multiobjetivo eficaz (Wu et al., 2021)

En (Malysz, Sirouspour, & Emadi, 2013) se propone un sistema de gestión de energía para una microrred, conectada a la red con almacenamiento de baterías en sitio y fuentes de energías renovables. El flujo de energía se optimiza mediante programa lineal de enteros mixtos en una ventana de horizonte móvil. En la optimización se incorporan múltiples objetivos relacionados con beneficios

económicos, costo de operación de la batería y configuración del perfil de energía de la red.

(Lyzwa, Wierzbowski, & Olek, 2015) presentan tres métodos de formulación de variables binarias para el mix de energías, el primer método se basa en la formulación binaria de compromiso de unidad (UC), la matriz de variables consta de unidades en filas y años en columnas, los valores 0/1 indican si las unidades están construidas o no, la puesta en servicio de una unidad con vida útil definida requiere una gran cantidad de restricciones binarias que forman filas largas de "1". El segundo método implementa una mejora en la programación de (UC), las largas filas de "1" para la operación de la unidad se reemplazan por banderas que solo se activan cuando la unidad está construida y está disponible. Mientras que el tercer método introduce un enfoque novedoso para el modelado binario de optimización del mix de energías, las variables que representan el tiempo de construcción y vida útil de una unidad se reduce a variables que representan un tiempo de construcción

En el trabajo realizado por (Castilla Nieto, 2016) se propone una estrategia de optimización multiobjetivo para maximizar el confort térmico, el confort visual y la eficiencia energética. El control eficiente de confort es un problema de optimización multiobjetivo debido a que la regulación del clima al interior del edificio y la eficiencia energética son opuestos, ya que para conseguir confort para los usuarios es necesario incrementar el consumo de energía. En este tipo de problemas no se encuentra una solución que optimice todas las funciones objetivo, pero si se puede hallar un "Frente óptimo de Pareto" que permite seleccionar una solución de compromiso.

El uso de múltiples perfiles permite considerar variaciones de demanda a lo largo del año proporcionando una estimación más realista de los costos de energía. Para un conjunto de capacidades y perfiles de demanda se calcula la cantidad de energía faltante para satisfacer la demanda (Gruber, Fernández, & Prodanovic, 2013).

(Muñoz Salcedo, 2017) desarrolla un algoritmo basado en (MILP) para el dimensionamiento del sistema de suministro energético en un edificio. Se consideran diferentes fuentes de suministro energético como la de la red

eléctrica, fuentes de origen renovable (solar y eólica) y sistema de almacenamiento para retener el excedente de energía. En el estudio se plantea diferentes escenarios donde se analiza la intermitencia de los recursos solar y eólico, el modelo incluye los costos de producción de diferentes fuentes para cubrir la demanda del edificio, como resultado se tiene la optimización de la capacidad a instalar y la producción de cada una de las fuentes de generación consideradas en el modelo.

En (Iturriaga Hidalgo, 2017) se presenta un modelo matemático para optimización de los sistemas de abastecimiento de energía en edificios, el modelo es una superestructura que comprende todos los posibles casos para sistemas de abastecimiento de energía con el propósito de satisfacer demandas de calefacción, agua caliente, refrigeración y electricidad. La función objetivo a minimizar es el costo anual para satisfacer las demandas de los diferentes módulos sujeto a restricciones de: balance de energía a nivel de tecnologías, restricciones de suministro de energía, restricciones a nivel de edificio y límites de variables.

En (Ullah & Hussain, 2019) se propone dos algoritmos bioinspirados, el algoritmo de Optimización de la Polilla-llama (MFO) y el algoritmo genético (AG) para un sistema de gestión de energía en hogares y edificios inteligentes, el modelo busca reducir los costos de energía minimizando la relación de potencia pico a promedio y minimizando la incomodidad del usuario final al ocurrir un encendido periódico de los electrodomésticos. Luego se analiza un modelo híbrido de MFO y AG que es el algoritmo Polilla-llama genética con restricciones de tiempo TG-MFO, para que cada dispositivo logre la máxima comodidad del usuario final de tal forma que no sienta molestias de encendido de los aparatos. En el modelo se integran fuentes de energías renovables y unidades de almacenamiento de baterías. El algoritmo TG-MFO se compara con cinco algoritmos bioinspirados como algoritmo genético (AG), optimización de colonia de hormigas (ACO), Algoritmo de búsqueda de cuervo (CSA), algoritmo de luciérnagas (FA) y optimización de Polilla-llama.

Por otra parte en (Javaid et al., 2017) se proponen varios algoritmos para gestión de demanda entre los cuales están, algoritmos genéticos, optimización basada en aprendizaje, algoritmo de evolución diferencial mejorado y el algoritmo

diferencial mejorado de enseñanza-aprendizaje. El modelo propone una microrred con fuentes de energía renovable, los principales objetivos del modelo son: integración de las fuentes de energías renovables, minimización del coste de facturación de energía eléctrica, incomodidades en los usuarios, minimizar la relación pico-promedio y emisión de carbono. Se debe resolver el conflicto entre costo de electricidad e incomodidad del usuario. Se consideran dos casos, cuando no se incorporan las fuentes de energía renovable y se realiza la gestión energética tradicional, se reduce el costo de electricidad hasta en un 36% mientras que cuando se integran las fuentes de energía renovables y la gestión energética, se reduce el consumo de electricidad en un 67% y emisiones de carbono en 55%, obtenido una diferencia notable. En (Kampelis et al., 2019) se emplea algoritmos genéticos para la optimización operativa de un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) en un edificio inteligente de consumo casi nulo, la optimización tiene como objetivo equilibrar el coste mínimo de energía y el confort térmico, los autores analizaron varios escenarios para demostrar el potencial del algoritmo en la reducción de costes de energía, se obtuvo un rango entre 9.9% y 25%.

La clave para disminuir el consumo energético está en controlar la demanda para mantenerla dentro de los rangos permitidos, una de las estrategias que se utiliza para aquello es el modelo de control predictivo (MPC), su potencial es que permite cambiar las demandas controladas hacia periodos de bajas tarifas, esto a su vez fomenta el cambio de comportamiento del consumo de energía en los usuarios finales bajo el incentivo de reducción del costo de la planilla eléctrica. Los MPC logran reducir el consumo de energía sin comprometer la comodidad de los usuarios. Para la construcción de un proceso de MPC se deben considerar tres elementos claves que son: modelos de construcción, función objetivo e historial de movimiento de control pasados. En (Chen, Li, Yang, & Zhang, 2020) se realiza la estimación predictiva de la demanda energética de un edificio en una hora y la generación fotovoltaica para reprogramar los perfiles de demanda con 24 horas de anticipación mediante cambio de cargas potenciales flexibles. Como resultado de aplicación del modelo la relación de demanda pico/promedio se reduce en 22.9% con ahorro de costes de 34.6% para el día seleccionado. En (Rakocevic, Jahromizadeh, Gruber, & Prodanovic, 2014) se presenta un

algoritmo heurístico en tiempo real para gestión de demanda utilizando programación de electrodomésticos, en este algoritmo los usuarios deben comunicar sus horarios de consumo de energía conectados a la red, el algoritmo se evalúa utilizando un modelo integral de demanda del consumidor. Los resultados muestran una reducción del 17% de la relación de potencia pico a promedio, lo que reduce el costo energético diario del usuario hasta un 14%.

La respuesta de demanda tiene como objetivo estabilizar el suministro de energía y costo de electricidad, en (Mega, Kawatsu, Fujiwara, & Noriyuki, 2020) se estudia un método para identificación de las características de demanda de energía en un edificio considerando cada unidad, piso y área basado en un modelo de predicción utilizando la tecnología de aprendizaje de mezcla heterogénea. Mediante esta técnica se puede realizar automáticamente la división de datos y extracción de variables explicativas, se requiere la ejecución periódica de tres pasos: optimización de condiciones de clasificación de datos, optimización de combinaciones de variables explicativas y eliminación de modelos de predicción innecesarios.

La predicción de energía es un factor clave para reducir desperdicios de energía, en (Ahmad et al., 2017) se evalúa una técnica con redes neuronales artificiales para predecir el consumo de energía en un edificio de 562 habitaciones. Las redes neuronales artificiales tienen la capacidad de modelar relaciones complejas y trabajar con una gran cantidad de entradas causales, en algunos artículos se ha demostrado ser superiores a los modelos de series de tiempo y análisis de regresión. En sistemas de gestión de energía de edificios inteligentes al aplicar redes neuronales no solo se logra reducir el consumo de energía sino también mejora el confort térmico. Como datos de entrada al modelo de red neuronal se consideran: temperatura del aire, temperatura seca ganancia interna, punto de ajuste de calefacción, punto de ajuste de refrigeración, perfil de la planta, humedad relativa y número de personas, como parámetro de desempeño de la red se utiliza el parámetro del error cuadrático medio (MSE) y para el entrenamiento se utiliza el algoritmo de descenso de gradiente. (Ahmed, Mohamed, & Shareef, 2017) utiliza una red neuronal artificial de tipo “**feedforward**” con algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt para predecir el estado óptimo de encendido-apagado de cuatro tipos de carga de

electrodomésticos que son: aire acondicionado, calentador de agua eléctrico, lavadora y refrigeradora, siendo estas las cargas de mayor consumo en una residencia. Las entradas del modelo son: temperatura en la habitación, temperatura del agua a calentar, demanda eléctrica y consumo total de potencia. La evaluación de desempeño del modelo se realiza en términos del consumo de energía y ahorro energético del hogar. Como restricción del modelo se considera la demanda máxima permitida, según este valor se configura el arreglo para encendido por periodos del resto de cargas operando así dentro del valor límite de demanda, con esta configuración se propone un ahorro de consumo de potencia de 3.08% por cada 5 horas.

En (Barsoum, Yiin, Ling, & Goh, 2008) se realiza el modelado de sistemas autónomos con fuentes de biomasa y energía solar, el objetivo es obtener un sistema confiable con la optimización de los componentes y mejora del costo capital. El sistema de energías renovables pretende suministrar 200kW de potencia a un sector rural. El modelo de la biomasa consta de caldera, turbina de vapor y generador. Se requieren de 8.33 ton/h de desechos de madera, 25 ton/h de agua para producir 5MW de potencia. La producción de energía fotovoltaica depende mucho de las condiciones climáticas, en cambio el generador de biomasa podría suministrar energía constante independiente del clima.

## **1.8 Software para Optimización**

### **MATLAB**

El software de Matlab permite analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos computacionales, su lenguaje de programación expresa directamente las matemáticas de matrices y arreglos. Matlab además de la programación por código, incorpora la herramienta Simulink que no requiere de código sino de programación por bloques y las interfaces gráficas de usuario (GUI) que convierten los scripts en aplicaciones simples donde se pueden ingresar parámetros mediante menús desplegables, botones y campos de edición. En Matlab también se pueden tomar datos en tiempo real utilizando sensores y tarjetas de adquisición de datos.

Existe una gran cantidad de funciones para varias ramas de las matemáticas como álgebra lineal, cálculo diferencial e integral, ecuaciones diferenciales,

optimización, modelos de aprendizaje automático y redes neuronales. El software también incorpora toolboxes que son herramientas gráficas que están totalmente documentadas y el usuario a través de la interfaz, va configurando los parámetros del sistema que va a modelar o simular.

Algunas de las prestaciones de Matlab son: análisis de datos, creación de gráficas sofisticadas, desarrollo de algoritmos, se puede conectar con hardware externo, se utiliza en conjunto con otros lenguajes como Python, C/C+, fortran y java, se pueden realizar cálculos a gran escala con GPU y ejecución de entornos de nube (Mathworks, 2021).

El software de Matlab será utilizado como herramienta de desarrollo para el modelo de optimización, los recursos que se emplean del software son:

- **Optimization Toolbox™**: Contiene algunos algoritmos de optimización como programación lineal (LP), programación cuadrática (QP), programación lineal entera mixta (MILP), programación no lineal (NLP), entre otros (Mathworks, 2021). Esta toolbox permite realizar el diseño de modelos de optimización, estimación y ajuste de parámetros y selección de componentes. En el caso del proyecto se utiliza en algoritmo de programación lineal entera mixta (MILP).
- **SCIP**: Es un solucionador de programación de enteros mixtos y solucionador global no lineal. Comprende un conjunto de paquetes de software complementarios para modelar y resolver varios problemas de optimización matemática (Maher et al., 2021), los más importantes, programación lineal de enteros mixtos (MILP) y programación no lineal de enteros mixtos (MINLP), también se utiliza para resolver programas de enteros de restricción (CIP). Los complementos predeterminados incluidos en la librería SCIP proporciona herramientas para resolver problemas de programación de restricciones y optimización pseudobooleana, por defecto vienen instalados varios complementos para lograr un buen rendimiento, los usuarios también pueden crear nuevos complementos.

SCIP usa envolventes convexas para funciones univariadas conocidas, cortes de linealización para restricciones convexas y relajación clásica de McCormick, todas estas separadas dinámicamente (Vigerske & Gleixner, 2018). La fuerza de SCIP está en la integración de componentes lineales y no

lineales en el ciclo de resolución principal con técnicas de vanguardia disponibles para los problemas de algoritmos MILP y MINLP.

- **YALMIP:** Es una herramienta diseñada por terceros que se ejecuta en el entorno de Matlab y contiene algunos solucionadores para optimización, esto resulta muy conveniente para resolver problemas de optimización con los algoritmos MILP y MINLP. YALMIP detecta automáticamente el tipo de problema definido por el usuario y selecciona un solucionador adecuado basándose en el análisis de problema planteado. En caso de no existir un solucionador adecuado, YALMIP intenta convertir el problema para poder resolverlo (Löfberg, 2004). Como ejemplo, si un usuario define restricciones de segundo orden, pero no existe un solucionador para este tipo, YALMIP convierte las restricciones a LMI (desigualdad de matriz lineal) y resuelve el problema utilizando cualquier solucionador SDP (programación semi-definida).

## **CAPÍTULO 2**

### **2 Materiales y Métodos**

#### **2.1 Tipo y Diseño de Investigación**

En el presente trabajo se recurre al uso de investigación aplicada, esto porque se busca resolver un problema de optimización del consumo energético basado en la mejor selección de diferentes fuentes de generación como: energía de la red, energía solar fotovoltaica, energía eólica y almacenamiento con baterías. El algoritmo de optimización a utilizar es el algoritmo MILP, para su implementación requiere de parámetros de entrada como el perfil de consumo eléctrico de la instalación, perfil de generación solar fotovoltaica, perfil eólico, precios de las distintas tecnologías, vida útil, potencias de unidad base y costos de operación y mantenimiento.

Para la obtención de los perfiles de generación y consumo se utiliza la investigación cuantitativa a fin de procesar los datos de una estación meteorológica ubicada en el campus de la Universidad Estatal de Milagro.

A fin de hallar los precios de las tecnologías, vida útil, costos de operación y mantenimiento, se utiliza la investigación descriptiva que consiste en la búsqueda de información de investigaciones preliminares en cuanto a los costos y equipos disponibles para la generación con fuentes de energías renovables.

#### **2.2 Obtención de Perfiles de Generación y Consumo**

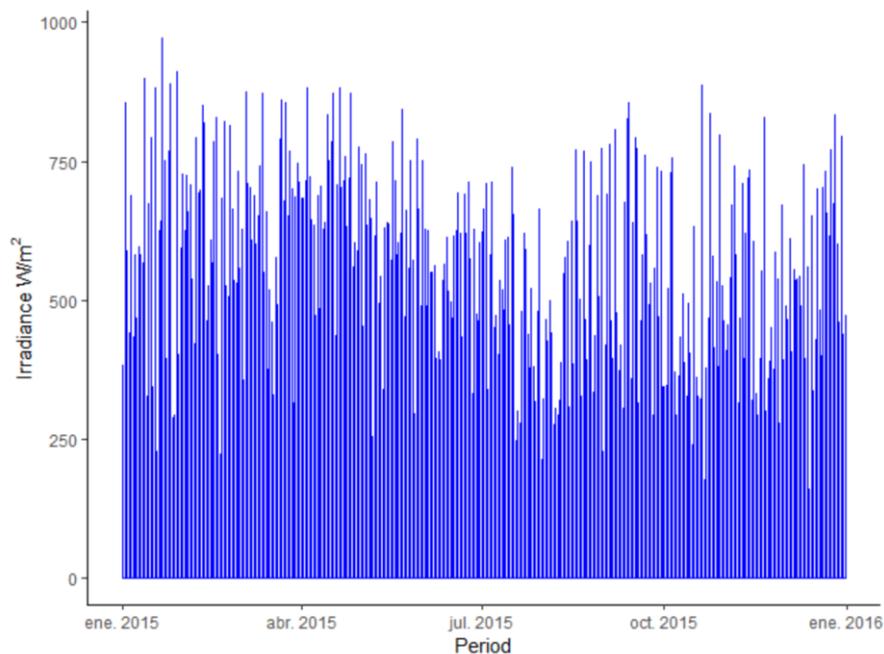
Como ya se ha manifestado anteriormente, una vez recolectada la información de la estación meteorológica ubicada en el campus de la Universidad Estatal de Milagro (2.150,-79.60), se ha realizado un análisis de calidad de datos, determinando el año 2015 como el año base para el presente estudio. Con el fin de normalizar los datos meteorológicos obtenidos, se ha considerado la agregación de perfiles mensuales para las variables de irradiación solar y velocidad media del viento, que al ser recursos que poseen energía primaria intermitente, no es posible su gestión al momento de requerir de ésta energía en un instante determinado, como por ejemplo la tecnología solar fotovoltaica en horas de la noche.

### 2.2.1 Perfil Solar

El perfil solar puede ser empleado tanto como para la estimación real de la cantidad de energía térmica o en este caso fotovoltaica. Si se considera la producción de energía termosolar, es necesario la obtención de un perfil de radiación directa (DNI). Para efectos de este estudio la energía solar térmica no será considerada, debido a que la zona climática en el cantón Milagro requiere de una marcada dependencia de refrigeración, más no de calefacción, ni tampoco de aplicaciones de Agua Caliente Sanitaria (ACS). La figura (16) representa la variación de la radiación solar global (GHI) a lo largo del año 2015, donde se ve que el período comprendido entre los meses diciembre hasta mayo es el de mayor recurso solar con un índice cercano a los 700 W/m<sup>2</sup>. Por otro lado, los meses de junio a noviembre evidencian menor radiación con un índice medio inferior a los 600 W/m<sup>2</sup>.

**Figura 16**

*Variación de la radiación solar período 2015*



Para un mejor manejo de los datos recolectados de radiación solar global, el perfil anual ha sido agregado en promedios mensuales a lo largo de las 24 horas del día. Resulta importante apreciar en la tabla (8) que, a lo largo de los meses de enero a diciembre, la radiación solar presenta su pico máximo entre las 11:00 y 14:00, siendo este horario el de mejor aprovechamiento para fines de

producción energética. De igual forma se puede observar que no existe variaciones importantes a lo largo del año en los perfiles agregados siendo los meses de mayor y menor radiación, los de abril y agosto respectivamente.

**Tabla 8**

HORA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	5,77	0,00	1,74	10,80	13,26	10,10	0,00	5,87	23,23	31,03	27,17	25,32
7	88,81	57,14	84,68	130,83	127,32	143,87	115,23	138,65	142,63	120,23	104,77	117,61
8	239,87	190,64	221,23	281,37	291,84	256,23	271,48	208,13	263,87	244,00	236,90	258,55
9	374,84	338,32	375,77	440,60	444,68	396,60	323,06	284,00	340,33	360,13	345,93	417,71
10	510,74	467,64	562,84	523,37	575,42	481,97	450,84	399,00	441,93	440,19	454,87	503,87
11	595,00	578,04	634,39	654,33	608,84	542,60	527,74	479,77	589,17	516,84	560,77	570,68
12	543,19	614,07	624,58	706,73	615,68	601,90	540,42	548,23	639,00	554,71	566,40	624,19
13	488,58	625,32	622,61	637,43	551,48	574,07	552,06	578,77	676,63	530,81	587,63	597,13
14	474,13	643,46	525,52	560,27	514,65	553,03	476,32	569,90	616,37	476,16	501,47	535,87
15	351,68	484,50	432,32	404,43	401,29	406,40	395,13	452,06	487,97	360,71	386,80	359,55
16	211,32	282,29	275,39	216,57	193,61	232,23	266,55	306,55	319,70	233,52	230,33	253,55
17	134,68	121,39	122,84	100,10	76,19	100,00	102,58	129,26	111,17	71,97	68,00	106,23
18	0,52	4,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

*Agregación de perfiles mensuales radiación Milagro (W/m2)*

Fuente: Elaboración propia

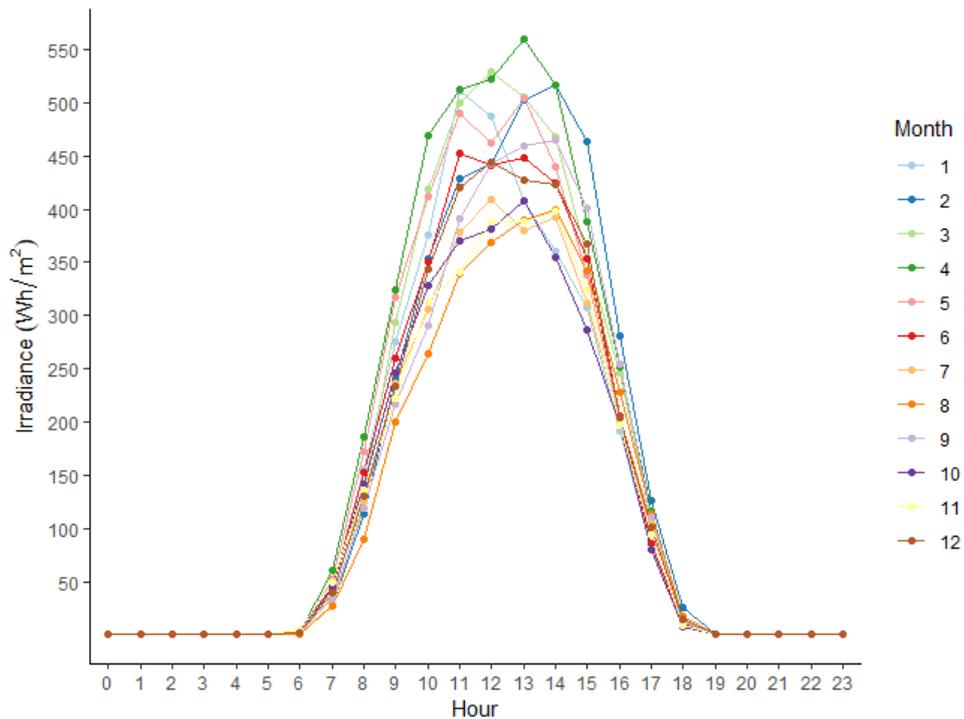
A partir de la información obtenida en los perfiles mensuales de radiación solar, resulta pertinente indicar que, se pueden distinguir dos condiciones estacionales según el criterio de temporalidad, donde por un lado aparece un período invernal marcado por lluvias que comprende los meses de diciembre a mayo y por otra parte el período seco, conformado por los meses de junio a diciembre. De esta forma es posible agregar nuevos perfiles, considerando la época seca y lluviosa, los cuales podrán resumir el comportamiento del potencial del recurso solar a lo largo de un año tipo.

En la figura (16) se puede observar la variación de la agregación mensual en perfiles horarios, donde el mes de abril representa el de mayor radiación, frente al mes de agosto, que evidencia un menor aprovechamiento del recurso solar.

También se puede distinguir que el horario de horas de radiación empieza desde las 6:00 AM y concluye alrededor de las 18:00 PM, donde el mayor aprovechamiento se da en los picos comprendidos entre las 11:00 AM y las 14:00 PM.

**Figura 17**

*Variación horaria de perfiles de radiación mensual*

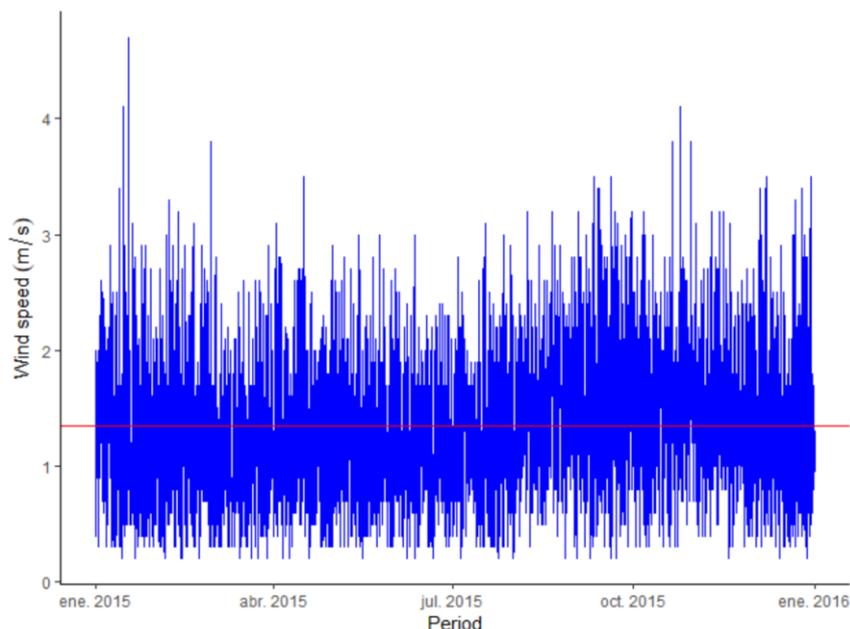


### 2.2.2 Perfil Eólico

El recurso eólico a nivel global, no suele ser aprovechado de acuerdo a su potencial energético, debido a su alta variabilidad en intervalos de tiempo cortos y su difícil predicción a largo plazo, muy sensible a las condiciones de rugosidad y orografía del emplazamiento. Las mediciones han sido recolectadas a una altura de 20m sobre el nivel del suelo, con edificios circundantes, árboles y obstáculos cercanos, lo cual ha de incidir en su perfil vertical. La figura (17) representa la variación del recurso eólico en la estación meteorológica de la Universidad Estatal de Milagro en el año 2015, donde su comportamiento se observa más o menos constante a lo largo de este período, con una media inferior a la velocidad de 1.5 m/s.

**Figura 18**

*Variación de la velocidad del viento, período 2015*



De manera análoga a lo efectuado para la obtención del perfil solar, los datos de velocidad del viento han sido agrupados de forma mensual en las 24 horas del día. La tabla 9 representa los valores de los perfiles obtenidos en la agregación mensual, donde se puede distinguir que no existen grandes variaciones a lo largo del año, destacando que los meses de marzo y septiembre representan los meses con menor y mayor velocidad del viento, alcanzando valores que van desde 1,13m/s a 1,53 m/s respectivamente.

**Tabla 9**

*Agregación de perfiles mensuales, velocidad del viento Milagro (m/s)*

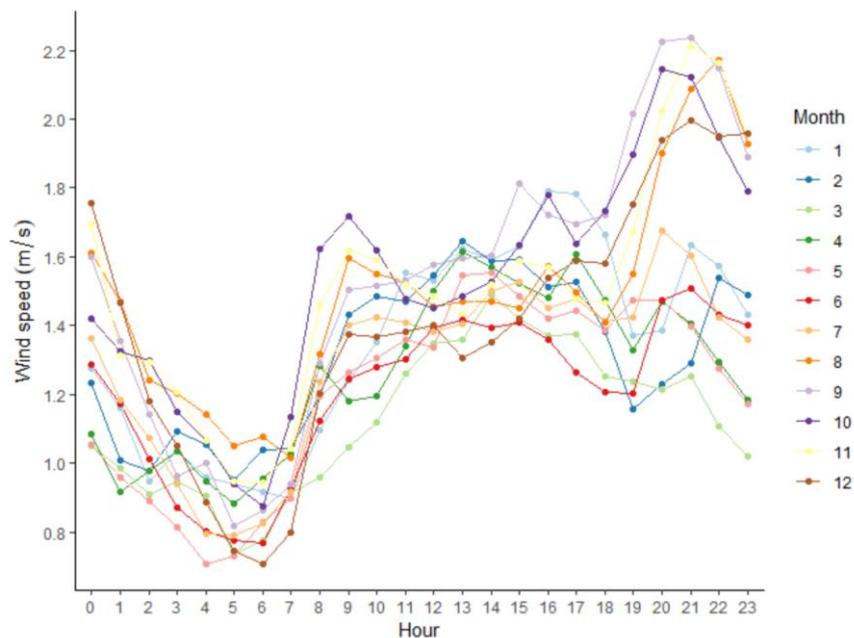
HORA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	1,27	1,24	1,05	1,09	1,05	1,29	1,36	1,61	1,60	1,42	1,70	1,75
1	1,16	1,01	0,99	0,92	0,96	1,17	1,18	1,47	1,36	1,33	1,31	1,47
2	0,95	0,98	0,91	0,98	0,89	1,01	1,07	1,24	1,14	1,30	1,30	1,18
3	1,04	1,09	0,95	1,04	0,81	0,87	0,94	1,20	0,96	1,15	1,21	1,05
4	0,96	1,05	0,91	0,95	0,71	0,80	0,80	1,14	1,00	1,07	1,07	0,89
5	0,94	0,95	0,74	0,88	0,73	0,78	0,79	1,05	0,82	0,94	0,95	0,75
6	0,92	1,04	0,78	0,96	0,83	0,77	0,83	1,08	0,86	0,88	0,94	0,71
7	0,90	1,04	0,91	1,03	0,90	0,93	0,92	1,02	0,94	1,14	1,04	0,80
8	1,10	1,20	0,96	1,28	1,20	1,12	1,24	1,32	1,29	1,62	1,46	1,20
9	1,24	1,43	1,05	1,18	1,26	1,25	1,40	1,60	1,50	1,72	1,62	1,37
10	1,35	1,49	1,12	1,20	1,31	1,28	1,42	1,55	1,52	1,62	1,59	1,37
11	1,55	1,47	1,26	1,34	1,36	1,30	1,41	1,53	1,53	1,48	1,52	1,38
12	1,53	1,55	1,35	1,50	1,34	1,39	1,38	1,45	1,58	1,45	1,49	1,40

13	1,62	1,65	1,36	1,61	1,55	1,42	1,41	1,47	1,60	1,48	1,44	1,31
14	1,59	1,59	1,49	1,57	1,55	1,39	1,50	1,47	1,60	1,53	1,52	1,35
15	1,63	1,59	1,42	1,52	1,49	1,41	1,53	1,45	1,81	1,63	1,59	1,42
16	1,79	1,51	1,37	1,48	1,42	1,36	1,45	1,57	1,72	1,78	1,57	1,54
17	1,78	1,53	1,37	1,61	1,45	1,26	1,48	1,50	1,69	1,64	1,48	1,59
18	1,66	1,38	1,25	1,47	1,39	1,21	1,41	1,41	1,72	1,73	1,47	1,58
19	1,37	1,16	1,24	1,33	1,47	1,20	1,42	1,55	2,02	1,90	1,67	1,75
20	1,39	1,23	1,22	1,47	1,47	1,47	1,67	1,90	2,23	2,15	2,02	1,94
21	1,63	1,29	1,25	1,41	1,40	1,51	1,60	2,09	2,24	2,12	2,21	2,00
22	1,57	1,54	1,11	1,29	1,27	1,43	1,43	2,17	2,15	1,95	2,16	1,95
23	1,43	1,49	1,02	1,18	1,17	1,40	1,36	1,93	1,89	1,79	1,95	1,96

Así mismo la representación de los perfiles mensuales en su variación a lo largo del día, se puede evidenciar en la figura (18) donde se denota un perfil característico del comportamiento del viento a lo largo del día, para cada mes del año. Resulta visible que a partir de las 00:00 la velocidad experimenta una depresión que se mantiene hasta las 06:00, registrando un incremento hasta alrededor de las 10:00, donde en el rango de 11:00 a 18:00 se generan importantes fluctuaciones, para luego encontrar su cresta máxima entre las 19:00 y 23:00.

**Figura 19**

*Variación horaria de perfiles de velocidad del viento*

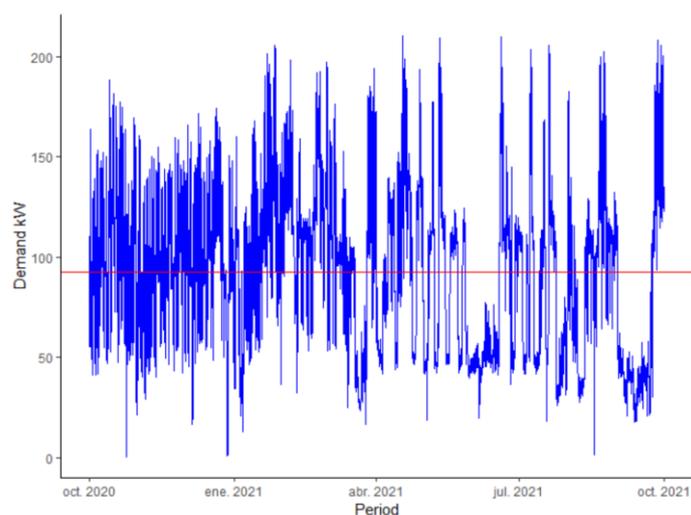


Como se ha visto, la evaluación de los recursos de origen renovable, no convencionales, en este caso, son recursos intermitentes, de elevada incertidumbre, su incorrecta cuantificación y predicción podría conllevar a la

selección de tecnologías poco idóneas en la producción energética, criterio de crucial importancia al momento de ejecutar proyectos donde el componente económico podría condicionar el éxito o fracaso del mismo.

### **2.2.3 Perfil de Consumo**

Una vez se han evaluado los recursos intermitentes de generación renovable, los cuales serán los encargados de cubrir parte de la demanda energética, que, para el presente estudio, representa una fábrica de balanceado ubicada en la Vía Virgen de Fátima Km26, con coordenadas [-2.212572, -79.633547]; edificación donde se ejecutan actividades de producción de alimento para camarón y pez. Para ello, resulta necesario caracterizar la demanda energética, en perfiles estacionales tal y como han sido obtenidos los perfiles de generación, descritos anteriormente. Para el efecto se ha utilizado el medidor **ION8650 de Schneider Electric**, entre sus aplicaciones están: control de demanda y factor de potencia, monitoreo de co-generación, análisis de calidad de energía, restricción de carga, monitoreo y control de equipos. Las características principales del equipo son: supervisión de cumplimiento de calidad de energía, registro digital de fallas, protocolos de comunicación Modbus, medición de energía y valores de demanda de periodos de tiempo con requisitos de facturación específicos, múltiples puntos de ajuste para funciones de alarma y control, resumen de calidad de energía y compensación de pérdida línea/transformador. La información del consumo ha sido obtenida en datos quince-minutales, los cuales han sido transformados a medias horarias. Las mediciones han sido tomadas desde el primero de enero de 2020 al 31 de diciembre del mismo año. La figura (19) representa la variación en el consumo energético de la empresa de Balanceado a lo largo del año, aquí se destaca que el consumo medio anual de esta edificación industrial es cercano a los 100 kW.

**Figura 20***Demanda anual energía eléctrica Fabrica de Balanceado*

Para la agregación mensual de los perfiles de consumo de forma estacional, se ha mantenido la variación a lo largo de las 24h del día. La tabla (10) resume la agregación mensual de enero a diciembre y su comportamiento, siendo los meses de febrero y septiembre los de mayor y menor consumo con una media de 119,35 kW y 67,5 kW respectivamente.

**Tabla 10***Agregación mensual de consumo eléctrico Fabrica de balanceado.*

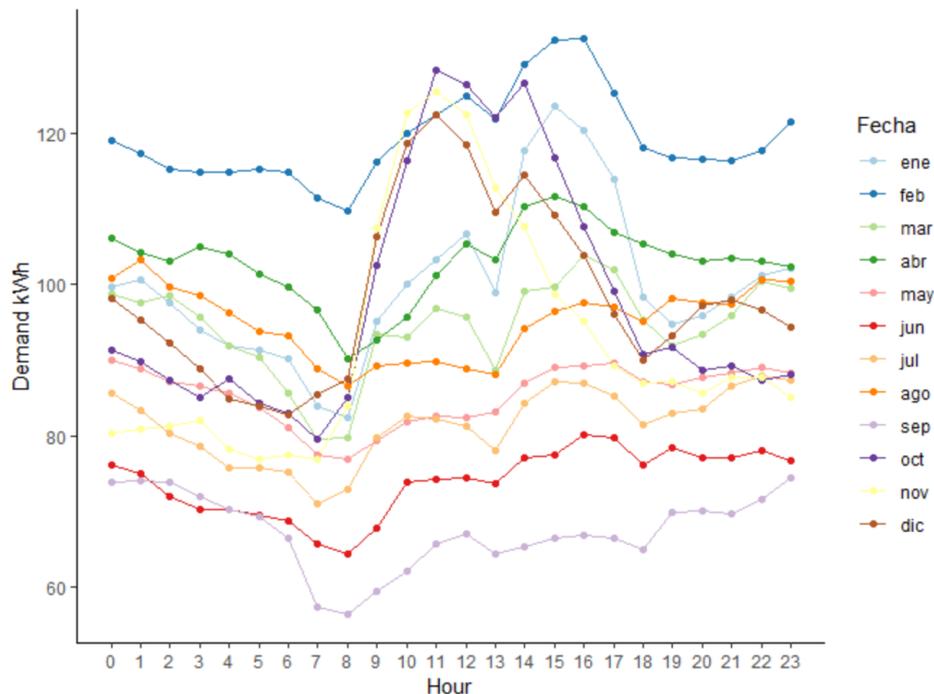
HORA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0	99,78	119,08	98,68	106,17	90,06	76,23	85,69	100,94	73,98	91,45	80,46	98,11
1	100,75	117,32	97,64	104,17	88,89	75,16	83,48	103,37	74,09	89,81	81,03	95,44
2	97,61	115,27	98,62	103,17	87,22	72,05	80,40	99,76	73,92	87,32	81,27	92,41
3	93,96	114,80	95,81	105,04	86,67	70,31	78,75	98,48	72,11	85,07	82,16	88,88
4	91,95	114,87	92,01	104,00	85,66	70,29	75,91	96,23	70,30	87,63	78,35	84,96
5	91,33	115,28	90,46	101,45	83,72	69,66	75,84	93,85	69,42	84,38	77,04	84,04
6	90,18	114,83	85,77	99,78	81,06	68,85	75,24	93,21	66,47	83,02	77,61	82,92
7	83,94	111,52	79,55	96,77	77,61	65,72	71,09	88,91	57,48	79,54	76,90	85,43
8	82,49	109,68	79,76	90,19	76,90	64,54	72,94	86,70	56,41	85,13	83,97	87,52
9	95,08	116,12	93,47	92,71	79,38	67,83	79,84	89,33	59,52	102,47	107,51	106,43
10	100,01	119,92	93,10	95,71	81,95	73,86	82,73	89,74	62,16	116,46	122,58	118,67
11	103,28	122,47	96,86	101,14	82,67	74,29	82,20	89,87	65,74	128,34	125,55	122,47
12	106,79	124,86	95,70	105,37	82,51	74,50	81,29	88,84	67,16	126,53	122,39	118,47
13	99,04	121,90	88,62	103,35	83,15	73,77	78,17	88,22	64,38	122,03	112,74	109,62
14	117,81	129,09	99,07	110,32	86,96	77,11	84,37	94,28	65,45	126,67	107,77	114,48
15	123,67	132,38	99,78	111,67	89,19	77,52	87,16	96,50	66,52	116,71	98,67	109,25
16	120,29	132,54	103,90	110,28	89,38	80,19	87,00	97,58	67,01	107,71	95,12	103,85

17	114,02	125,39	101,93	106,83	89,70	79,76	85,33	97,12	66,57	99,10	89,30	96,08
18	98,34	118,07	95,44	105,37	87,29	76,15	81,46	95,15	65,08	90,75	86,97	90,04
19	94,78	116,81	92,02	104,05	86,85	78,40	83,08	98,20	70,01	91,68	87,25	93,36
20	95,94	116,54	93,44	103,04	87,75	77,23	83,69	97,69	70,21	88,73	85,64	97,20
21	98,42	116,31	95,91	103,58	88,41	77,14	86,60	97,53	69,85	89,23	87,85	98,05
22	101,17	117,65	100,45	103,08	89,15	78,15	87,98	100,72	71,57	87,37	87,76	96,59
23	102,12	121,60	99,48	102,37	88,30	76,77	87,44	100,51	74,57	88,19	85,18	94,45

La grafica (20) representa el perfil del consumo de cada mes a lo largo de las 24h. Aquí resulta visible que entre las 00:00 y las 06:00 el consumo permanece relativamente constante, donde existe una eventual reducción de consumo entre las 06:00 y 08:00, a partir de esta hora la curva presenta algunas fluctuaciones hasta las 13:00 aproximadamente, donde empieza el pico de consumo máximo entre las 14:00 y 17:00 aproximadamente, a partir de este momento, y hasta las 23:00, el consumo es más o menos constante.

**Figura 21**

*Demanda estacional Fabrica de Balanceado.*



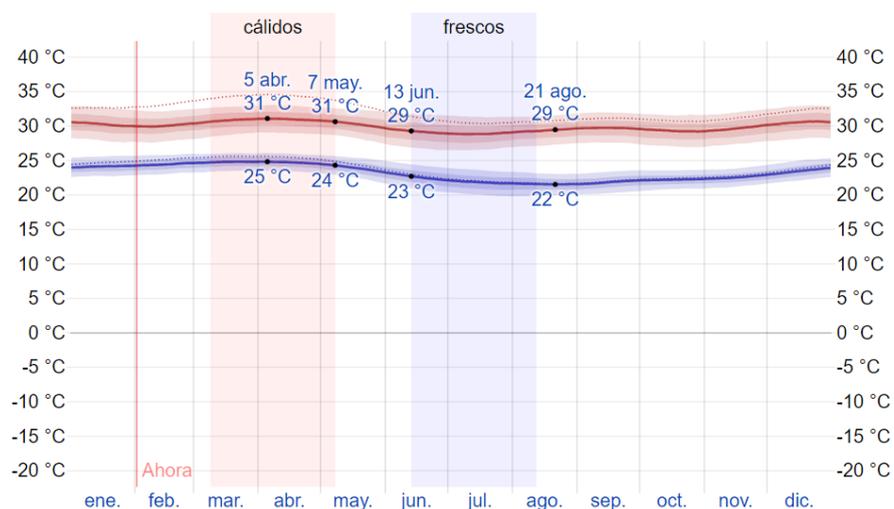
### 2.3 Datos de Clima Promedio en Milagro-Guayas

De acuerdo a la información en el portal web (Weatherspark, 2022) la temperatura a lo largo del año está en el rango de 22°C a 31 °C. Los meses más calurosos son marzo, abril y mayo, siendo abril el mes más cálido. La temporada

fresca corresponde a los meses de junio, julio y agosto. El mes más despejado corresponde a agosto y los meses más nublados van de octubre a mayo.

**Figura 22**

*Temperatura promedio anual en la ciudad de Milagro-Ecuador*

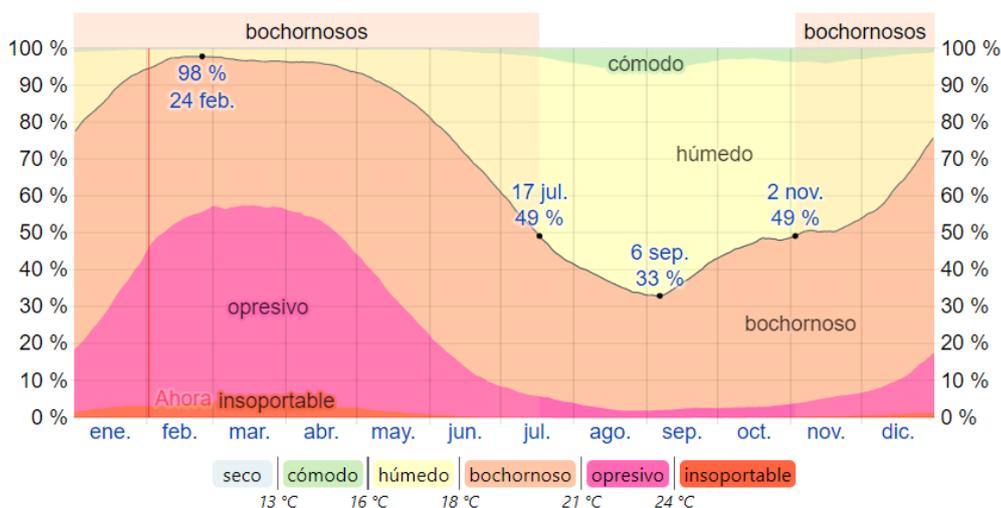


Fuente: (Weatherspark, 2022)

En la ciudad de Milagro, la duración del día está en promedio de 12 horas, sin variaciones considerables durante el año. La humedad varía extremadamente, tal como se muestra en la figura 22.

**Figura 23**

*Humedad relativa en la ciudad de Milagro-Ecuador*



Fuente: (Weatherspark, 2022)

## 2.4 Algoritmo MILP

Se pretende incorporar un sistema de almacenamiento que sirva como apoyo al suministro eléctrico, cuando sea necesario y demandado, a su vez las baterías posibilitan almacenamiento del resto de energía, para dárselo a la reserva cuando se requiera.

Así se describe el **coste anual para el suministro energético** de forma general:

$$F = (z, x) \quad (13)$$

Donde:

- **z**: Muestra potencia instalada de las fuentes.
- **x**: Representa la producción energética en el año.

Representación de minimización de coste:

$$\min_{z,x} F(z, x) \quad (14)$$

Teniendo en cuenta las condiciones económicas la respuesta para minimizar el coste anual son dadas por las variables  $z^*$  y  $x^*$ .

Con el propósito de reducir los costos que encierra la inversión y los valores de producción, la Agencia Internacional de la Energía tiene una metodología que usa los costos fijos y variables, mismos que dependen de la tecnología que se vaya a instalar

**Costos fijos:** Inversión inicial de todas las fuentes (anual).

**Costos variables:** Producción dada por las fuentes, costos en combustibles, operación y mantenimiento.

$$\text{Costos fijos} + \text{Costos variables} = \text{Función de coste}$$

### 2.4.1 Función Coste

$$F(z, x) = F_t(z_t, x_t) + F_e(z_e, x_e) + F_b(x_b, x_b) \quad (15)$$

Donde:

- $F_e, F_t, F_b$ : Hacen referencia al coste eléctrico, térmico y baterías.
- $z_e$  y  $z_t$ : Potencia eléctrica y térmica que se va a instalar.

- $z_b$ : Son las baterías que se instalarán en función de su capacidad.
- $x_e, x_t, x_b$ : Describen la obtención de las fuentes eléctricas, térmicas y de baterías.
- 

### 2.4.2 Coste Térmico

Es dado mediante la suma de las fuentes de generación térmica así:

$$F_t(z_t, x_t) = F_t^{tsol}(z_t^{tsol}, x_t^{tsol}) + F_t^{Cald}(z_t^{cald}, x_t^{clad}) + F_t^{bomb}(z_t^{bomb}, x_t^{bomb}) + F_t^{cog}(z_t^{cog}, x_t^{cog}) \quad (16)$$

Donde:

- $F_t^{tsol}$ : función de costo de la fuente termosolar.
- $F_t^{Cald}$ : función de costo de la fuente de caldera de gas.
- $F_t^{bomb}$ : función de costo de la fuente bomba de calor.
- $F_t^{cog}$ : función de costo de la fuente de cogeneración térmica.

### 2.4.3 Fuente Termosolar

$$F_t^{tsol}(z_t^{tsolar}, x_t^{tsol}) = z_t^{tsol} u_t^{tsol} \frac{i_t^{tsol}}{v_t^{tsol}} + 365 x_t^{tsol} p_t^{tsol} \quad (17)$$

Donde los costos fijos son:

- $z_t^{tsol}$ : Número de unidades eléctricas a instalar de la fuente termosolar.
- $u_t^{tsol}$ : Potencia de toda unidad.
- $i_t^{tsol}$ : Costo de inversión de la fuente.
- $v_t^{tsol}$ : Vida útil de la tecnología(años).

Donde los costos variables:

- $x_t^{tsol}$ : Producción térmica dada por la fuente solar durante todo el día (24h).
- $p_t^{tsol}$ : Precio de la producción.

#### 2.4.4 Caldera de Gas

$$F_t^{cald}(z_t^{cald}, x_t^{cald}) = z_t^{cald} u_t^{cald} \frac{i_t^{cald}}{v_t^{cald}} + 365 x_t^{cald} p_t^{cald} \quad (18)$$

Costos fijos donde:

- $z_t^{cald}$ : Unidades de calderas que se instalaran.
- $u_t^{cald}$ : Potencia de las calderas.
- $i_t^{cald}$ : Inversión inicial.
- $v_t^{cald}$ : Años de vida útil.

Costos variables:

- $x_t^{cald}$ : Producción por horas del día.
- $p_t^{cald}$ : Precio de producir calor.

#### 2.4.5 Bomba de Calor

$$F_t^{bomb}(z_t^{bomb}, x_t^{bomb}) = z_t^{bomb} u_t^{bomb} \frac{i_t^{bomb}}{v_t^{bomb}} + 365 x_t^{bomb} p_t^{bomb} \quad (19)$$

Costos fijos donde:

- $z_t^{bomb}$ : Unidades de bombas de calor a instalar.
- $u_t^{bomb}$ : Potencia de cada bomba.
- $i_t^{bomb}$ : Valor de la inversión.
- $v_t^{bomb}$ : Vida útil en años.

Costos variables:

- $x_t^{bomb}$ : Producción de la bomba.
- $p_t^{bomb}$ : Precio de producir energía calórica.

#### 2.4.6 Cogeneración

Es quien aporta el calor como electricidad, en la parte térmica se define como:

$$F_t^{cog}(z_t^{cog}, x_t^{cog}) = z_t^{cog} u_t^{cog} \frac{i_t^{cog}}{v_t^{cog}} + 365 x_t^{cog} p_t^{cog} \quad (20)$$

Donde:

- $z_t^{cog}$ : Los costes fijos.
- $u_t^{cog}$ : El número a instalar de fuentes de cogeneración.
- $v_t^{cog}$ : Los años de vida útil de la tecnología.
- $x_t^{cog}$ : Es la generación de calor durante las 24 horas del día.
- $p_t^{cog}$ : El precio de la producción.

Límite inferior del número de tecnología de cogeneración a instalar.

$$z_t^{cog} \geq 0 \quad (21)$$

Límite inferior de generación térmica de cogeneración.

$$x_t^{cog} \geq 0 \quad (22)$$

Límite superior de producción de cogeneración.

$$x_t^{cog} \leq r_t^{cog} z_t^{cog} u_t^{cog} \quad (23)$$

Los límites 9 y 10 son el número de unidades a instalar y los productos entregados deben cumplir parte de los requisitos térmicos del edificio. Por otro lado, la restricción 11 propone un nuevo elemento  $r_t^{cog}$ , que representa la ratio entre el aporte de calor y la producción, que se complementará con  $r_e^{cog}$  en la parte eléctrica, que representa la relación entre el aporte de energía y la producción, y debe cumplirse:

$$r_t^{cog} + r_e^{cog} = 1 \quad (24)$$

#### 2.4.7 Coste Eléctrico

El costo eléctrico y el costo del calor también vienen dados por la suma de diferentes fuentes de generación de energía, y sus funciones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$F_e(z_e, x_e) = F_e^{pv}(z_e^{pv}, x_e^{pv}) + F_e^{aero}(z_e^{aero}, x_e^{aero}) + F_e^{red}(z_e^{red}, x_e^{red}) + F_e^{cog}(z_e^{cog}, x_e^{cog}) \quad (25)$$

Donde:

- $F_e^{pv}$ : Función de coste fuente fotovoltaica.
- $F_e^{aero}$ : Función de coste fuente de aerogenerador.
- $F_e^{red}$ : Función de coste fuente de red.
- $F_e^{cog}$ : Función de coste fuente de cogeneración.

A continuación, describiremos estas fuentes.

#### 2.4.8 Fuente Fotovoltaica

Esta función de coste se la podría definir de la siguiente manera:

$$F_e^{pv}(z_e^{pv}, x_e^{pv}) = z_e^{pv} u_e^{pv} \frac{i_e^{pv}}{v_e^{pv}} + 365 x_e^{pv} p_e^{pv} \quad (26)$$

Donde:

- $z_e^{pv}$ : Costes fijos de la función coste.
- $u_e^{pv}$ : Unidades a instalar de tecnología fotovoltaica.
- $i_e^{pv}$ : La potencia de cada unidad.
- $v_e^{pv}$ : El costo de inversión de la fuente fotovoltaica.
- $x_e^{pv}$ : Costes variables de la función coste.
- $p_e^{pv}$ : Producción eléctrica que genera la fuente fotovoltaica a lo largo del día (horas).

Teniendo en cuenta las limitaciones de la función de coste eléctrico de las fuentes de energía fotovoltaica descritas (25), el límite inferior de la función de coste se define como:

$$z_e^{pv} \geq 0 \quad (27)$$

El límite inferior de la producción de fuente fotovoltaica:

$$x_e^{pv} \geq 0 \quad (28)$$

El límite superior de la fuente solar fotovoltaica:

$$x_e^{pv} \leq z_e^{pv} u_e^{pv} \quad (29)$$

Donde 27 y 28 dividen respectivamente la cantidad instalada de tecnología fotovoltaica y la energía suministrada, que satisfará la demanda eléctrica del edificio, y está limitada por la fuente de la potencia total instalada de los paneles solares que constituyen la energía fotovoltaica (29).

#### 2.4.9 Aerogenerador

Se parece a la fuente fotovoltaica y se define la función coste de la siguiente manera:

$$F_e^{aero}(z_e^{aero}, x_e^{aero}) = z_e^{aero} u_e^{aero} \frac{i_e^{aero}}{v_e^{aero}} + 365 x_e^{aero} p_e^{aero} \quad (30)$$

Donde:

- $z_e^{aero}$ : Unidades a instalar de aerogeneradores.
- $u_e^{aero}$ : La potencia de cada sistema
- $i_e^{aero}$ : El coste de la inversión inicial.
- $v_e^{aero}$ : La vida útil del aerogenerador.
- $x_e^{aero}$ : La producción del día (horas).
- $p_e^{aero}$ : El valor que se considera en la producción.

La restricción de la función de costes (30) también se define como el límite inferior del número de aerogeneradores que se instalarán. Este límite puede expresarse de la siguiente manera:

$$z_e^{aero} \geq 0 \quad (31)$$

El límite inferior de la producción:

$$x_e^{aero} \geq 0 \quad (32)$$

El límite superior de la producción de la fuente de generación eólica:

$$x_e^{aero} \leq z_e^{aero} u_e^{aero} \quad (33)$$

#### 2.4.10 Red

El soporte de red en este análisis define la función de costo de la misma manera que las fuentes descritas anteriormente, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

$$F_e^{red}(z_e^{red}, x_e^{red}) = z_e^{red} u_e^{red} \frac{i_e^{red}}{v_e^{red}} + 365 x_e^{red} p_e^{red} \quad (34)$$

- $z_e^{red}$ : Unidades de red a contratar.
- $u_e^{red}$ : La potencia de cada unidad en control.
- $i_e^{red}$ : El precio de la potencia contratada.
- $v_e^{red}$ : La vida útil de la red.
- $x_e^{red}$ : La producción del día (horas).
- $p_e^{red}$ : El coste del servicio prestado por la red.

El límite de la red se expresa por el límite inferior de la unidad de red a contratar, siendo:

$$z_e^{red} \geq 0 \quad (35)$$

De manera similar, el límite inferior de la contribución de la red a la demanda de edificios está determinado:

$$x_e^{red} \geq 0 \quad (36)$$

Finalmente, el límite que define el límite superior de la energía eléctrica proporcionada por la red viene dado de la siguiente manera:

$$x_e^{red} \leq z_e^{red} u_e^{red} \quad (37)$$

En este punto del estudio, se indica precisamente que solo se considera el aporte de potencia unidireccional de la red, es decir, no existe un sistema de inyección de potencia. Sin embargo, de ser necesario, se pueden agregar restricciones simples para permitir la potencia bidireccional, al suministro tanto de consumo como de apoyo a la red eléctrica.

#### 2.4.11 Cogeneración Eléctrica

En el caso de cogeneración eléctrica, solo se considera el costo variable de producción de electricidad, porque el costo fijo de la inversión inicial se ha considerado en la parte térmica de la ecuación 8, por lo que la expresión de electricidad se puede definir a partir de la térmica como:

$$F_e^{cog} = 365 \frac{x_t^{cog}}{r_t^{cog}} r_e^{cog} p_t^{cog} \quad (38)$$

Donde:

- $x_t^{cog}$ : La producción térmica de la fuente de cogeneración.
- $r_t^{cog}$ : La ratio de producción térmica.
- $r_e^{cog}$ : La ratio de conversión eléctrica.
- $p_t^{cog}$ : El precio de producción térmica de la fuente de cogeneración.

### 2.4.12 Coste e Batería

La función de coste de la batería está asociada con la parte eléctrica del algoritmo de optimización, pero para una mejor comprensión, se analiza por separado, siendo:

$$F_b(z_b, x_b) = z_b u_b \frac{i_b}{v_b} + 365 x_b^{des} p_b^{des} + 365 x_b^{car} p_b^{car} \quad (39)$$

Donde:

El primer término costes fijos de inversión.

- $z_b$ : El número de baterías a instalar.
- $u_b$ : La capacidad de la batería.
- $i_b$ : La inversión inicial de la batería.
- $v_b$ : La vida útil.

El segundo término costes de variables de descarga o suministro de la batería.

- $x_b^{des}$ : La potencia de descarga de la batería.
- $p_b^{des}$ : El precio eléctrico de descarga.

El tercer término el coste de la cantidad de energía consumida para la carga de batería.

- $x_b^{car}$ : La potencia de carga de la batería.
- $p_b^{car}$ : El precio eléctrico de carga.

Teniendo en cuenta que el límite inferior del número de unidades de capacidad a instalar viene dado por:

$$z_e^{bat} \geq 0 \quad (40)$$

### 2.4.13 Balance Energético.

La producción de energía considerada en este análisis debe cubrir el consumo requerido por el edificio más las pérdidas anuales, por lo que la función de balance energético tiene como objetivo mantener el balance generación-demanda de energía al menor costo posible. La función de la energía térmica y el balance de energía eléctrica se describe a continuación:

### 2.4.13.1 Balance Térmico

La demanda térmica del edificio debe ser satisfecha por la energía producida por cada fuente de calor, expresada por la siguiente expresión:

$$d_t^{edif} = x_t^{tsol} + x_t^{cald} + x_t^{bomb} + x_t^{cog} \quad (41)$$

Donde:

- $d_t^{edif}$ : El perfil de demanda térmica del edificio conformado por la suma de:
- $x_t^{tsol}$ : Producción de fuente térmica termosolar.
- $x_t^{cald}$ : Producción de fuente térmica caldera de gas.
- $x_t^{bomb}$ : Producción de fuente térmica bomba de calor.
- $x_t^{cog}$ : Producción de fuente térmica cogeneración.

### 2.4.13.2 Balance Eléctrico

Por otro lado, la producción de energía que cubre la demanda eléctrica del edificio se puede expresar como:

$$d_e^{edif} + x_e^{bomb} = x_e^{pv} + x_e^{aero} + \frac{x_t^{cog}}{r_t^{cog}} r_e^{cog} + x_e^{red} + x_b^{car} + x_b^{des} \quad (42)$$

Donde:

- $d_e^{edif}$ : El perfil de demanda eléctrica del edificio conformado por la suma de:
- $x_e^{pv}$ : Producción de fuente fotovoltaica.
- $x_e^{aero}$ : Producción de fuente eólica.
- $\frac{x_t^{cog}}{r_t^{cog}} r_e^{cog}$ : Producción cogeneración eléctrica.
- $x_e^{red}$ : Producción de fuente de red.
- $x_b^{car}$ : La potencia de carga de la batería.
- $x_b^{des}$ : La potencia de descarga de la batería.
- $x_e^{bomb}$ : El consumo de energía eléctrica de la bomba.

## 2.5 Equipos y Materiales

A continuación, se describen los equipos a utilizar en la instalación modo red, generación distribuida con fuentes de energías renovables:

**Tabla 11**

*Especificaciones y parámetros de operación Panel eléctrico.*

<b>Modelo</b>	Q PEAK DUO L-G8.3 415-430
<b>Dimensiones</b>	2080mm x 1030mm x 35mm
<b>Tipo de célula</b>	Mono-cristalinas
<b>Potencia</b>	430W
<b>Corriente de cortocircuito (Isc)</b>	10.83A
<b>Tensión en circuito Abierto</b>	49.33 A
<b>Corriente en MPP (I<sub>MPP</sub>)</b>	10.31 A
<b>Tensión en MPP (V<sub>MPP</sub>)</b>	41.7 V
<b>Eficiencia</b>	>=20.1%

Fuente: (Energía\_Estratégica, 2022)

**Tabla 12**

*Especificaciones de Batería de Plomo ácido.*

<b>Modelo</b>	KG12-200
<b>Dimensiones</b>	L522*W240*H219*TH224 mm
<b>Capacidad (tasa de 10 horas)</b>	200Ah
<b>Vida útil</b>	8 años
<b>Tasa de 20 horas</b>	208Ah
<b>10 horas de</b>	201 Ah
<b>5 horas de</b>	186 Ah
<b>1 hora de</b>	128 Ah
<b>Con 20% de descarga profunda</b>	3000 ciclos

Fuente: (SBS, 2022)

**Tabla 13**

*Especificaciones de Inversor.*

<b>Modelo</b>	FRONIUS PRIMO 15.0-1
<b>Potencia de entrada</b>	18kW
<b>Corriente entrada (MPPT1/MPPT2)</b>	33A/18A
<b>Voltaje de entrada máximo</b>	600V
<b>Voltaje nominal</b>	440V
<b>Potencia de salida</b>	15kW
<b>Corriente máxima de salida</b>	62.5A
<b>Eficiencia</b>	96.5%
<b>Frecuencia</b>	60 Hz

Fuente: (Fronius, 2022)

**Tabla 14***Especificaciones técnicas del Aerogenerador*

<b>Modelo</b>	Smarttwister ST-1000
Funciona con vientos desde 1 m/s alcanzando la potencia nominal a los 7.55m/s	
<b>Número de hélices</b>	1 helicoidal
<b>Imanes</b>	Neodimio
<b>Potencia máxima</b>	1328W
<b>Potencia nominal</b>	1000W
<b>Velocidad</b>	525rpm
<b>Rango de voltaje</b>	0 – 600 Vac
<b>Grado de protección</b>	IP68

Fuente: (Smarttwister, 2022)

## 2.6 Fuentes de Generación Gestionable

Como se indicó en la sección 2.3 en cuanto a los datos del clima en la ciudad de Milagro-Guayas, lugar de ubicación de la fábrica de balanceado, la temperatura está entre 22 y 31°C, por esta razón no existe demanda térmica en la instalación, sino únicamente demanda eléctrica.

En vista de que no se requiere de demanda térmica, se eliminan las fuentes termosolar, cogeneración, caldera de gas y bomba de calor, quedando únicamente la parte eléctrica con las fuentes intermitentes como solar y eólica, para el presente estudio se ha asumido que el mayor rendimiento de las fuentes solar y eólica, estarán disponible en cualquier instante y mes del año.

Las fuentes solar y eólica se utilizarán para satisfacer la demanda eléctrica de la fábrica de balanceado siempre y cuando su aporte sea más económico comparado con la red eléctrica, caso contrario será la red quien se encargue del suministro eléctrico, también se asume que la red siempre estará disponible en caso de que fallen la fuentes solar o eólica.

También se ha considerado el perfil de baterías para almacenamiento de energía de tal forma que pueda ser un soporte de suministro de la red eléctrica cuando efectúa la descarga, la carga de baterías en cambio se realiza cuando hay un excedente de generación de las fuentes renovables o cuando absorba energía

de la red, el algoritmo es el que se encarga de hacer la gestión de energías desde el punto de vista más económico.

## 2.7 Costos de las Tecnologías

La función coste del algoritmo de optimización, incluye los costos fijos y variables por cada tecnología que se va a implementar. Para el cálculo de los costos fijos se requiere el valor de la inversión en (\$/kW) y la vida útil. En los costos variables se considera los costos de producción de cada tecnología.

Se ha investigado en trabajos preliminares de los costos de generación de las tecnologías renovables en Ecuador, por ejemplo (Eras & Barragán, 2013) presentan costo de generación y de inversión para diferentes tecnologías, en (Muñoz, Rojas-Moncayo, & Barreto-Calle, 2018) se analizan los costos para implementación de generación fotovoltaica en Ecuador. El trabajo de (Bravo, 2015) presenta una tabla con costos de inversión y producción para fuentes: hidráulica, eólica, fotovoltaica, biomasa y termoeléctrica. Otra tabla de costo de producción de energía con fuentes renovables y de red eléctrica se presenta en (Basurto & Maldonado, 2016). Los costos de inversión y producción se obtienen de los trabajos realizados por (Ordóñez, Gil, & Espinoza, 2017) y (Samaniego, 2020), la vida útil de las fuentes se obtuvo del trabajo realizado por (Muñoz Salcedo, 2017). La tabla 15 resume los costos de inversión y producción de las tecnologías a implementar en el algoritmo de optimización, dichos valores fueron obtenidos de las referencias citadas anteriormente.

**Tabla 15**

*Precios y vida útil de las diferentes fuentes de generación eléctrica.*

Fuente	Inversión [\$/kW]	Producción [\$/kWh]	Vida Útil [años]	Unidad Base [kW]
Aerogenerador	1875	0.027	20	1
Paneles fotovoltaicos	2505	0.021	30	1
Baterías	320	0.005	10	5kW (carga) 1 kW (descarga)
Red	300	0.1037	1	1
Biomasa	2309	0.1033	20	25

Los datos recopilados de los diferentes estudios preliminares, son las entradas a algoritmo MILP, a más de los perfiles de generación. La inversión inicial y la vida útil de las tecnologías, representan los costos fijos, mientras que los costos de producción por cada tecnología, representan los costos variables. El algoritmo seleccionará cuál es la tecnología más conveniente para generación en las diferentes horas del día, dicha selección se realiza en base al menor costo de generación eléctrica.

Las unidades bases se utilizan para representar la dimensión de la potencia a instalar, por ejemplo, un panel fotovoltaico puede generar 300W pero se puede obtener una potencia combinada de 1kW, el algoritmo indicará cuantas unidades con esa base de potencia se requieren instalar, este procedimiento se realiza para cada una de las fuentes a considerar en el proyecto.

Puesto que la demanda máxima a cubrir en la instalación es de 132.54kW, no existe restricciones en cuanto a la generación, dado que la legislación ecuatoriana indica que se puede generar con fuentes alternativas para el sector industrial hasta una potencia de 1000kW.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 Resultados y Discusión

La tabla 16 muestra los resultados de que proporciona el algoritmo, se diseñaron 2 escenarios. El escenario 1 se considera como día bueno, es decir con las condiciones ambientales adecuadas para producción de máxima energía en las fuentes eólica y solar. En el segundo escenario se consideró la reducción del 70% de las condiciones ambientales. Cabe indicar que, aunque en la tabla no está el aerogenerador, sin embargo, sí estuvo considerado en el algoritmo, pero dado el perfil eólico en Milagro-Guayas con velocidad de viento promedio de 1.5 m/s, no es factible la generación de electricidad con esta fuente.

**Tabla 16**

*Unidades, potencia a instalar y producción de las fuentes eléctricas.*

Fuente	Unidad	Potencia Base [kW]	Potencia a Instalar [kW]	Producción Optimista [kWh/año]	Producción pesimista [kWh/año]
Fotovoltaica	164	1	164	8184,38	1372,23
Caldera	2	25	50	6112,55	6406,91
Red	64	1	64	13413,41	19891,41
Baterías	8	5	40kWh	485,08	9

En la tabla 16 se muestran las unidades de cada fuente para el escenario 1 (día bueno), la unidad de potencia base se obtuvo de la tabla 15, la potencia a instalar se obtiene de la multiplicación de la unidad y la potencia base. En cuanto a la producción optimista representa la cantidad de energía generada en condiciones del escenario 1, a lo largo del año por cada fuente a fin de cubrir la demanda de la instalación. La producción pesimista representa cantidad de energía generada por cada fuente a lo largo del año basados en las condiciones del escenario 2 para el perfil solar y eólico.

#### **Escenario 1:** Resultados día bueno

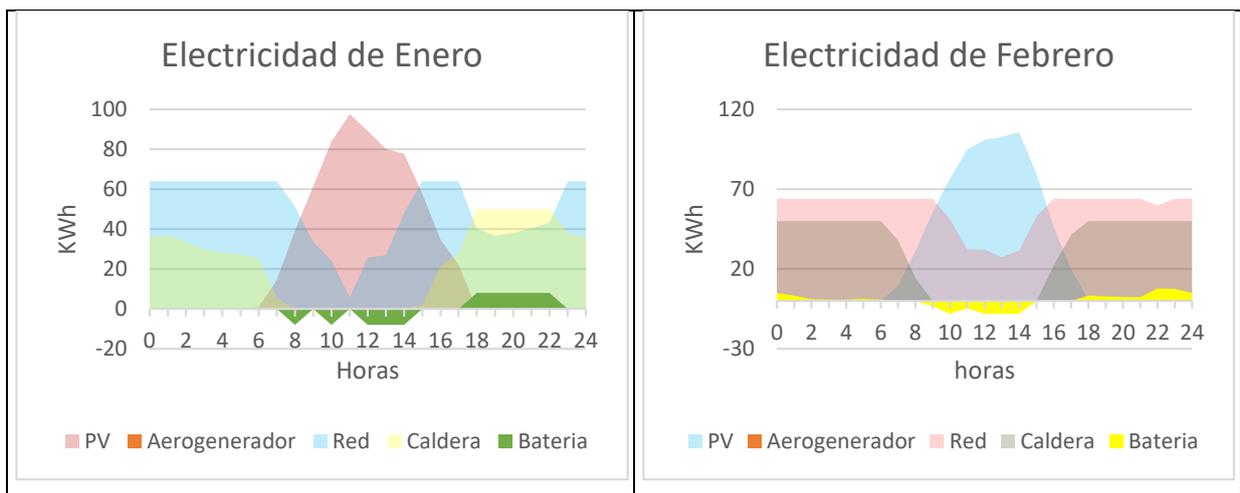
Como se indicó antes, en el escenario 1 se consideran las condiciones ambientales adecuadas para la máxima producción de energía con las fuentes

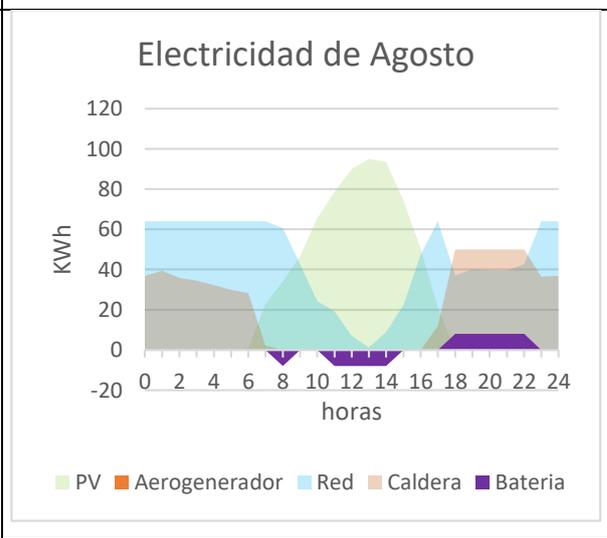
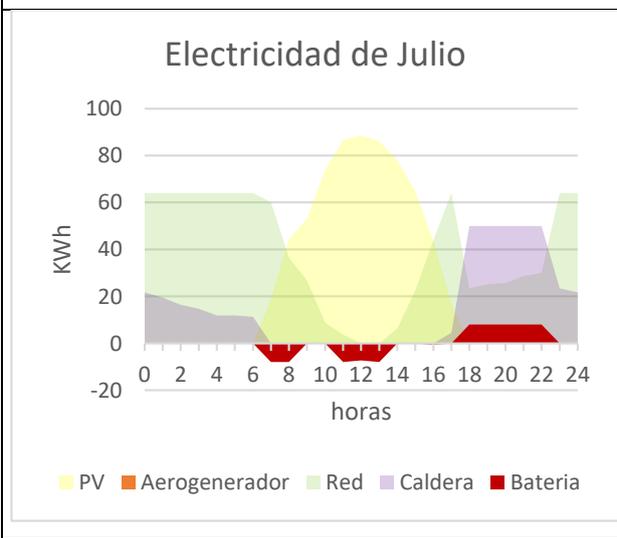
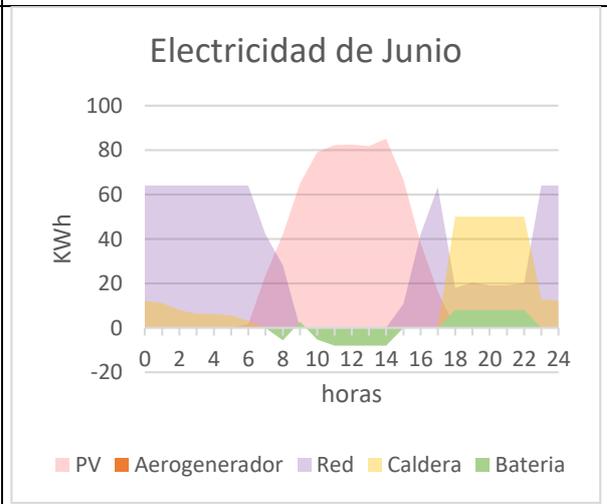
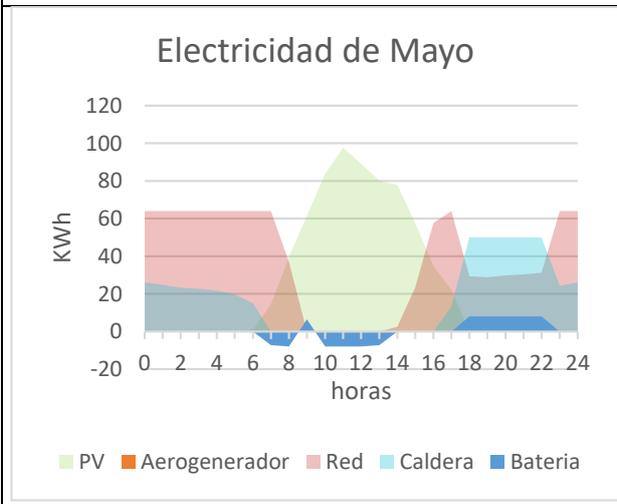
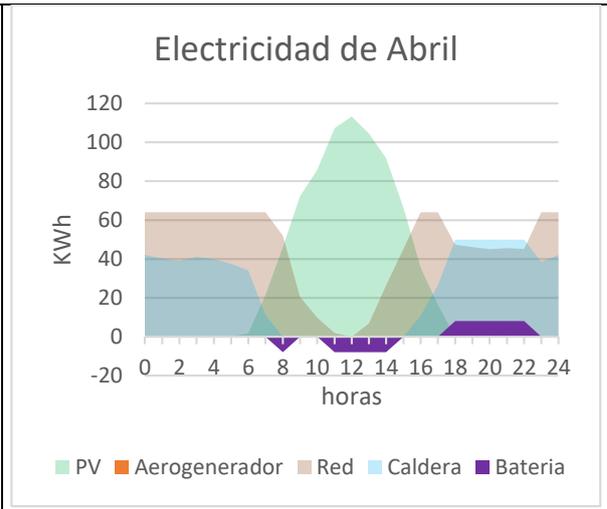
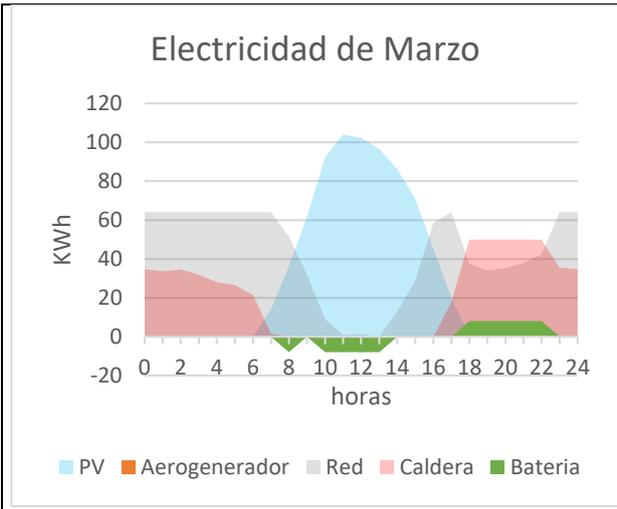
solar y eólica, en la figura 23 se muestran los resultados por mes de la cobertura de la demanda eléctrica del edificio por cada una de las fuentes, se observa que existe un balance entre la energía de la red y la energía producida por las fuentes solar y caldera de biomasa, en el día hay mayor aporte de la fuente fotovoltaica con respecto a la red, en zonas cercanas al medio día se utiliza el excedente de energía de los paneles para cargar las baterías, cuando produce la fuente fotovoltaica no trabaja la caldera de biomasa. En horarios nocturnos se cubre la demanda eléctrica con la caldera de biomasa y la red, en horas de madrugada la red eléctrica aporta en mayor porcentaje, mientras que en horas de mayor demanda de 18:00 a 22:00 horas, existe un equilibrio entre la energía que se obtiene de la biomasa y la red, también en este horario, las baterías aportan con energía para cubrir la demanda eléctrica, aunque su aporte es pequeño comparado con la red y biomasa.

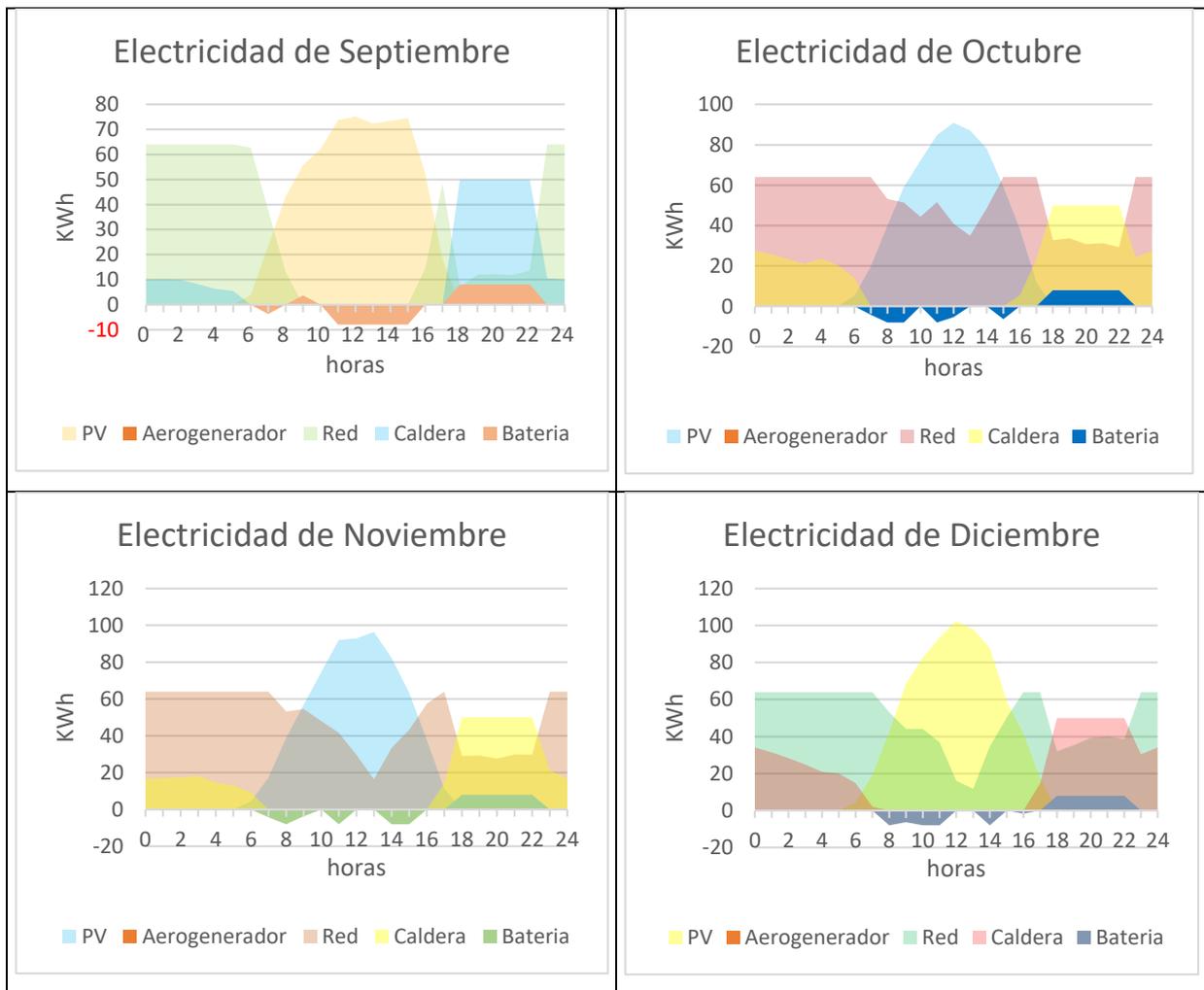
La producción de energía con biomasa es estable a lo largo del año, debido a que no depende de las condiciones ambientales, mientras que la energía de los paneles solares si depende de las condiciones ambientales, obteniendo mayor producción en los meses de marzo a septiembre.

**Figura 24**

*Producción diaria por mes de las fuentes eléctricas en día bueno*







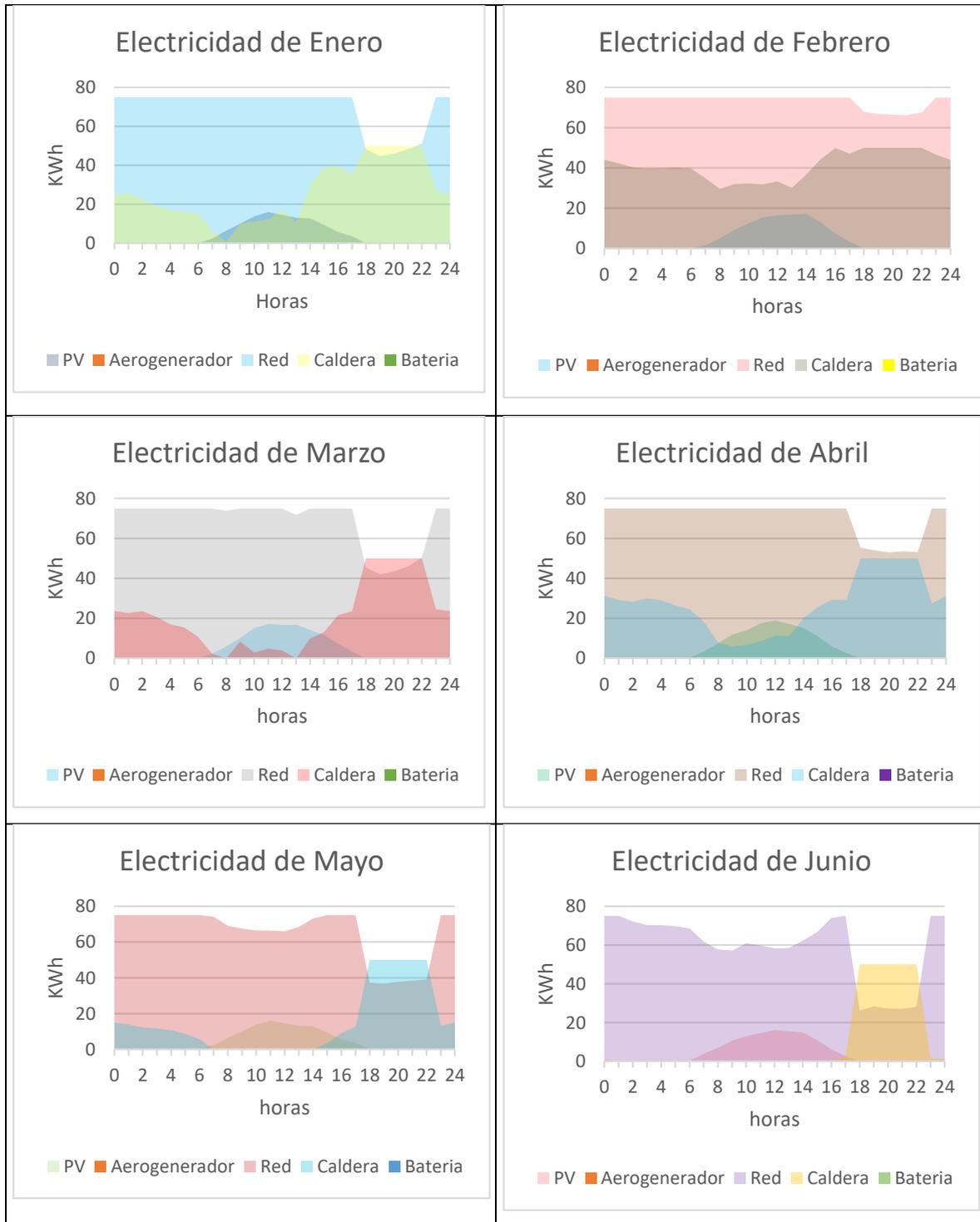
Fuente: (Autor)

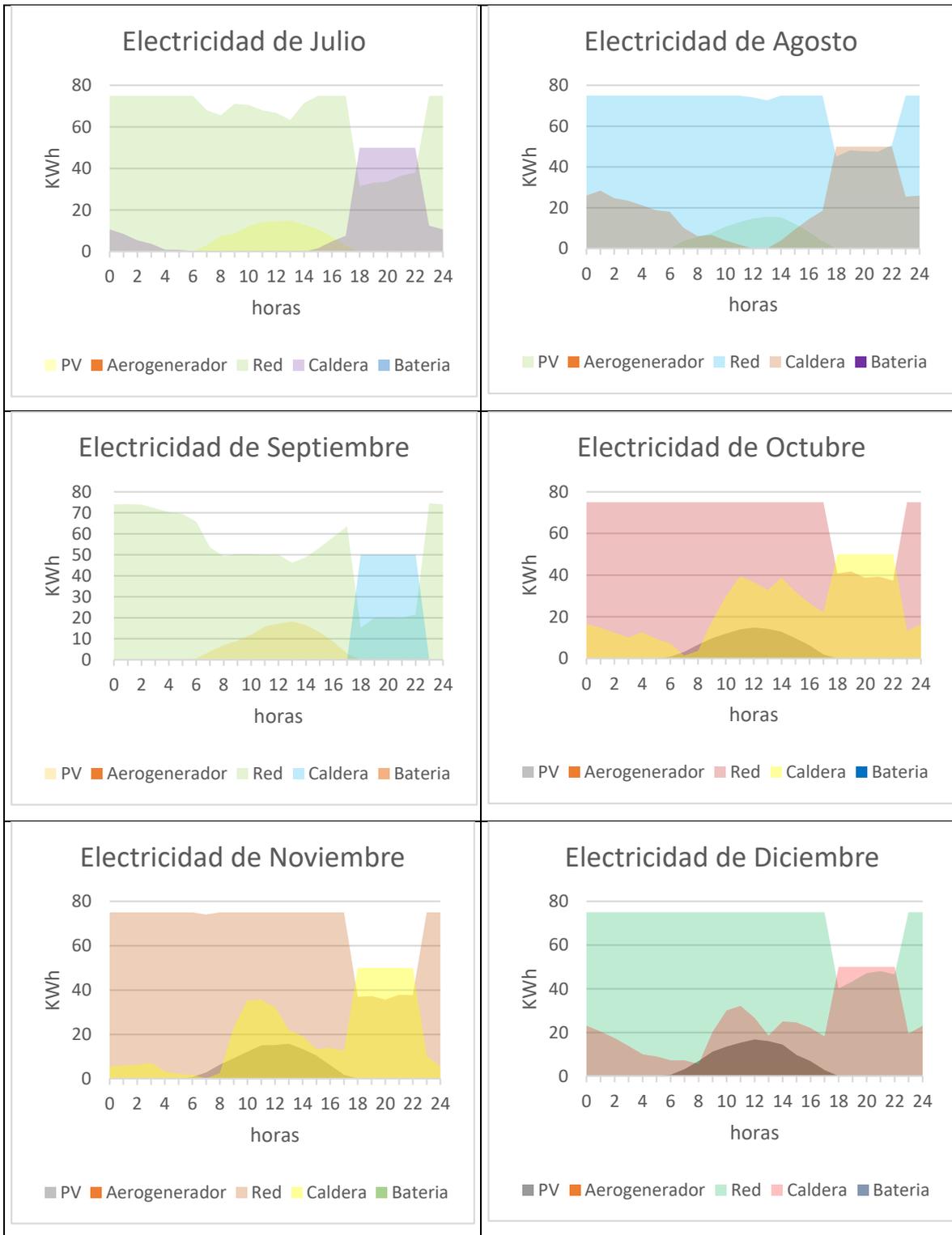
### Escenario 2: Resultados día Malo

Cuando las condiciones ambientales son desfavorables, el mayor porcentaje para cubrir la demanda eléctrica se obtiene de la red, los paneles fotovoltaicos generan poca electricidad. En este escenario las baterías no almacenan ninguna energía debido a que no resulta rentable desde el punto de vista económico. En el mejor de los escenarios la biomasa aporta con el 25% de la demanda total y el mayor aporte se obtiene en el horario de 18:00 a 22:00 horas.

**Figura 25**

*Producción diaria por mes de las fuentes eléctricas en día bueno*





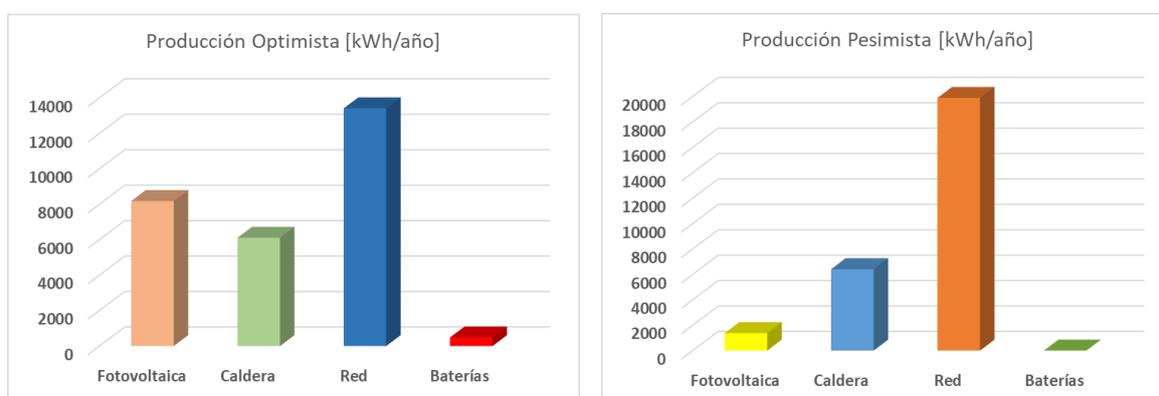
Fuente: (Autor)

El algoritmo de optimización selecciona las fuentes de acuerdo al punto de vista económico, lo ideal sería tener el escenario 1 pero aún si se presenta el escenario 2 se tendría una reducción del consumo eléctrico de la red.

En la figura 26 se muestra la producción de cada una de las fuentes en ambos escenarios, la red presenta el mayor aporte para cubrir la demanda del edificio, en el escenario 1 la energía total producida por las fuentes renovables, supera la energía producida por la red. El aporte de energía de las baterías es pequeño comparado con las demás fuentes en el escenario 1 y nula en el escenario 2. A pesar de que la caldera de biomasa no depende de las condiciones climáticas, sin embargo, se observa que en el escenario 2 también disminuye, esto porque el algoritmo siempre selecciona la fuente de menor coste.

**Figura 26**

*Producción por cada fuente en los escenarios 1 y 2*

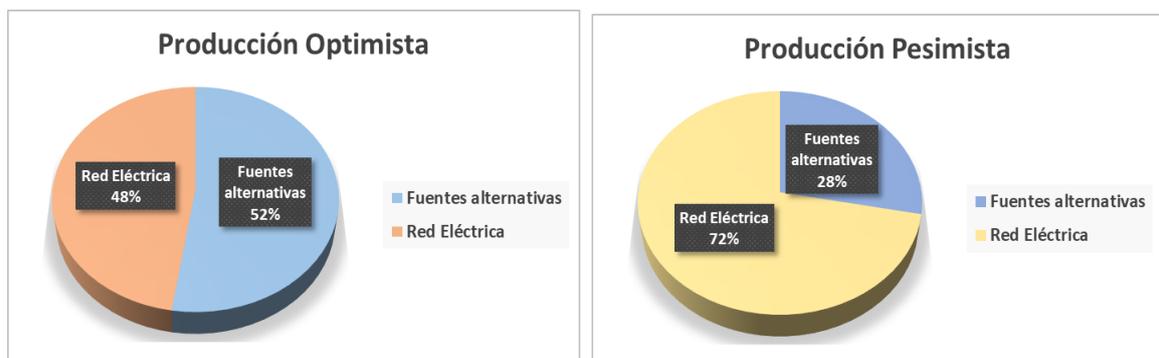


Fuente: (Autor)

La figura 27 muestra el porcentaje de producción de las fuentes alternativas y la de la red eléctrica, en el escenario 1 los valores porcentuales son muy parejos, mientras que en el escenario 2 la diferencia es notoria entre el aporte de la red y las fuentes alternativas.

**Figura 27**

*Participación de la red eléctrica y las fuentes alternativas en los escenarios 1 y 2*



Fuente: (Autor)

## **3.2 Conclusiones y Recomendaciones**

### **Conclusiones**

El trabajo se pudo observar que las condiciones de viento en la ciudad de Milagro no son adecuadas para obtener generación eléctrica, es por esta razón que en ninguno de los escenarios el algoritmo instala fuentes con aerogeneradores.

La generación con paneles fotovoltaicos en días buenos representa un aporte significativo en la energía necesaria para cubrir la demanda eléctrica del edificio, en cambio cuando se analiza para días nublados, el aporte cae de forma significativa y se alimenta principalmente de la energía de la red.

En el análisis de días buenos se pudo observar que existe un aporte de casi el 50% de la red y el otro 50% de las fuentes renovables como solar, eólica y de la energía que entregan las baterías.

En el caso de la caldera de biomasa el mayor aporte se da en zonas horarias donde no existe generación por parte de los paneles fotovoltaicos, esto porque el algoritmo siempre selecciona, de todas las tecnologías, cuál resulta más conveniente instalar desde el punto de vista económico.

En la zona horaria de 18:00 a 22:00 horas es donde el costo de la energía proveniente de la red eléctrica presenta la tarifa más alta, por esta razón se puede observar que en dicha franja horaria el algoritmo da preferencia al uso de la energía eléctrica generada a partir de la biomasa, en lugar de tomar la energía de la red.

Conforme más edificios vayan implementando estas tecnologías se irán reduciendo los costos de inversión, mantenimiento y operación, sumado a la vida útil de los equipos y su casi nulo impacto en el medioambiente, será mucho más rentable por las razones expuestas el uso de tecnologías con fuentes alternativas para producir electricidad.

En cuanto a las baterías el algoritmo las consideró sólo en el escenario del día bueno y su principal aporte para suministrar electricidad, se da en la franja horaria de 18:00 a 22:00 que como se indicó anteriormente es donde la tarifa eléctrica es más alta.

## **Recomendaciones**

Se puede considerar el uso de otras fuentes alternativas para producir electricidad como hidrógeno, es una tecnología que se está aplicando en varios sectores.

Las bombas de calor serían muy útiles para la parte de enfriamiento y así reducir la potencia que consumen los aires acondicionados.

Como se ha analizado, en las edificaciones de consumo casi nulo también se deben aplicar estrategias bioclimáticas para aumentar la eficiencia en los sistemas de aire acondicionado, estas estrategias consisten en el diseño de la envolvente, sistemas de ventilación natural, sombreado, entre otros, así que se puede aplicar estas estrategias para reducir la demanda eléctrica de la edificación.

Los costos de inversión, operación y mantenimiento fueron tomados de investigaciones preliminares, basados en estudios generales, por tanto, dicho valores son referenciales en cuanto al costo de las tecnologías. Estos valores serán más reales a medida que se vayan implementando más proyectos de este tipo.

### 3.3 Referencias Bibliográficas

- Ahmad, J., Larijani, H., Emmanuel, R., Mannion, M., Javed, A., & Phillipson, M. (2017). Energy demand prediction through novel random neural network predictor for large non-domestic buildings. *11th Annual IEEE International Systems Conference, SysCon 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2017.7934803>
- Ahmed, M. S., Mohamed, A., & Shareef, H. (2017). Artificial neural network based controller for home energy management considering demand response events. *2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering, ICAEES 2016*, 506–509. <https://doi.org/10.1109/ICAEEES.2016.7888097>
- Barsoum, N., Yiin, W. Y., Ling, T. K., & Goh, W. C. (2008). Modeling and cost simulation of stand-alone solar and biomass energy. *Proceedings - 2nd Asia International Conference on Modelling and Simulation, AMS 2008*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/AMS.2008.183>
- Basurto, A., & Maldonado, J. (2016). Tarifas del sector eléctrico ecuatoriano según regulaciones del CONELEC, 0–3.
- BNEE. (2021). Balance Nacional de Energía Eléctrica. Retrieved from <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>
- Boechler, E., Garcia, F., Hanania, J., Vargas, S. L., & Donev, J. (2021). Uso de energía residencial.
- Bravo, A. (2015). *Propuesta de una metodología de evaluación de proyectos de generación con energías renovables en Ecuador*.
- Carballo, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica Por Gustavo Arencibia-Carballo. *Redvet*, 17(6), 2.
- Carta, J., Calero, R., & Colmenar, A. (2009). *Centrales de energías renovables*. (Pearson, Ed.). Madrid. Retrieved from [www.pearsoneducacion.com](http://www.pearsoneducacion.com)
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., & Castro, M. (2009). *Centrales de energías renovables Generación eléctrica con energías renovables* (Vol. 03).
- Castilla Nieto, M. del M. (2016). Formulación del problema de la optimización multiobjetivo del confort en edificación sostenible. *Jornadas de Automática 2016*, 505–512. Retrieved from [http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/4928/Castilla et al %282016%29\\_JA\\_vpublicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/4928/Castilla_et_al_%282016%29_JA_vpublicada.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Chen, X., Li, J., Yang, A., & Zhang, Q. (2020). Artificial Neural Network-Aided Energy Management Scheme for Unlocking Demand Response. *Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020*, 1901–1905. <https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164200>
- Climate-Data. (2022). Datos de clima mundial. Retrieved from <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-del-guayas/milagro-2969/>
- CONELEC. (2008). Atlas solar del ecuador. *Conelec*, 1–51. Retrieved from [http://www.conelec.gob.ec/archivos\\_articulo/Atlas.pdf](http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf)
- Coordinación de Energías Renovables. (2008). Energía Biomasa. *Energías Renovables*, 16.

- D'amanzo, M. (2020). 10 PREGUNTAS DE LOS EDIFICIOS ENERGÍACERO: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE. *Revista Hábitat Sustentable*, 1–21.
- Del Pero, C., Leonforte, F., Lombardi, F., Stevanato, N., Barbieri, J., Aste, N., ... Colombo, E. (2019). Modelling of An Integrated Multi-Energy System for A Nearly Zero Energy Smart District. *ICCEP 2019 - 7th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact*, 0, 246–252. <https://doi.org/10.1109/ICCEP.2019.8890129>
- Días, T., & Carmona, G. (2010). Componentes de una instalación solar fotovoltaica 1. ECO-sistemas. (2019). Componentes principales de una instalación solar fotovoltaica. Retrieved from <http://m.ecosistemasdelsureste.com/news/componentes-principales-de-una-instalacion-solar-fotovoltaica/>
- Edeeste. (2022). Transmisión de energía eléctrica. Retrieved from <https://edeeste.com.do/inicio/aprende-con-edeeeste/llega-la-energia-hogar/>
- Endesa. (2020). Generación distribuida. Retrieved from <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/generacion-distribuida>
- Energía\_Estratégica. (2022). Hoja de datos panel fotovoltaico. Retrieved from [https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2020/06/02-Q.PEAK\\_DUO\\_L-G8.3\\_415-430\\_2020-03\\_Rev01\\_ES.pdf](https://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2020/06/02-Q.PEAK_DUO_L-G8.3_415-430_2020-03_Rev01_ES.pdf)
- Eras, A. A., & Barragán, E. A. (2013). Mecanismos de Promoción y Financiación de las Energías Renovables en El Ecuador. *Revista Técnica "Energía,"* 9(1), 128–135. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v9.n1.2013.142>
- Espinoza, J., & Martínez, P. (2015). *Eficiencia energética y ahorro de energía en el Ecuador. Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas.*
- Fronius. (2022). Inversores para instalaciones solares. Retrieved from <https://www.fronius.com/en-ca/canada/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/inverters/fronius-primo/fronius-primo-15-0-1-208-240>
- Gomez, M. (2018). Generación distribuida.
- Gruber, J. K., Fernández, J. L. M., & Prodanovic, M. (2013). Supply Mix Optimization for Decentralized Energy Systems. *Open Journal of Applied Sciences*, 03(02), 5–11. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2013.32b002>
- Gruber, J. K., Huerta, F., & Matatagui, P. (2014). Optimización en dos etapas para la gestión energética en edificios, 3–5.
- Iberdrola. (2022). COP26: IBERDROLA EN LA CUMBRE DEL CLIMA 2021. Retrieved from <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contra-cambio-climatico/cop26#:~:text=Bajo el lema Uniendo al,de acelerar la acción climática>
- Ingemecanica. (2022). Proyectos técnicos de instalaciones solares fotovoltaicas. Retrieved from <https://ingemecanica.com/proyectos/proyectos.html#seccion41>
- International, S. E. (2016). Manual de diseño e instalación. *Solar Energy International*, 1–65.
- Iturriaga Hidalgo, E. (2017). Desarrollo de un método simple para la optimización del diseño de las instalaciones en edificios residenciales de consumo energético casi nulo en el País Vasco. *Universidad Del País Vasco, 2017(cc)*, 1–85. Retrieved from <https://docplayer.es/77540368-Tesis-doctoral-tesis-doctoral.html>

- Javaid, N., Hussain, S. M., Ullah, I., Noor, M. A., Abdul, W., Almogren, A., & Alamri, A. (2017). Demand side management in nearly zero energy buildings using heuristic optimizations. *Energies*, 10(8), 1–29. <https://doi.org/10.3390/en10081131>
- Javanmard, M. E., Ghaderi, S. F., & Sangari, M. S. (2020). Economic and Environmental Analysis of nZEB model with smartification building using MILP. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2020*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160528>
- Kampelis, N., Sifakis, N., Kolokotsa, D., Gobakis, K., Kalaitzakis, K., Isidori, D., & Cristalli, C. (2019). HVAC optimization genetic algorithm for industrial near-zero-energy building demand response. *Energies*, 12(11), 1–23. <https://doi.org/10.3390/en12112177>
- Lindholm, O. (2020). A MILP Optimization Method for Building Seasonal Energy Storage: A Case Study for a Reversible Solid Oxide Cell and Hydrogen Storage System. *Buildings*, 10(7), 1–27. <https://doi.org/10.3390/buildings10070123>
- Löfberg, J. (2004). YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design*, 284–289. <https://doi.org/10.1109/cacsd.2004.1393890>
- Lyzwa, W., Wierzbowski, M., & Olek, B. (2015). MILP formulation for energy mix optimization. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(5), 1166–1178. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2470219>
- Madero, F. (2020). Sistema fotovoltaicos.
- Maher, S. J., Fischer, T., Gally, T., Gamrath, G., Gleixner, A., Gottwald, R. L., ... Witzig, J. (2021). The SCIP Optimization Suite 8.0. *ZIB-Report*, 17–12(05), 1–114. Retrieved from <http://www.zib.de>
- Malysz, P., Sirouspour, S., & Emadi, A. (2013). MILP-based rolling horizon control for microgrids with battery storage. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2099–2104. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699455>
- Martirano, L., Habib, E., Giuseppi, A., & Di Giorgio, A. (2018). Nearly zero energy building model predictive control for efficient heating. *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS 2018*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IAS.2018.8544632>
- Mathworks. (2021). Matemáticas. Gráficas. Programación. Retrieved from <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>
- McGrawHill. (2019). Componentes de una instalación solar fotovoltaica. Retrieved from <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>
- Mega, T., Kawatsu, M., Fujiwara, Y., & Noriyuki. (2020). Identification of Power Demand Characteristics for Each Area and Energy Saving Control Selection Method. *Proceedings of 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2020*, 17–21. <https://doi.org/10.1109/ICGEA49367.2020.239686>
- Mendoza Uribe, I. (2018). Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero. *Ingeniería*, 22(3), 30–46.
- MERN. (2020). Balance Energético Nacional. Ministerio de Energía y Recursos no renovables. Retrieved from <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/5900-2/>

- Montón, R. (2021). Más emisiones, más deforestación y más fenómenos extremos: así se puede resumir el nuevo informe del IPCC.
- Muela, J. C. (2019). *Modelo causal del consumo energético residencial para pronosticar la demanda* (Vol. 0).
- Muñoz, J. patricio, Rojas-Moncayo, M. V., & Barreto-Calle, C. (2018). Incentivo a la generación distribuida en el Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 60–68. Retrieved from [http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1390-860X2018000100060&nrm=iso](http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2018000100060&nrm=iso)
- Muñoz Salcedo, M. (2017). *Dimensionamiento del Sistema de Suministro Energético*. (E. A. Española, Ed.).
- Navntoft, C., Biurrún, N., Paz Cristóbal, M., González, M., Maríncola, L., & Raggio, D. (2019). *Introducción a la generación distribuida de energías renovables*. Pearson Educación.
- Ordóñez, J., Gil, N., & Espinoza, J. (2017). Análisis de viabilidad técnico-económica de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala con distintas tecnologías de almacenamiento. *Maskana*, 319–330.
- Prysmian. (2020). El edificio en el nuevo paradigma energético Presentación. *Schneider Electric*.
- Rakocevic, V., Jahromizadeh, S., Gruber, J. K., & Prodanovic, M. (2014). Demand management for home energy networks using cost-optimal appliance scheduling. *SMARTGREENS 2014 - Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, 21–30. <https://doi.org/10.5220/0004854100210030>
- Rodríguez, E. (2019). Obtención de la curva de potencia de un aerogenerador de 2MW, mediante un modelo CFD, para el pronóstico de generación., 90.
- Samaniego, A. (2020). Minimización de los costos de inversión en sistemas de almacenamiento para micro-redes.
- SBS. (2022). Catálogo de baterías. Retrieved from <https://www.sbsbattery.com/PDFn/SBS-Stationary-Catalog-Espanol.pdf>
- Smarttwister. (2022). Hoja de datos técnica aerogenerador. Retrieved from <https://www.smarttwister.org/index.php/es/aerogeneradores/aerogenerador-st-1000#descargas>
- Soto Barrionuevo, A. (2019). Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB. *Revista Doctorado UMH*, 4(2), 4. <https://doi.org/10.21134/doctumh.v4i2.1642>
- SuriaEnergy. (2021). Generación Distribuida. Retrieved from <https://www.suriaenergy.com/que-es-la-generacion-distribuida>
- Ullah, I., & Hussain, S. (2019). Time-constrained nature-inspired optimization algorithms for an efficient energy management system in smart homes and buildings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/app9040792>
- UNAM. (2010). Energía solar fotovoltaica: Conexión modo Isla. Retrieved from <https://energiaunam.wordpress.com/2010/03/11/conexion-tipo-isla/>
- Vigerske, S., & Gleixner, A. (2018). SCIP: global optimization of mixed-integer nonlinear programs in a branch-and-cut framework. *Optimization Methods and Software*, 33(3), 563–593. <https://doi.org/10.1080/10556788.2017.1335312>

- Wang, H., Meng, K., Dong, Z. Y., Xu, Z., Luo, F., & Wong, K. P. (2015). A MILP approach to accommodate more Building Integrated Photovoltaic system in distribution network. *IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2015-Septe*. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286173>
- Weatherspark. (2022). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Milagro. Retrieved from <https://es.weatherspark.com/y/19344/Clima-promedio-en-Milagro-Ecuador-durante-todo-el-año>
- Wu, W., Meng, Q., Lv, Y., Li, X., Hou, H., Gao, Y., & Cao, W. (2021). An optimization and evaluation method construction of zero-energy residential building renovation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 675(1), 0–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/675/1/012079>

## ANEXOS

### PROGRAMACIÓN EN MATLAB

A continuación, se detalla las funciones coste y restricciones de cada tecnología para generación de electricidad:

```
function [z_e,x_e,sol] = optim_v01(d_e,g_e,u_e,i_e,p_e,v_e)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% PARTE ELECTRICA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ===== Paneles fotovoltaicos (PV) =====
z_e_PV = intvar(1,1);
x_e_PV = sdpvar(24,12);

% ===== Función coste PV =====
F_e_PV = [z_e_PV*u_e.PV*i_e.PV/v_e.PV +
365/12*ones(1,24)*(x_e_PV.*p_e.PV)*ones(12,1)];

% ===== Restricciones PV =====
c_e_PV = [z_e_PV>=0, z_e_PV<=1e6, ...
          x_e_PV>=0, x_e_PV<=z_e_PV*g_e.PV*u_e.PV];

% ===== CALDERA DE BIOMASA =====
z_e_caldera = intvar(1,1);
x_e_caldera = sdpvar(24,12);

% ===== Función coste Caldera de Biomasa =====
F_e_caldera = [z_e_caldera*u_e.caldera*i_e.caldera/v_e.caldera +
365/12*ones(1,24)*(x_e_caldera.*p_e.caldera)*ones(12,1)];

% ===== Restricciones Caldera de Biomasa =====
c_e_caldera = [z_e_caldera>=0, z_e_caldera<=1e6, ...
               x_e_caldera>=0,
               x_e_caldera<=z_e_caldera*g_e.caldera*u_e.caldera];

% ===== Aerogenerador =====
z_e_aero = intvar(1,1);
x_e_aero = sdpvar(24,12);

% ===== Función coste Aerogenerador =====
F_e_aero = [z_e_aero*u_e.aero*i_e.aero/v_e.aero +
365/12*ones(1,24)*(x_e_aero.*p_e.aero)*ones(12,1)];

% ===== Restricciones Aerogenerador =====
c_e_aero = [z_e_aero>=0, z_e_aero<=1e6, ...
            x_e_aero>=0, x_e_aero<=z_e_aero*g_e.aero*u_e.aero];

% ===== Red =====
z_e_red = intvar(1,1);
x_e_red = sdpvar(24,12);

% ===== Función coste Red =====
F_e_red = [z_e_red*u_e.red*i_e.red/v_e.red +
365/12*ones(1,24)*(x_e_red.*p_e.red)*ones(12,1)];

% ===== Restricciones de la red =====
c_e_red = [z_e_red>=0, z_e_red<=1e6, ...
```

```

x_e_red>=0, x_e_red<=z_e_red*g_e.red*u_e.red];

% ===== Bateria =====
z_e_bat = intvar(1,1);
x_e_bat_d = sdpvar(24,12);
x_e_bat_c = sdpvar(24,12);
y_e_bat_d = binvar(24,12);
y_e_bat_c = binvar(24,12);
x_init = sdpvar(1,12);

% ===== Función coste de Bateria carga y descarga =====
F_e_bat = [z_e_bat*u_e.bat_cap*i_e.bat/v_e.bat +
365/12*ones(1,24)*(x_e_bat_d.*p_e.bat)*ones(12,1) +
365/12*ones(1,24)*(x_e_bat_c.*zeros(24,12))*ones(12,1)];

% ===== Restricciones de Bateria carga y descarga =====
c_e_bat = [z_e_bat >= 0, z_e_bat <= 1e6, ...
           y_e_bat_d + y_e_bat_c <= 1, ...
           x_e_bat_d >= 0, x_e_bat_d <=
z_e_bat*g_e.bat*u_e.bat_pot, x_e_bat_d <= y_e_bat_d*1e6, ... %
limite potencia descargar
           x_e_bat_c <= 0, x_e_bat_c >= -
1*z_e_bat*g_e.bat*u_e.bat_pot, x_e_bat_c >= -1*y_e_bat_c*1e6, ... %
limite potencia cargar
           x_init >= 0, x_init <= z_e_bat*u_e.bat_cap,...
           ones(24,1)*x_init + tril(ones(24,24))*(- x_e_bat_d -
x_e_bat_c) <= z_e_bat*u_e.bat_cap, ...
           ones(24,1)*x_init + tril(ones(24,24))*(- x_e_bat_d -
x_e_bat_c) >= 0, ...
           ones(1,24)*(x_e_bat_d + x_e_bat_c) == 0];

% ===== Balance eléctrico =====
F_e_bal = [0];
c_e_bal = [d_e == x_e_PV + x_e_aero + x_e_red + x_e_bat_c + x_e_bat_d
+ x_e_caldera];

% ===== Total eléctrico =====
F_e = F_e_PV + F_e_aero + F_e_red + F_e_bat + F_e_bal + F_e_caldera;
c_e = c_e_PV + c_e_aero + c_e_red + c_e_bat + c_e_bal + c_e_caldera;

% ===== Coste & restricciones =====
F = F_e;
c = c_e;

% ===== Optimización =====
ops =
sdpsettings('solver','scip','verbose',0,'showprogress',0,'savesolverou
tput',1);
sol = solvesdp(c,F,ops);

% ===== Resultados =====
if sol.problem~=0
    disp(['--> PROBLEM NOT SOLVED PROPERLY (ROUGH)'])
end

% ===== Variables de salida =====
z_e.PV = double(z_e_PV);
z_e.aero = double(z_e_aero);
z_e.caldera = double(z_e_caldera);

```

```

z_e.red = double(z_e_red);
z_e.bat = double(z_e_bat);
x_e.PV = double(x_e_PV);
x_e.aero = double(x_e_aero);
x_e.red = double(x_e_red);
x_e.bat = double(x_e_bat_d) + double(x_e_bat_c);
x_e.caldera = double(x_e_caldera);
x_e.bini = double(x_init);

```

Valores ingresados en el programa principal de unidades base, costos de inversión y producción, así como vida útil.

```

% ===== UNIDAD BASE =====
u_e = [];
u_e.PV = 1; % 1kW
u_e.aero = 1; % kW
u_e.red = 1; % kW
u_e.bat_cap = 5; % kWh
u_e.bat_pot = 1; % kW con c=0.25
u_e.caldera = 25; % kW
% ===== PRECIOS =====
i_e = [];
i_e.PV = 2505; % $/kW
i_e.aero = 1875; % $/kW
i_e.red = 300; % $/kW
i_e.bat = 320; % $/kWh
i_e.caldera = 2309; % $/kWh

p_e = [];
p_e.PV = 0.021*ones(24,12); % $/kWh
p_e.aero = 0.027*ones(24,12); % $/kWh
p_e.caldera = 0.1033*ones(24,12); % $/kWh

v_e = [];
v_e.PV = 30; % años
v_e.aero = 20; % años
v_e.red = 1; % años
v_e.bat = 10; % años
v_e.caldera = 20; % años

```