

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Diseño óptimo de microrredes híbridas para electrificación rural en
comunidades aisladas de Guayaquil

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Luis Alberto Pesantes Ocampo

Alejandro Javier Torres Naranjo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres, Alberto y Estela, quienes con su amor, esfuerzo y sacrificio me han dado el ejemplo de que todo sueño es alcanzable.

A mi hermana Ximena por su cariño y apoyo incondicional, y por estar conmigo en todo momento.

A mi tío Johnny por haber confiado en mi desde el principio, invirtiendo su tiempo y esfuerzo para ayudarme a alcanzar esta meta.

Finalmente, dedico este trabajo a todas y cada una de las personas que, a lo largo de todos mis años de estudio supieron extender su mano hacia mí en señal de apoyo y motivación.

Luis Alberto Pesantes Ocampo

A mis padres, Julio y Alexandra, por la motivación que me dieron para lograr cumplir esta meta.

A mi abuelo Ruffo, el cual desde el cielo me brinda su constante apoyo y protección.

Alejandro Javier Torres Naranjo

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a toda mi familia y amigos que de alguna manera siempre estuvieron conmigo brindándome su apoyo en los buenos y sobre todo en los malos momentos.

A mis tutores quienes con sus conocimientos y paciencia han permitido el desarrollo de este trabajo.

Mi más grande y sincero agradecimiento al Ph.D. Miguel Torres por ser un gran maestro, amigo, consejero y ejemplo a seguir.

Luis Alberto Pesantes Ocampo

A mis padres, Julio y Alexandra, por su constante apoyo y amor entregado en cada etapa de mi vida.

A mi tía Pierina, por sus consejos que fueron una guía en momentos de incertidumbre.

Alejandro Javier Torres Naranjo

Un agradecimiento especial al Centro de Energías Renovables y Alternativas (CERA) y al Ing. M.Sc. Rubén Hidalgo, en conjunto con la Universidad de Villanova, por haber hecho posible el desarrollo de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Luis Alberto Pesantes Ocampo* y *Alejandro Javier Torres Naranjo* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Luis Alberto Pesantes
Ocampo

Alejandro Javier Torres
Naranjo

EVALUADORES

MSc. Ivan Endara

PROFESOR DE LA MATERIA

PhD. Miguel Torres

PROFESOR TUTOR

Msc. Johnny Rengifo

PROFESOR CO-TUTOR

RESUMEN

Un gran porcentaje de los sistemas eléctricos que existen dentro de las comunidades aisladas dependen de los combustibles fósiles. En la actualidad aprovechando los distintos avances tecnológicos, estos sistemas están siendo reemplazados por redes de generación híbrida con el fin de disminuir el impacto ambiental. En el presente proyecto se plantea una propuesta de diseño de una microrred híbrida aislada para abastecer la demanda de la comunidad Cerritos de los Morreños por medio del estudio de tecnologías relacionadas a las fuentes renovables y estimación de los perfiles de consumo. Para la recolección de datos, se realizó una visita de campo en la cual se obtuvo la información referente a la cantidad, consumo y horas del uso de los equipos que se encuentran dentro de la isla para la creación de la curva de consumo de la comunidad. Se analizó la disponibilidad de las fuentes de energía renovable, basados en datos históricos de radiación solar, viento y temperatura proporcionados por la NASA con técnicas de *machine learning*. Adicionalmente, se planteó un modelo de optimización para minimizar los costos de diseño, definiendo una función objetivo y sus respectivas restricciones. Los resultados del modelo de optimización corresponden a los cinco escenarios que plantean prioridades distintas, dentro de las cuales se encuentran la disminución de costos de diseño y el favorecimiento del uso de la generación renovable. Todos los resultados del diseño de optimización proveen soluciones óptimas dentro de sus condiciones, demostrando la versatilidad que este tipo de sistema ofrece a sus consumidores.

Palabras Clave: Microrred, Fuente renovable, Optimización, Versatilidad.

ABSTRACT

Many electrical systems that exist in isolated communities depend on fossil fuels. Currently, taking advantage of the different technological advances, these systems are being replaced by hybrid generation networks to reduce the environmental impact. This project presents a design proposal for an isolated hybrid microgrid to supply the demand of the Cerritos de los Morreños community through the study of technologies related to renewable sources and the estimation of consumption profiles. For data collection, a field visit was made to obtain information on the quantity, consumption, and hours of use of the equipment inside the island for the creation of the consumption curve of the community. The availability of renewable energy sources was analyzed, based on historical data of solar radiation, wind and temperature provided by NASA with machine learning techniques. Additionally, an optimization model was proposed to minimize design costs, defining an objective function and its respective constraints. The results of the optimization model correspond to the five scenarios that propose different priorities, among which are the reduction of design costs and favoring the use of renewable generation. All the results of the optimization design provide optimal solutions within their conditions, demonstrating the versatility that this type of system offers to its consumers. Keywords: Microgrid, Renewable source, Optimization, Versatility.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Alcance.....	4
1.5 Microrredes y sus componentes.....	5
1.6 Sistemas de generación distribuida.....	7
1.6.1 Energía Eólica.....	8
1.6.2 Energía Solar Fotovoltaica.....	9
1.6.3 Generadores Diésel.....	10
1.7 Sistemas de almacenamiento de energía.....	10
1.7.1 Baterías en comunidades aisladas.....	11
1.8 Demanda de energía.....	12
1.9 Aspectos generales de las zonas no interconectadas en Guayaquil.....	12
1.9.1 Caso de estudio: Comunidad Cerrito de los Morreños.....	12

1.10	Técnicas de optimización	13
1.11	Técnicas de <i>machine learning</i> para optimización	13
1.12	Herramientas computacionales	14
1.12.1	Modelado en PVSyst	14
1.12.2	<i>A Mathematical Programming Language</i>	14
CAPÍTULO 2.....		15
2.	Metodología	15
2.1	Levantamiento de información	16
2.1.1	Matriz de obtención de información	16
2.1.2	Elección de población – muestra	18
2.2	Demanda de energía.....	18
2.2.1	Lineamientos para obtener curva de carga.....	19
2.2.2	Curva característica por microrred.....	19
2.2.3	Proyección de demanda en la comunidad	20
2.3	Soluciones tecnológicas disponibles para microrredes aisladas	20
2.4	Factor dependiente de las condiciones ambientales y técnicas para la generación solar	27
2.5	Características técnicas y económicas de los elementos de la microrred....	29
2.5.1	Consumo del combustible diésel	32
2.5.2	Costos operativos de la microrred	33
2.5.3	Datos de costos para ingresar en el modelo de optimización.....	35
2.6	Formulación del problema de optimización	40
2.6.1	Variables del sistema.....	41
2.6.2	Parámetros de dimensionamiento	43
2.6.3	Variables de operación	43
2.6.4	Función Objetivo	44

2.6.5	Restricciones	45
2.7	Diseño del sistema Fotovoltaico para la comunidad en PVSyst.....	48
2.7.1	Orientación e inclinación de los paneles solares	48
2.7.2	Demanda energética de la comunidad Cerrito de los Morreños	49
2.7.3	Selección de los elementos del sistema fotovoltaico	51
CAPÍTULO 3.....		54
3.	Resultados Y ANÁLISIS	54
3.1	Resultados del levantamiento de información	54
3.1.1	Perfiles de consumo de la comunidad	54
3.2	Resultados del <i>machine learning</i> aplicado a los datos históricos temperatura, viento e irradiancia	56
3.2.1	Energía eólica.....	57
3.2.2	Energía Solar fotovoltaica.....	57
3.2.3	Energía de Biomasa	58
3.3	Resultados del dimensionamiento óptimo de la microrred mediante la solución del modelo de optimización en AMPL.	58
3.4	Resultados de simulaciones con PVSyst	62
3.4.1	Costo de inversión	63
3.5	Análisis de costos de la microrred para la comunidad Cerrito de los Morreños. 64	
CAPÍTULO 4.....		66
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	66
Conclusiones.....		66
Recomendaciones.....		68
BIBLIOGRAFÍA.....		69
APÉNDICES.....		72

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
AMPL	A Mathematical Programming Language
C^{IGD}	Costos de invertir en generación renovable
C^{IT}	Costo de inversión en grupo electrógeno
C^{OT}	Costo de venta de energía diésel
\bar{P}^{GR}	Inversión en la potencia de la generación renovable
F_t^{GR}	Factor dependiente del tiempo de la generación renovable
\bar{P}^T	Límite máximo del generador convencional
C^{IPA}	Costo relacionado a la capacidad de potencia activa máxima del almacenador
C^{IEA}	Costo de inversión de capacidad de energía del almacenador
E^{AEO}	Energía en el almacenador inicial
P_t^D	Curva de demanda
C^{CC}	Costo por corte de carga
\bar{P}^{GR}	Potencia máxima del generador renovable
\bar{P}^T	Potencia máxima de consumo del grupo electrógeno
\bar{E}^{AE}	Dimensión energética del almacenador
\bar{P}^{AE}	Dimensión potencia del almacenador
P_t^T	Potencia inyectada del grupo electrógeno en cada hora de operación
E_t^{AE}	Nivel del almacenador de energía en cada hora de operación
P_t^{AEiny}	Potencia inyectada por el almacenador de energía en cada hora y escenario
P_t^{AEext}	Potencia extraída por el almacenador de energía en cada hora y escenario
X_t	Porcentaje de corte de carga

SIMBOLOGÍA

kW	Kilovatio
m/s	Metro por segundo
MW	Megavatio
CO ₂	Dióxido de carbono
kVA	Kilovoltio-amperio
W	Vatio
kWh	Kilovatio-hora
Ah	Amperio-hora
°C	Grado centígrado
m ²	Metro cuadrado
V	Voltio
A	Amperio
Kg	Kilogramo
Hz	Hertz

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Arquitectura de una microrred híbrida aislada.....	6
Figura 1.2. Vista de Google Maps de la comunidad Cerrito de los Morreños.....	13
Figura 2.1. Metodología para el diseño óptimo de la microrred.....	15
Figura 2.2 Curva de demanda diaria de la comunidad.....	19
Figura 2.3 Series de tiempo de Irradiancia, temperatura y velocidad del viento correspondiente a enero 2020.....	21
Figura 2.4 Codo de Jambú datos para elección óptima de número de grupos.....	22
Figura 2.5 Gráficos de dispersión y clúster para te irradiación y temperatura enero 2020.....	22
Figura 2.6 Radiación solar horizontal global con k-means y GMD.....	25
Figura 2.7 Temperatura del aire con k-means y GMD.....	25
Figura 2.8 Velocidad del viento a 10 metros de altura con k-means y GMD.....	26
Figura 2.9 Velocidad del viento a 50 metros de altura con k-means y GMD.....	26
Figura 2.10 Diagrama de flujo para la formulación del problema de optimización.....	40
Figura 2.11 Configuración de la orientación de los paneles solares.....	49
Figura 2.12 Configuración de valores de consumo de la comunidad.....	50
Figura 2.13 Configuración de distribución de horas.....	51
Figura 2.14 Características técnicas del panel de 520 W.....	52
Figura 2.15 Características técnicas de las baterías de 6V 250Ah.....	52
Figura 2.16 Características del generador ingresadas a PVSyst.....	53
Figura 3.1 Curvas de demanda diaria por tipo de usuario.....	56
Figura 3.2 Curvas Gaussianas: a) Irradiancia Horizontal Global, b) Temperatura ambiente, c) velocidad del viento a 10 metros de altura d) velocidad del viento a 50 metros de altura.....	57
Figura 3.3 Resumen de resultado de simulación en PVSyst.....	62
Figura 3.4 Curva de demanda diaria en PVSyst.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matriz utilizada para el levantamiento de información en la comunidad cerrito de los Morreños.....	17
Tabla 2.2 Datos de potencia instalada y consumo por tipo de usuarios.....	18
Tabla 2.3 Datos representantes de radiación solar, temperatura, velocidad del viento, y producción energética obtenidos con el algoritmo de k-means.....	23
Tabla 2.4 Datos representantes de radiación solar, temperatura y velocidad del viento obtenidos con <i>Gaussian Mixture Models</i> (GMM).....	24
Tabla 2.5 Factor dependiente del tiempo representativo de cada mes	28
Tabla 2.6 Especificaciones técnicas panel 520 W.....	29
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas panel 450 W.....	29
Tabla 2.8 Especificaciones técnicas panel 405 W.....	30
Tabla 2.9 Especificaciones técnicas batería 24V/2000 Ah	30
Tabla 2.10 Especificaciones técnicas batería 48V/2000 Ah	30
Tabla 2.11 Especificaciones técnicas inversor monofásico	31
Tabla 2.12 Especificaciones técnicas inversor trifásico.....	31
Tabla 2.13 Especificaciones técnicas gestor energético	31
Tabla 2.14 Especificaciones técnicas generador INMESOL AI-210.....	32
Tabla 2.15 Precios de combustible diésel Ecuador 2021	32
Tabla 2.16 Salarios básicos para operadores	33
Tabla 2.17 Cotización para compra e implementación del generador.....	33
Tabla 2.18 Costos de elementos de una microrred.....	34
Tabla 2.19. Tabla de costos fijos de operación para el modelo de optimización	39
Tabla 2.20. Tabla de consumo energético de la comunidad Cerrito de los Morreños ...	50
Tabla 3.1 Actividades principales relacionadas con patrones de ocupación	55
Tabla 3.2 Resultados del problema de optimización para los diferentes escenarios.....	59
Tabla 3.3 Porcentaje de corte de carga para el escenario 1	60
Tabla 3.4 Porcentaje de corte de carga para el escenario 3	61
Tabla 3.5. Cantidad de elementos para el diseño en PVSyst.....	62
Tabla 3.6. Cantidad de equipo y costo para los escenarios 1 y 2.....	64
Tabla 3.7. Cantidad de equipo y costo para los escenarios 3, 4, 5 y 6.....	64
Tabla 3.8. Cantidad de equipo y costo para modelo en PVSyst.....	65

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La falta de recursos básicos para el desarrollo de actividades de la vida diaria de las personas es un problema que sigue estando presente en una parte de la población. Uno de los recursos más básicos e importantes es la energía eléctrica, debido a que este habilita la posibilidad de utilizar diversos dispositivos que facilitan la vida diaria de las personas, así como el acceso a la educación y tecnologías, y está directamente asociada a la obtención de otros recursos valiosos como lo es el agua. Debido a la localización de algunas comunidades, el lograr suministrar energía en estos lugares resulta una tarea difícil, o no es viable para las empresas desde el punto de vista técnico y económico brindar el suministro de electricidad desde la red interconectada nacional hasta el punto de consumo. Por lo tanto, uno de los principales problemas para el abastecimiento de energía radica en la localización, puesto que resultaría muy costoso extender la línea de transmisión o subtransmisión hasta estas zonas, además de no contar con terrenos estables y seguros para la instalación, se tiene difícil acceso a estas comunidades.

Normalmente estas poblaciones utilizan fuentes de energía a base de combustibles fósiles para abastecerse del recurso eléctrico, sin embargo, eso trae consigo el grave problema ambiental que causa la emisión de gases contaminantes a la atmósfera y los altos costos asociados al precio del combustible. En este contexto surge el uso de la generación distribuida, mediante la integración de recursos renovables.

En este trabajo de titulación se propone el diseño de una microrred híbrida capaz de satisfacer la demanda de comunidades rurales para que puedan tener acceso a la energía eléctrica, que combina diferentes fuentes de energía renovables con recursos convencionales, para abastecer la demanda de un conjunto de cargas. La comunidad bajo estudio es Isla Cerrito de los Morreños, que se ubica en el Golfo de Guayaquil, en la cual se realiza un levantamiento de información, el diseño de la microrred además tiene un enfoque de optimización con técnicas de *machine learning* y modelos matemáticos para el diseño óptimo de la microrred.

1.1 Descripción del problema

Existen un gran número de personas que viven en comunidades aisladas que no tienen acceso a la electricidad, debido a su localización no se pueden interconectar al sistema nacional de transmisión; y la expansión de una red eléctrica, sea aérea o submarina resulta inviable debido al impacto ambiental y los altos costes de inversión. Estas comunidades usualmente son dependientes de combustibles fósiles como fuente de energía, así como el uso de la generación distribuida, utilizando energías renovables no convencionales, comúnmente paneles solares y aerogeneradores de baja potencia. Se requiere abastecer a estas comunidades con un servicio de electricidad que cumpla con los requerimientos de confiabilidad y calidad establecidos. Para abordar estos problemas surge el uso de las microrredes, considerando las fuentes de energía y las cargas asociadas.

El presente trabajo propone el diseño óptimo de una microrred híbrida que integra varias fuentes de energía según la disponibilidad del recurso tales como: eólica, solar o biomasa, además de la implementación de bancos de almacenamiento de energía y en caso de requerirse para satisfacer la demanda la integración de generadores diésel, con la finalidad de abastecer energía a distintas comunidades rurales aisladas del centro de la ciudad Guayaquil-Ecuador.

1.2 Justificación del problema

En la actualidad es de vital importancia el contar con acceso a servicios básicos como lo son el agua, sanidad y energía ininterrumpida, y actualmente un gran porcentaje de la población carece de alguna de estas necesidades. Enfocándonos únicamente en la energía eléctrica, la electrificación rural tiene un gran impacto en desarrollo y calidad de vida de sus habitantes en términos de educación, salud y seguridad. Un estudio publicado por el Banco Interamericano de Desarrollo, afirma que la electrificación rural tiene un impacto en la disminución del abandono escolar, disminución del trabajo infantil y reducción de la pobreza en la población contribuyendo a redistribución de ingresos [1]. La carencia de electricidad también limita el desarrollo del emprendimiento en las comunidades, por ejemplo, no contar con un refrigerador para conservar alimentos frescos, no contar con alumbrado, o

uno de los principales problemas en algunos sectores es el acceso al agua, al no tener bombas de extracción la obtención de este recurso puede ser compleja y tardada, teniendo que cargarla desde lugares lejanos o extraerla manualmente de pozos [2]. Tomando en consideración el séptimo objetivo de Desarrollo Sostenibles de las Naciones Unidas, enfocado en promover la energía asequible y no contaminante con el fin de reducir la contaminación ambiental, el 13% de la población mundial no posee acceso a servicios relaciones con la energía eléctrica, y cerca de 3000 millones de personas aún emplean madera, carbón u otro tipo de combustible para realizar las distintas actividades del día a día [3].

Muchas comunidades dependen de los combustibles fósiles para la generación de electricidad, la dependencia de este recurso es de gran preocupación ya que los precios del combustible se encuentran en constante variación. En Ecuador el gobierno subvencionó el precio del combustible hasta el año 2020, y el precio de este en la actualidad ha ido incrementado hasta casi alcanzar el valor de mercado internacional [4].

Una de las soluciones que se han empleado es la incorporación de microrredes híbridas, las cuales cumplen con la función de generación a la vez que utilizan energías renovables para lograr la producción de energía eléctrica y abastecer la carga con el menor impacto ambiental, constituyéndose en una solución a mediano y largo plazo para la problemática planteada [5]. Uno de los beneficios que posee la utilización de una microrred es que puede operar de manera independiente y es capaz de suministrar energía a las comunidades rurales, manteniendo la fiabilidad de la energía y a la vez contribuyendo en la reducción de la contaminación ambiental [5].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una propuesta de microrred híbrida mediante la localización óptima de las fuentes de energía renovables utilizando *machine learning* y modelos de optimización la cual pueda utilizarse como una alternativa de electrificación de comunidades rurales aisladas de Guayaquil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Construir una línea base de las comunidades aisladas, no interconectada, a través de visita a la zona para el levantamiento de información geográfico y requerimientos de carga.
- Evaluar técnica y económicamente al menos dos tecnologías relacionadas con las fuentes de energías renovables disponibles en la región para el diseño de la microrred híbrida.
- Estimar perfiles de consumo para el dimensionamiento de la capacidad de generación y del sistema de almacenamiento de energía de la microrred.
- Realizar el dimensionamiento y localización óptima de las fuentes de generación distribuida a ser utilizadas en la microrred híbrida mediante algoritmos matemáticos.

1.4 Alcance

Para el presente trabajo de titulación se propone el diseño óptimo de una microrred híbrida, la cual estará constituida por al menos un tipo de energía renovable, para abastecer la demanda de energía a distintas comunidades rurales aisladas de la ciudad Guayaquil. La disponibilidad del recurso renovable se analizará con técnicas de *machine learning*, además, se realizará el análisis de necesidad de electricidad para comunidades, con el fin de estimar la demanda y obtener los perfiles de consumo para el dimensionamiento de la capacidad de generación de la microrred.

De igual manera se implementará un modelo en AMPL con el fin de encontrar la localización óptima de las fuentes de energía renovables para la microrred, considerando el factor económico, y dimensionar los paneles solares mediante

software de simulación para conocer el comportamiento y funcionamiento de esta, así como la cantidad de energía que puede generar.

1.5 Microrredes y sus componentes

Se conoce como microrred eléctrica al conjunto de distintos componentes tales como cargas, sistemas de almacenamiento y generación que se encuentran interconectado a una red eléctrica o de manera aislada, con el fin de proporcionar energía de manera constante y confiable. Cuando se habla acerca de las distintas fuentes de generación que pueden componer una microrred, es necesario tomar a consideración la demanda requerida puesto que esta determinará que tipo de fuentes se procederá a utilizar [6].

Para el funcionamiento de una microrred existen dos tipos de operación, los cuales son conectados a la red o aislados. En el caso de que la microrred se encuentre conectada a la red, es posible el intercambio de energía con otras redes, lo cual no es posible cuando se encuentra aislada porque la única energía que puede consumir y almacenar es la misma producida dentro de la microrred [7].

Para facilitar la comprensión del funcionamiento de una microrred se emplea la Figura 1.1, es posible observar que el sistema mostrado se encuentra compuesto por diferentes fuentes de generación en base a energías renovables, un respaldo el cual será el generador diésel, y un sistema de almacenamiento formado por baterías. Las flechas indican el flujo de energía entre cada uno de los distintos componentes que constituyen la microrred.

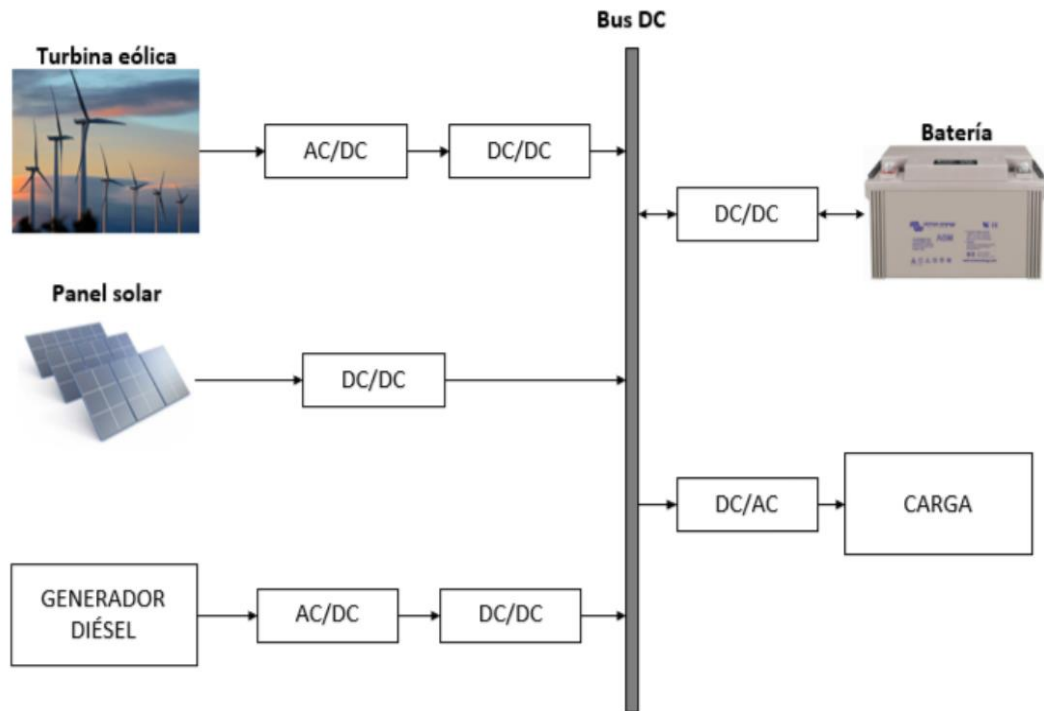


Figura 1.1. Arquitectura de una microrred híbrida aislada.

Las microrredes se pueden clasificar en tres tipos:

Microrred DC, es aquella en donde el bus de potencia es de corriente continua y posee un punto de conexión común junto a la red eléctrica haciendo uso de un inversor, que permite el flujo bidireccional entre la red y el bus DC. Este tipo de microrredes proporciona un alto nivel de confiabilidad y estabilidad en el bus DC, debido a que no se posee potencia reactiva.

Microrred AC, posee un bus de potencia de corriente alterna en donde es posible conectar o desconectar el punto de conexión común de la red eléctrica con el fin de intercambiar energía. Este tipo de microrredes se encuentran adaptadas a gran parte de las cargas que se encuentran actualmente en el mercado, y sus valores de voltaje pueden manipularse con facilidad mediante el uso de transformadores, aumentando la distancia en la cual es capaz de suministrar energía. Un punto negativo es la eficiencia, debido a que en la etapa de conversión de energía existen pérdidas significativas cuando se conecta al bus AC las cargas y el sistema de almacenamiento.

Microrred AC/DC, es la combinación de las microrredes previamente mencionadas, cuyo principal beneficio es la facilidad de adaptación con distintas clases de sistemas de generación y almacenamiento de energía, a la vez que provee una elevada capacidad de integración para diversos tipos de sistemas de potencia.

Una de las ventajas que tiene la microrred DC frente a las AC es que cuentan con mayor compatibilidad de integración para los sistemas de almacenamiento de energía, debido a la sencilla conexión con los convertidores, además de poseer menores pérdidas en la etapa de conversión de energía porque solo utiliza una etapa para realizarla [8].

1.6 Sistemas de generación distribuida

Es posible definir a los sistemas de generación distribuida como al almacenamiento o generación de electricidad a pequeña o mediana escala, que se encuentra ubicado cercano a los puntos finales de consumo y que posean la posibilidad de realizar interacciones con distintas redes eléctricas para la compra y venta de esta [9].

Con el pasar del tiempo, el uso de energías renovables se ha tomado como una solución factible para los distintos problemas presentados por el poco desarrollo de las redes de transmisión en zonas aisladas para distintas comunidades rurales. Dentro de las tecnologías de la generación distribuida, algunas son capaces de producir energía para las comunidades que cuentan con una mínima o nula cantidad de electricidad, entre ellos se encuentran los paneles fotovoltaicos o aerogeneradores [10].

Un sistema de generación distribuida se puede emplear de dos maneras:

- Sistemas interconectados a la red, donde la electricidad o energía eléctrica ya se encuentra presente dentro de la misma. Estos se dividen en:
 - Sistemas encargados del intercambio de energía con la red.
 - Estaciones de alimentación.
- Sistemas aislados a la red.

Las tecnologías empleadas en la generación distribuida se dividen en convencionales y no convencionales, en donde la convencional se refiere a aquellas que hacen uso de combustibles fósiles como las microturbinas, y las no convencionales son las basadas en energías renovables como biomasa, celda fotovoltaica, etc. El uso de la generación distribuida permite desarrollar de manera óptima distintas fuentes de energía, y a su vez presenta distintas ventajas que facilitan la solución de diferentes problemas que muestra la generación tradicional [10].

- El correcto uso de la generación distribuida permite disminuir considerablemente las pérdidas de energía que se presentan en redes de distribución y transmisión; facilita la reducción del flujo de potencia a través de las redes y generando un incremento en la capacidad de distribución que posee la red.
- Al utilizar sistemas de generación distribuida en base a energía renovables disminuye de manera significativa la producción y emisión de contaminantes, esto también se debe a la disminución de pérdidas de energía al emplear estos sistemas.
- Los precios de la generación distribuida son menores respecto a la generación tradicional, lo que representa un gran beneficio para todos los consumidores de esta puesto que se consigue energía eléctrica con una alta fiabilidad y a un menor costo de servicio.

1.6.1 Energía Eólica

En la actualidad la energía eólica se encuentra entre las energías renovables mayormente empleadas debido a la abundancia del recurso, así como los costos de generación que esta posee.

Tomando como punto de partida el aerogenerador, este es un generador cuya principal función consiste en transformar la energía cinética producida por el viento, mediante el uso de un alternador y hélices; al momento de realizar la conexión hacia una red de distribución es necesario el uso de

inversores de potencia con el fin de regular el voltaje, por ende, la generación de potencia. La clasificación de los aerogeneradores es la siguiente [11]:

- Aerogenerador de eje vertical: Frecuentemente empleado en zonas donde la velocidad del viento es menor a 5m/s, con un máximo de generación de 10kW; una de las principales ventajas con la que cuenta es que no necesita de un sistema de orientación, y su diseño permite la implementación de estos a un nivel cercano a la superficie
- Aerogenerador de eje horizontal: Es el más utilizado para instalaciones a pequeña escala, en donde la velocidad del viento supera los 5 m/s; disminuye de manera considerable cualquier riesgo hacia los equipos debido a la fuerza del viento.

1.6.2 Energía Solar Fotovoltaica

La generación de energía eléctrica mediante el uso de la luz solar se encuentra en el auge de las tecnologías más usadas y prometedoras del mercado. Provee energía que genera un impacto positivo sobre el medio ambiente, a la vez que es sostenible a largo plazo. Uno de los puntos negativos que posee es su baja eficiencia energética y alto costo para la instalación de esta, lo cual es un limitante para su implementación [12].

El funcionamiento de un panel fotovoltaico radica en la conversión de la radiación solar generada por el sol a energía eléctrica, por lo cual es empleada en lugares donde existe gran cantidad de emisión solar. Existen dos maneras de conectar paneles fotovoltaicos [13]:

- Conexión en paralelo: En este tipo de conexión el valor de voltaje o tensión se mantiene constante mientras que la corriente que fluye se encuentra en aumento dependiendo del número de paneles fotovoltaicas que se encuentren en serie.

- Conexión en serie: En esta conexión la tensión irá aumentando de acuerdo con el número de paneles fotovoltaicos que se coloquen, manteniendo una corriente constante.

1.6.3 Generadores Diésel

La tecnología de los generadores a diésel permite generar entre 15kW a 20MW dependiendo de las necesidades del consumidor, por lo que se considera una de las tecnologías que cuenta con mayores avances tecnológicos. Como su nombre lo dice, su principal recurso es el diésel el cual posee una eficiencia energética de alrededor del 40%, aunque esto variará en base a distintas condiciones como tamaño del generador, temperatura de combustión, entre otras. El costo de instalación es considerablemente bajo y posee una vida útil de aproximadamente 25 años, y una de sus ventajas es la cantidad de espacio que necesita puesto que es menor respecto a otros tipos de generación. La principal desventaja de la generación a diésel es el alto nivel de contaminación producida por este tipo de tecnología, provocando una gran emisión de CO₂ en el aire y provocando afectaciones en el medio ambiente [13].

1.7 Sistemas de almacenamiento de energía

Con el fin de abastecer las demandas de potencias en distintas horas del día se emplea el uso de sistemas de almacenamiento de energía, puesto que dentro de una microrred existen altas variaciones de energía por el uso de diversas fuentes de generación. Una de las soluciones más utilizadas en la actualidad son las baterías, en base a la eficiencia y el tamaño que poseen resulta más conveniente, pero al momento de terminar la vida útil de las mismas genera una gran cantidad de desechos que genera consecuencias adversas al medio ambiente [14].

El uso de los sistemas de almacenamiento de energía se centra en tres factores:

- Tiempo de carga.
- Tiempo de descarga.
- Capacidad de almacenamiento.

Los equipos más empleados para sistemas de almacenamiento son:

- Baterías de flujo-vanadio

- Batería de plomo ácido
- Batería de ion-litio
- Celdas de hidrógeno
- Supercondensadores

1.7.1 Baterías en comunidades aisladas

El trabajo [20] presenta un análisis técnico-económico para las baterías más empleadas dentro de las microrredes, donde presenta las baterías de plomo-ácido como una tecnología madura, la cual ha logrado alcanzar costos viables para distintos proyectos, y a las de ion-litio como joven. Dentro de las conclusiones del estudio se afirma que el uso de las baterías es menor cuando se encuentran conectadas a la red, contrario cuando el sistema es aislado.

Las baterías utilizadas para un sistema fotovoltaico deben cumplir las siguientes condiciones [21]:

- Poseer una larga vida útil.
- Mantenimiento casi nulo.
- Bajo valor de autodescarga.
- Valor elevado de ciclos de carga-descarga.

Para la correcta instalación de las baterías es necesario que estas se encuentren dentro de un soporte capaz de tolerar todo tipo de cambio climático, que a su vez cuente con ventilación con el fin de refrigerar los distintos componentes eléctricos junto con las baterías. Además, el lugar donde se posicionen las baterías posea una temperatura entre 10-35 grados centígrados y que no se encuentre expuesta a luz solar de manera directa.

El proceso de reciclado de las baterías de plomo-ácido consiste en destruir la batería y recuperar su contenido químico. Posteriormente, se refinan los componentes y se vuelven a utilizar para la producción de nuevas baterías, mientras que los demás elementos se utilizan como chatarra. Muchos fabricantes tratan de buscar una nueva forma de uso para las baterías de

litio, pero a diferencia de las anteriores, la cantidad de litio recuperado es pequeña y barata comparado con el cobalto o níquel [22].

1.8 Demanda de energía

Conocer la demanda de la carga y los patrones de consumo, son vitales para el diseño de cualquier sistema eléctrico, en este trabajo para el dimensionamiento de la microrred. La carga bajo estudio corresponde a comunidad Bella Vista, ubicada en el golfo de Guayaquil. Al tratarse de una comunidad relativamente pequeña podemos clasificar las cargas en comerciales y residenciales, para el dimensionamiento se debe considerar las demandas máximas del sistema, y cuál es la carga que se tiene instalada, o al conjunto de todas las potencias nominales de los aparatos existentes, así como la obtención de las curvas de carga en el tiempo.

1.9 Aspectos generales de las zonas no interconectadas en Guayaquil

1.9.1 Caso de estudio: Comunidad Cerrito de los Morreños

La comunidad Cerrito de los Morreños se ubica en el Golfo de Guayaquil, provincia de Guayas – Ecuador, coordenadas 2°28'25.0"S 79°54'28.2"W, se trata de una comunidad aislada como puede observarse en la Figura 1.2, con aproximadamente 800 habitantes de forma permanente y alrededor de 1000 en épocas festivas. Esta comunidad no cuenta con interconexión al sistema nacional de electricidad, es de difícil acceso por lo que para abastecerse de energía utilizan un generador diésel de 185 kVA que únicamente funciona durante 6 horas diarias, con un consumo promedio diario de 20 galones de diésel.



Figura 1.2. Vista de Google Maps de la comunidad Cerrito de los Morreños.

1.10 Técnicas de optimización

Un problema de optimización consiste en maximizar o minimizar una función real, considerando un grupo definido de valores y restricciones que pueden tomar las variables de entrada. Se han desarrollado gran cantidad de métodos de optimización, cada uno funciona o da mejores resultados para un tipo específico de problema de optimización, así tenemos, técnicas determinísticas, estocásticas, estadísticas, modernas. Cada una de estas técnicas depende del tipo problema y de la naturaleza de las variables y decisiones a tomar, el problema puede resolverse según:

- Programación lineal: Método Simplex.
- Programación no lineal: con restricciones, sin restricción, restricciones de igualdad, restricciones de desigualdad.
- Programación entera mixta.
- Programación lineal entera mixta: Método de ramificación y acotamiento.
- Programación no lineal entera mixta.

1.11 Técnicas de *machine learning* para optimización

Muchas veces se trabaja con problemas complejos que requieren ser divididos en tareas menos complejas para si poder resolver el problema global, en esto los

algoritmos de *machine learning* o aprendizaje automático son capaces de obtener patrones de comportamiento de grandes conjuntos de datos. Para este trabajo por ejemplo se requiere obtener días representativos para el dimensionamiento de la planta de paneles solares, y las tareas más habituales del ML que se relacionan con este trabajo son [15]:

- Clasificación: Organizar por clases un conjunto de datos.
- Regresión: Predicción o estimación numérica de variables.
- Agrupamiento: Identifica grupos de datos dentro de un conjunto mayor considerando la similitud entre los datos.

1.12 Herramientas computacionales

1.12.1 Modelado en PVSyst

Este software permite el estudio, simulación y análisis de sistemas fotovoltaicos, tiene herramientas de diseño que permiten dimensionar el tamaño de las instalaciones fotovoltaicas considerando los datos de radiación solar, que provienen de base datos meteorológicas, para un diseño en 3D que habilita la posibilidad de considerar el efecto de las sombras según la ubicación del sol sobre los paneles. Además, es posible realizar un análisis económico considerando costos reales de los componentes del sistema [16].

1.12.2 A *Mathematical Programming Language*

AMPL es un lenguaje de optimización algebraica, que soporta docenas de solvers de código abierto y comerciales como CPLEX, CBC, etc. La ventaja de AMPL es que la sintaxis es semejante a la notación matemática de los problemas de optimización, AMPL soporta una gran variedad de tipos de problemas, así como [17]:

- Programación lineal.
- Programación no lineal.
- Programación cuadrática.
- Programación entera mixta.
- Optimización global.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se plantea el proceso necesario para el diseño óptimo de una microrred híbrida para la comunidad Cerrito de los Morreños, el siguiente diagrama de flujo muestra la metodología a seguir:

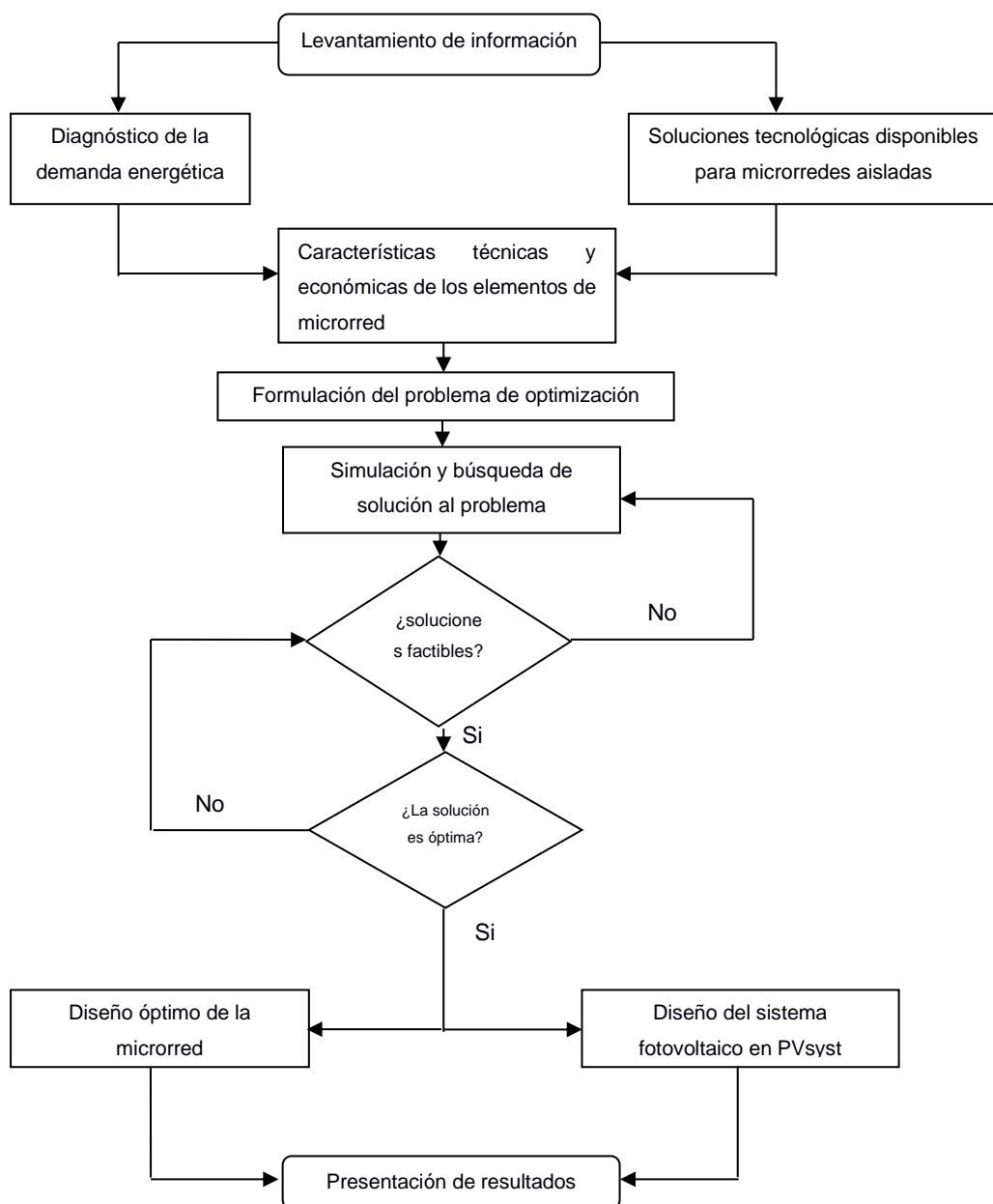


Figura 2.1. Metodología para el diseño óptimo de la microrred

2.1 Levantamiento de información

El punto de partida para el diseño de la microrred es conocer cuál es el estado actual de la demanda energética en la zona bajo estudio. Este levantamiento se realizó el 12 de noviembre del 2021, con el objetivo de conocer la demanda actual de la comunidad y el estado de los sistemas fotovoltaicos existentes, mediante una encuesta a los habitantes en cada domicilio.

2.1.1 Matriz de obtención de información

Para el diseño de la matriz que se utilizó en el levantamiento de carga se tomaron en consideración varios aspectos en base a experiencias previas de levantamientos realizados en la comunidad, se consideran dos tipos de cargas.

- *Aparatos de consumo intermitente*, son aquellos equipos que tienen más de una potencia durante sus ciclos de funcionamiento, por ejemplo, las refrigeradoras, congeladores y lavadoras.
- *Aparatos de consumo permanente*, son aquellos equipos que tienen una única potencia de consumo, como lo son la televisión, luminaria, planta, entre otros.

De experiencias previas se conoce que algunos de los domicilios tienen varias refrigeradoras, congeladores o lavadoras; para ello se agregan varias filas a la matriz donde poder hacer un registro particular a cada equipo. Para los equipos de consumo intermitente se tienen como datos de interés la potencia máxima, marca y modelo, si posee etiqueta, el consumo anual y una descripción general del equipo en base a observaciones. Para los de consumo permanente, la potencia, horas de uso estimadas, cantidad, y observaciones. Adicional a estos datos, se registró la información de los sistemas fotovoltaicos existentes en la isla, cuyo interés se centró únicamente en conocer si este sistema seguía funcionando y cuales podrían ser las posibles fallas para que ya no funcionen, en la Tabla 2.1 se puede observar la matriz utilizada para el levantamiento.

Tabla 2.1 Matriz utilizada para el levantamiento de información en la comunidad cerrito de los Morreños.

Levantamiento de datos Cerritos de los Morreños					
Número de casa:					
Número de habitantes:					
Representante:					
Aparatos de consumo intermitente					
Carga	Potencia máxima (W)	Marca y Modelo	Posee Etiqueta	Consumo Anual (kWh/Año)	Observación
Refrigeradora					
Lavadora					
Aparatos de consumo Permanente					
Carga	Potencia (W)	Horas de uso estimadas	Cantidad	Posee Etiqueta	Observación
Televisión					
Luminaria Fluorescente					
Luminaria Ahorrador					
Luminaria LED					
Licuadora					
Computadora					
Celulares__/_Tablet_					
Plancha					
DVD					
Router					
Otros:					
Sistema Fotovoltaico					
Funcionando		Posible Falla:			
Si	No				

2.1.2 Elección de población – muestra

Al tratarse de una comunidad pequeña, se decidió realizar el levantamiento de carga de cada una de las viviendas, con la finalidad de obtener datos precisos de la carga actual en la comunidad. De esta manera no se realiza un muestreo estadístico, sino que se decidió trabajar con toda la población.

2.2 Demanda de energía

Los datos de demanda energética en la comunidad mediante el levantamiento que se realizó se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Datos de potencia instalada y consumo por tipo de usuarios.

Usuario	Aparatos	Cantidad	Potencia instalada (kW)	Consumo anual (kWh/año)
Residencial	Refrigeradora	24	2,96	7590,11
	Congelador	37	4,33	15953,06
	Lavadora	42	16,86	5623,00
	TV	77	8,78	19092,20
	Licuada	33	14,67	1338,64
	Plancha	26	27,80	2536,75
	Tostadora	9	6,22	567,58
	Computadora	15	2,46	2688,23
	Iluminación	388	7,73	12544,32
	Celulares	164	2,69	1963,70
	Otros*	-	4,95	1426,62
Iglesia	Alumbrado	9	0,18	37,44
	Parlantes	3	3,30	1029,60
	Ventiladores	2	0,16	99,84
Escuela	Fluorescente	17	0,68	1414,4
	Alumbrado LED	14	0,14	291,2
	TV	1	0,06	31,2
	Computadoras	20	3,6	3744
	Parlante	2	1,2	1248
Alumbrado Público	Alumbrado	29	4,35	19053

*El apartado Otros corresponde a electrodomésticos que están presentes en menor cantidad en las viviendas de la comunidad, se las agrupa en una categoría y son utilizadas para estimar el factor de seguridad para la demanda máxima de la comunidad.

2.2.1 Lineamientos para obtener curva de carga

La frecuencia de uso de los aparatos eléctricos se basa en la disponibilidad del grupo electrógeno, que funciona únicamente durante 6 horas al día, en el horario de 18h00 a 24h00, por lo cual, los datos de uso diario no corresponden a datos reales. Para el planteamiento de las curvas de carga diaria se va a interpolar la información asumiendo que con la microrred se dará servicio las 24 horas al día. Para la estimación del tiempo de consumo, se basa en los patrones de ocupación de las viviendas, es decir, se utilizan los datos de reales de las cargas existentes, pero se estima el cómo utilizarían los consumidores de Cerritos de los Morreños los aparatos bajo el nuevo escenario de disponibilidad energética.

2.2.2 Curva característica por microrred

Con las estimaciones de las curvas de demanda diaria de electricidad por cada tipo de usuario, se procede a la determinación de la demanda diaria de toda la comunidad, Figura 2.2. El pico de demanda máxima ocurre a las 18h00 con un valor de 53.95 kW.

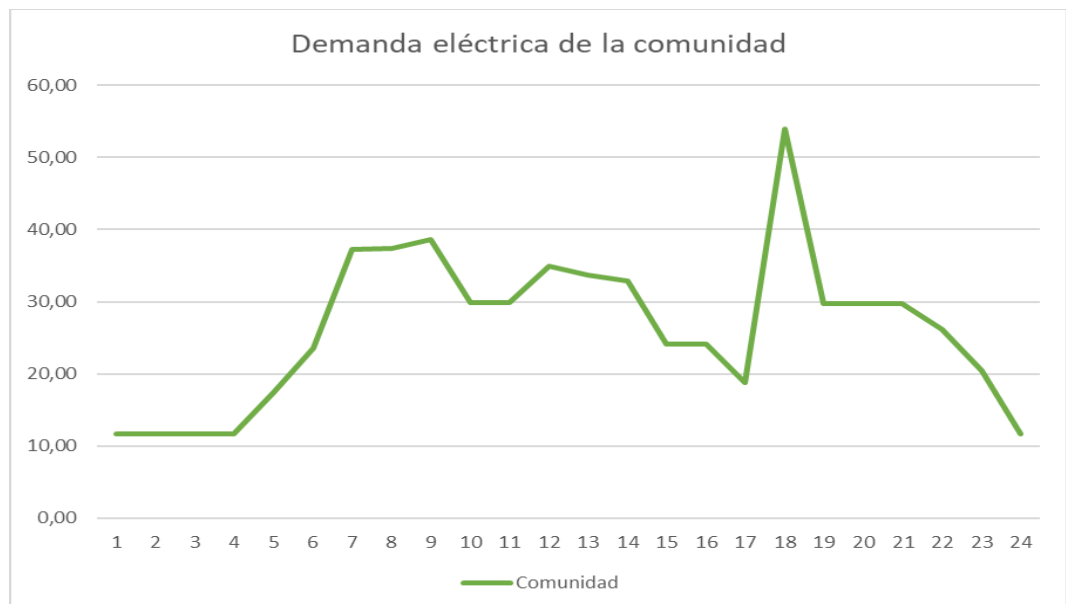


Figura 2.2 Curva de demanda diaria de la comunidad

2.2.3 Proyección de demanda en la comunidad

El pico de demanda máxima se determina en 53,95 kW, la categoría de otros aparatos en la carga residencial corresponde al 5% de la demanda de este sector, por tanto, se adiciona este porcentaje adicional al pico de demanda máxima, obteniendo 56.65 kW. Además, se debe considerar un índice de crecimiento para el diseño y proyección de demanda.

Según datos del Banco Mundial, en Ecuador la tasa de crecimiento rural tiene tendencia a disminuir, para el año 2020 se ubica en el 1.038% anual. El trabajo realizado en [18] proporciona una visión de cómo podría abordarse el crecimiento de la demanda en comunidades rurales aisladas, en este se presentan tres casos de estudios, mediante el planteamiento y evaluación de diversos escenarios, en el que se obtiene una tasa aproximada de crecimiento del 1% anual. Otro estudio realizado en la comunidad Bellavista [4], una isla vecina al caso de estudio de este trabajo Cerritos de los Morreños, y que tiene similares actividades económicas y patrones de consumo energético utilizan una tasa de crecimiento del consumo del 1% anual para el diseño. En base a estos datos y experiencias previas, se decide seleccionar una tasa anual de crecimiento de 1% para un horizonte de 15 años, por lo tanto, la demanda máxima proyectada para la comunidad y que se utiliza para el dimensionamiento de la microrred es de 65.16 kW.

2.3 Soluciones tecnológicas disponibles para microrredes aisladas

En esta sección se estudia la disponibilidad de las fuentes de energías renovables en la zona, se utilizan los datos históricos de viento, radiación solar y temperatura, así como se muestran en la Figura 2.3, disponibles en la base de datos de la NASA y mediante dos técnicas de *machine learning* para agrupamiento de datos *k-means* implementado en Matlab y *gaussian mixture models* implementado en Python, se procedió a determinar los meses representativos de radiación, temperatura, velocidad del viento. Los datos que se han utilizado corresponden a tres años de datos 2018, 2019 y 2020 con una frecuencia de una muestra por hora.

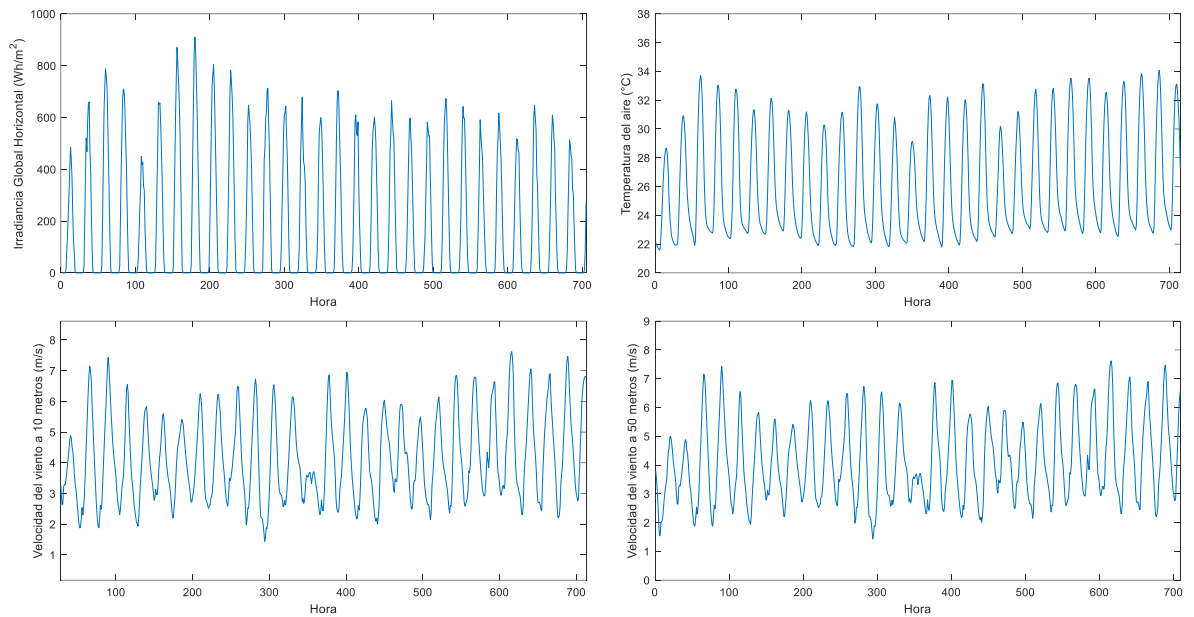


Figura 2.3 Series de tiempo de Irradiancia, temperatura y velocidad del viento correspondiente a enero 2020.

Un problema que se presenta cuando se realiza la agrupación de datos mediante alguna técnica, es la selección óptima del número de grupos, una mala elección de este puede provocar que agrupemos datos heterogéneos, o que se hagan demasiados grupos de datos homogéneos. A falta de un criterio objetivo para la selección del número óptimo de grupos en este trabajo se utiliza el método de codo por su sencillez en la implementación y resultados que son suficientes para ayudar a tomar una decisión de cual sería el número adecuado de grupos. Este método consiste en obtener el punto en el cual ocurre un cambio brusco en la inercia intraclase de un conjunto de datos, observar la Figura 2.4. Se puede ver que en 2 se da el cambio de pendiente, por lo cual nos dice que el número óptimo de grupos es 2.

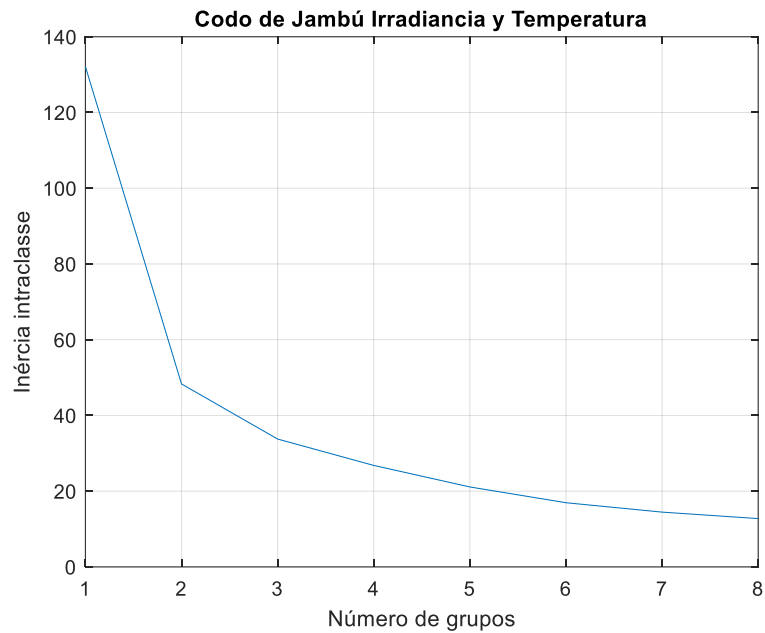


Figura 2.4 Codo de Jambú datos para elección óptima de número de grupos.

Luego con el número de grupos definidos se procede a la aplicación del algoritmo de k-means para hallar los representantes de cada conjunto de datos. La Figura 2.5 muestra un ejemplo de los grupos de irradiación y temperatura del aire para el mes de enero del 2020.

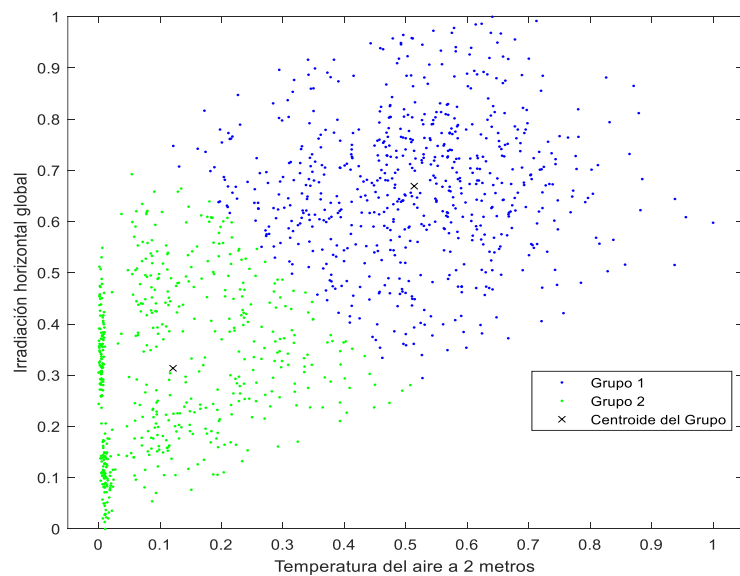


Figura 2.5 Gráficos de dispersión y clúster para te irradiación y temperatura enero 2020

El procedimiento se aplica a cada uno de los conjuntos de datos sistemáticamente para cada mes en un periodo de 3 años. Los resultados de aplicar las técnicas de *machine learning* en la elección de datos representativos para cada variable se presentan en la Tabla 2.3 y Tabla 2.4, y en los diagramas de barras a continuación.

Tabla 2.3 Datos representantes de radiación solar, temperatura, velocidad del viento, y producción energética obtenidos con el algoritmo de k-means.

Mes	Días	Horario para Irradiancia y Temperatura	Radiación horizontal Global Wh/m ² /día	Temperatura del aire °C	Velocidad del viento a 10 metros m/s	Velocidad del viento a 50 metros m/s	Energía kWh/ m ²
Enero	31	6:00 - 8:00 16:00 - 18:00	117.28	26.31	5.38	6.17	14.54
		8:00 - 16:00	471.50	31.53	3.20	3.92	116.93
Febrero	28	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	108.62	26.22	2.99	3.85	15.21
		9:00 - 16:00	452.80	30.27	4.83	5.66	88.75
Marzo	31	6:00 - 9:00 15:00 - 18:00	106.84	25.76	2.75	3.71	19.87
		9:00 - 15:00	462.78	29.26	4.23	5.38	86.08
Abril	30	6:00 - 8:00 16:00 - 18:00	122.53	26.43	2.53	3.45	14.70
		8:00 - 16:00	524.01	31.02	4.52	5.44	125.76
Mayo	31	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	105.96	26.32	2.92	3.70	16.42
		9:00 - 16:00	418.54	31.80	5.09	5.98	90.82
Junio	30	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	100.01	25.71	3.31	3.95	15.00
		9:00 - 16:00	386.34	31.99	5.72	6.54	81.13
Julio	31	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	104.04	25.10	3.41	3.96	16.13
		9:00 - 16:00	380.34	31.91	6.09	6.90	82.53
Agosto	31	6:00 - 10:00 16:00 - 18:00	123.06	24.88	3.52	3.99	22.89
		10:00-16:00	474.84	31.92	6.28	7.09	88.32
Septiembre	30	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	134.38	24.87	3.67	4.15	20.16
		9:00 - 16:00	487.96	31.58	6.38	7.08	102.47
Octubre	31	6:00 - 9:00 16:00 - 18:00	129.33	24.81	3.55	3.90	20.05
		9:00 - 16:00	438.21	30.96	6.16	6.73	95.09
Noviembre	30	6:00 - 8:00 16:00 - 18:00	126.31	25.12	3.39	3.82	15.16
		8:00 - 16:00	449.12	30.59	5.76	6.40	107.79
Diciembre	31	6:00 - 9:00 15:00 - 18:00	120.48	25.80	3.59	4.05	22.41
		9:00 - 15:00	450.52	30.98	5.73	6.34	83.80
Producción energética anual total kWh/ m²							1362.01

Tabla 2.4 Datos representantes de radiación solar, temperatura y velocidad del viento obtenidos con *Gaussian Mixture Models* (GMM).

Mes	Días	Radiación horizontal Global (Wh/m ² /día)	Varianza Irradiancia	Peso Irradiancia	Temperatura del aire (°C)	Varianza temperatura	Peso Temperatura	Velocidad del viento a 10 metros (m/s)	Varianza velocidad a 10 metros	Peso Velocidad a 10 metros	Velocidad del viento a 50 metros (m/s)	Varianza velocidad a 50 metros	Peso Velocidad a 50 metros (m/s)
Enero	31	48.26	1730.10	0.26	23.97	1.13	0.55	3.24	0.78	0.578	3.99	1.13	0.57
		404.32	28885.92	0.74	30.26	6.93	0.45	5.45	0.96	0.42	6.19	1.21	0.43
Febrero	28	49.10	1777.62	0.28	24.45	0.68	0.55	3.05	0.72	0.66	3.87	1.29	0.51
		385.96	25327.73	0.72	29.14	5.17	0.45	4.94	0.87	0.34	5.56	1.05	0.49
Marzo	31	43.27	1429.02	0.27	24.25	0.89	0.60	2.85	0.48	0.60	3.74	0.96	0.45
		392.96	29263.57	0.73	28.72	2.85	0.40	4.31	0.62	0.40	5.32	0.76	0.55
Abril	30	102.68	6716.24	0.35	23.91	0.90	0.55	2.56	0.60	0.61	3.51	1.20	0.60
		499.49	24754.33	0.64	29.91	6.04	0.45	4.55	0.73	0.39	5.45	1.27	0.40
Mayo	31	116.41	6573.25	0.39	23.78	1.04	0.56	2.98	0.56	0.56	3.76	0.84	0.60
		422.17	12239.78	0.61	30.65	6.32	0.43	5.10	0.77	0.44	6.03	1.15	0.40
Junio	30	103.13	5165.20	0.34	23.11	1.63	0.57	3.32	0.69	0.42	3.97	0.98	0.38
		377.91	15486.53	0.66	30.86	7.28	0.43	5.70	0.54	0.58	6.57	0.78	0.62
Julio	31	37.26	1390.44	0.23	22.29	1.08	0.53	3.44	0.53	0.60	3.98	0.72	0.63
		324.52	21046.67	0.77	30.02	9.99	0.47	6.01	0.72	0.40	6.84	0.97	0.37
Agosto	31	52.65	2430.59	0.25	21.90	1.83	0.56	3.57	0.52	0.60	4.07	0.71	0.63
		401.60	31985.06	0.75	30.25	9.31	0.44	6.28	0.84	0.40	7.07	1.05	0.37
Septiembre	30	166.88	12578.60	0.41	21.96	1.43	0.55	3.71	0.55	2.59	4.21	0.76	0.62
		494.78	22688.94	0.59	29.91	9.49	0.45	6.35	0.79	0.41	7.09	0.98	0.38
Octubre	31	50.19	227.25	0.15	22.20	0.78	0.52	3.63	0.69	0.61	3.99	0.90	0.60
		382.30	25951.52	0.85	29.15	10.13	0.48	6.22	0.91	0.39	6.78	1.26	0.40
Noviembre	30	48.33	201.35	0.15	22.58	1.15	0.56	3.40	0.69	0.60	3.85	0.95	0.63
		378.03	27117.34	0.85	29.39	7.22	0.44	5.75	0.88	0.40	6.47	1.10	0.37
Diciembre	31	125.41	9049.82	0.44	23.23	0.91	0.54	3.63	0.74	0.62	4.11	0.95	0.41
		546.75	13099.21	0.56	29.62	7.15	0.46	5.78	0.85	0.38	6.40	1.12	0.59

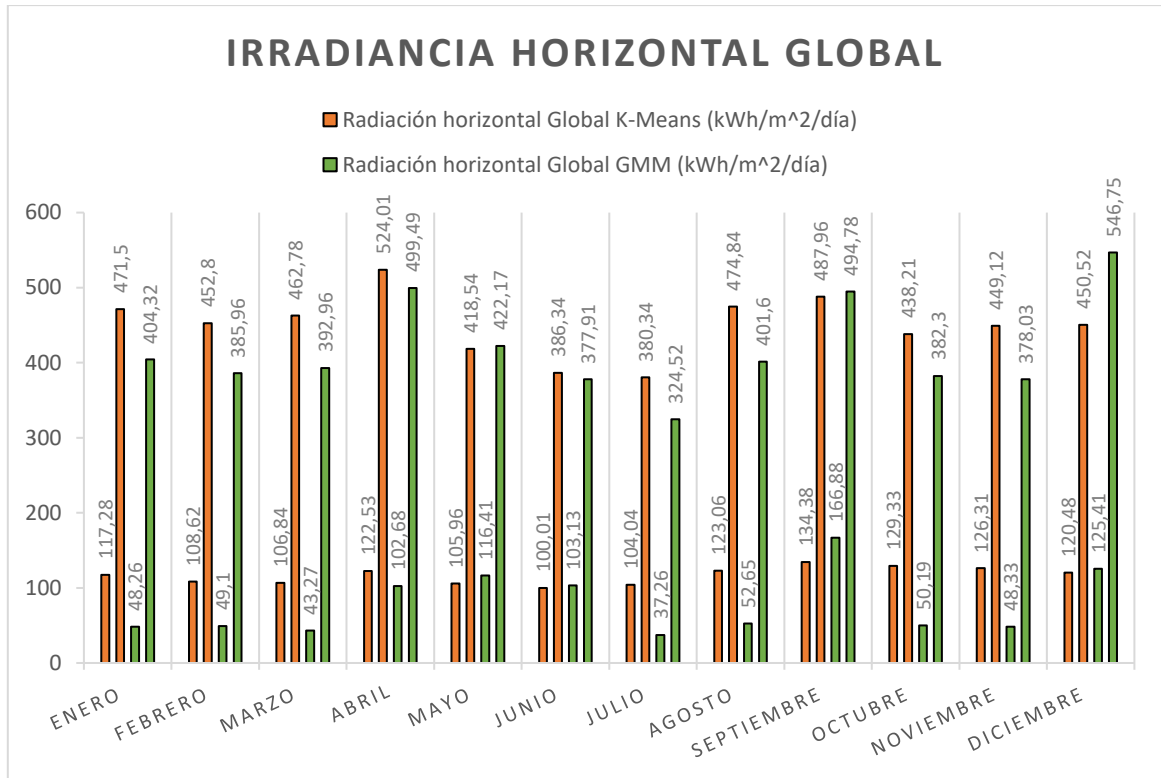


Figura 2.6 Radiación solar horizontal global con k-means y GMD

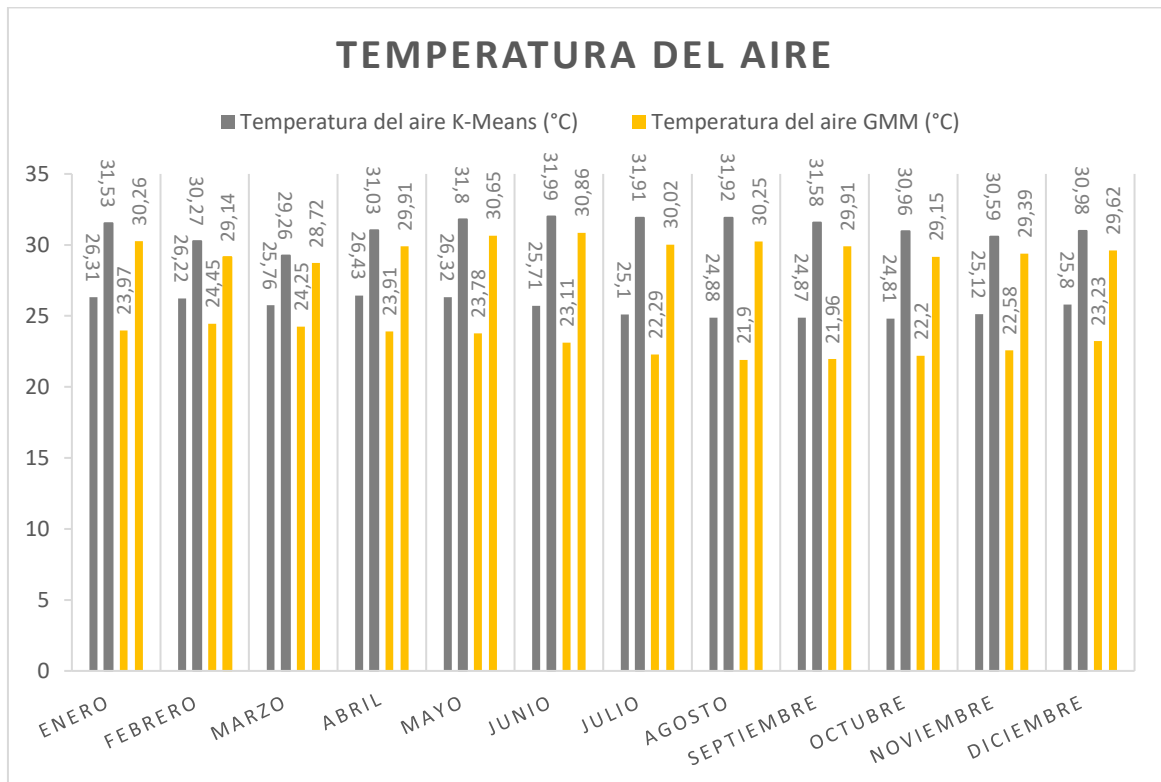


Figura 2.7 Temperatura del aire con k-means y GMD

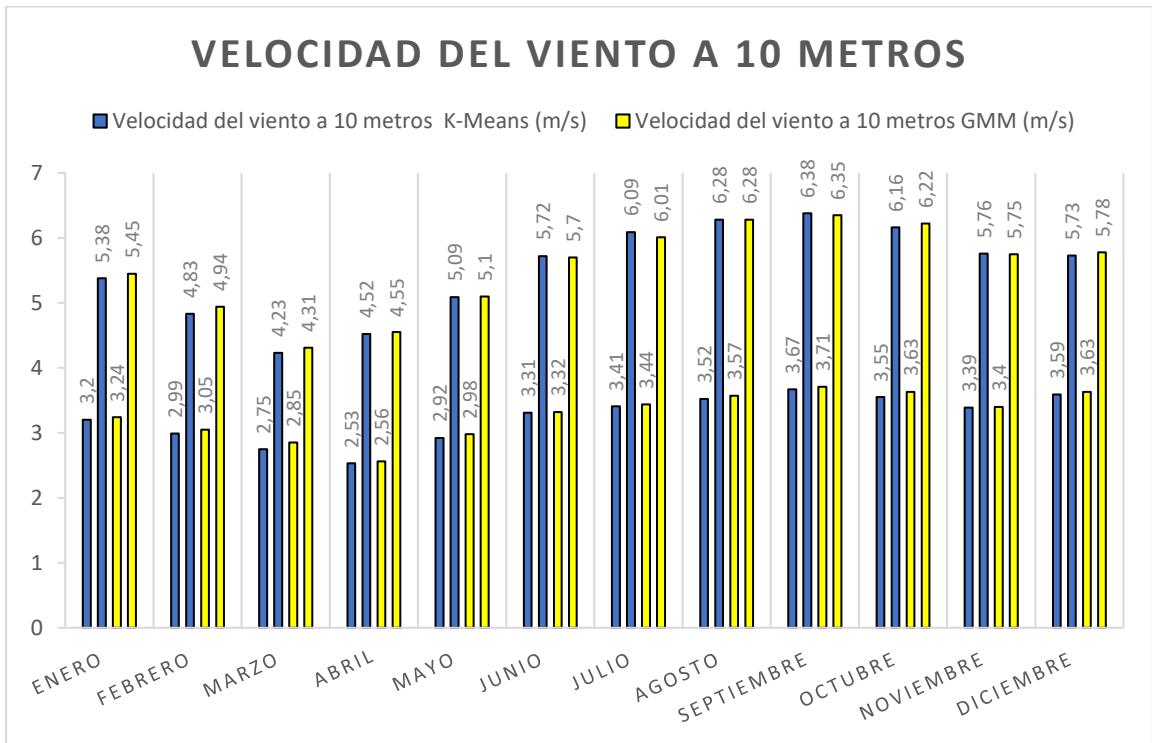


Figura 2.8 Velocidad del viento a 10 metros de altura con k-means y GMD.

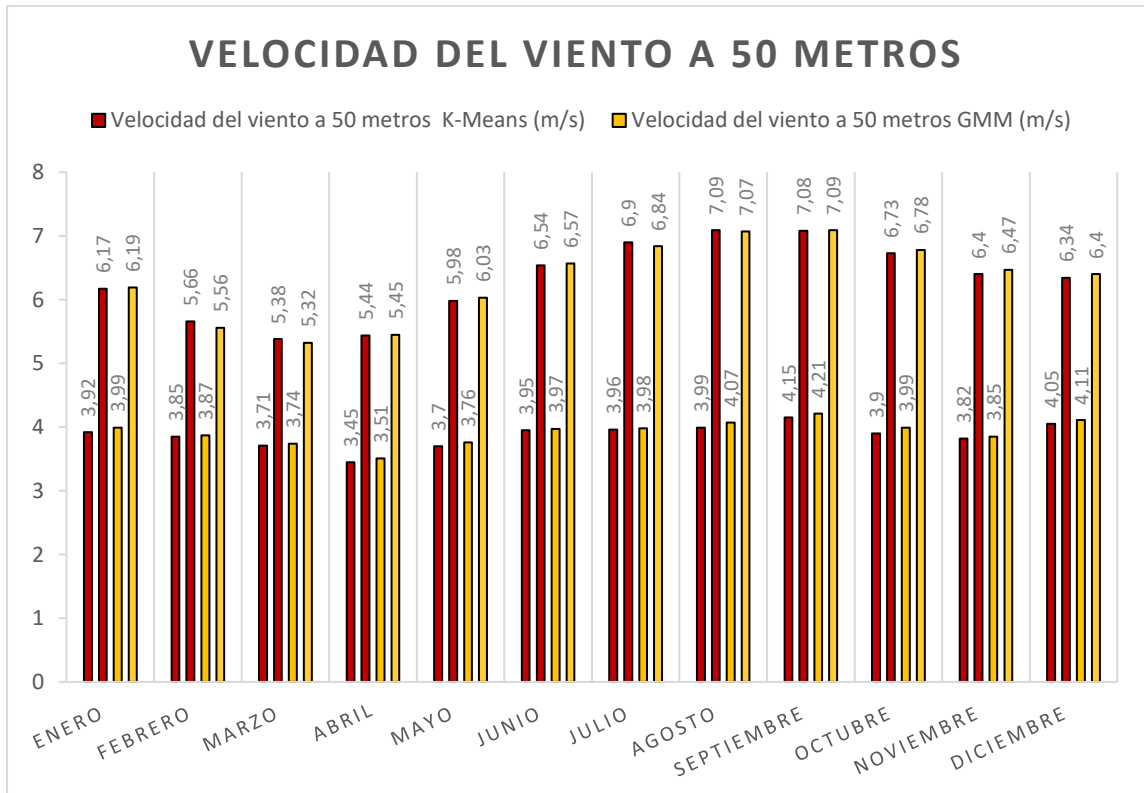


Figura 2.9 Velocidad del viento a 50 metros de altura con k-means y GMD

2.4 Factor dependiente de las condiciones ambientales y técnicas para la generación solar

Con base a los valores representativos obtenidos mediante las técnicas de *machine learning* en cada hora del día para cada mes, se procede a obtener el factor que será el enlace entre la optimización. Se define este factor que depende del tiempo como sigue:

$$F_t^{GR} = \frac{\text{potencia de salida de la celda}}{\text{potencia nominal del panel}} = \frac{P_{out}}{P_{STC}} \quad \mathbf{2-1}$$

La potencia generada por los paneles fotovoltaicos se puede calcular haciendo uso de las ecuaciones $T_{cell} = T_{amb} + \frac{NOCT-20}{800} G$

$$2-2 P_{out} = P_{STC} \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \alpha (T_{cell} - 25)] \right\} \quad \mathbf{2-3 [4]:}$$

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{NOCT-20}{800} G \quad \mathbf{2-2}$$

$$P_{out} = P_{STC} \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \alpha (T_{cell} - 25)] \right\} \quad \mathbf{2-3}$$

Donde

G : Irradiación solar W/m²

T_{amb} : Temperatura ambiente °C

$NOCT$: Condición nominal de temperatura °C

α : Coeficiente de temperatura para la producción de potencia del panel %/°C

T_{cell} : Temperatura de la celda °C

P_{STC} : Potencia nominal del panel bajo condiciones estándar de operación W

P_{out} : Potencia de salida del panel kW

Haciendo uso de estas expresiones, con los datos de irradiancia y temperatura de la Tabla 2.3, además de los datos técnicos del panel presentados en la Tabla 2.6 y los demás parámetros que se adjunta en el Apéndice G, se obtiene el factor representativo para la generación solar en cada mes del año, y se presentan en Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Factor dependiente del tiempo representativo de cada mes

Mes	Días	Horario para Irradiancia y Temperatura	Factor dependiente del tiempo de la generación renovable F_t^{GR}
Enero	31	6:00 - 8:00	0.115237862
		16:00 - 18:00	
		8:00 - 16:00	0.436408465
Febrero	28	6:00 - 9:00	0.106865753
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.422023184
Marzo	31	6:00 - 9:00	0.105307313
		15:00 - 18:00	
		9:00 - 15:00	0.432455617
Abril	30	6:00 - 8:00	0.120274625
		16:00 - 18:00	
		8:00 - 16:00	0.482936213
Mayo	31	6:00 - 9:00	0.104242455
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.389418902
Junio	30	6:00 - 9:00	0.098667506
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.360563033
Julio	31	6:00 - 9:00	0.102819676
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.355319452
Agosto	31	6:00 - 10:00	0.121455336
		16:00 - 18:00	
		10:00-16:00	0.438678263
Septiembre	30	6:00 - 9:00	0.132466051
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.450679551
Octubre	31	6:00 - 9:00	0.127586571
		16:00 - 18:00	
		9:00 - 16:00	0.408065876
Noviembre	30	6:00 - 8:00	0.124511957
		16:00 - 18:00	
		8:00 - 16:00	0.41827107
Diciembre	31	6:00 - 9:00	0.118555031
		15:00 - 18:00	
		9:00 - 15:00	0.418890962

2.5 Características técnicas y económicas de los elementos de la microrred

Los paneles fotovoltaicos que se encuentran instalados en la comunidad Cerritos de los Morreños tienen aproximadamente 15 años, por lo cual la tecnología y potencia de estos es inferior a los paneles que se poseen actualmente. Se procede a mostrar en las siguientes tablas, distintos modelos de los componentes que conforman una microrred, en donde a partir de una revisión de las nuevas tecnologías disponibles en el mercado y se tomó varios modelos comúnmente empleados para el diseño.

Tabla 2.6 Especificaciones técnicas panel 520 W

Potencia nominal	520 W
Tolerancia	+5/0%
Eficiencia	20.09%
Voltaje de máxima potencia	41.1 V
Corriente de máxima potencia	12.66 A
Voltaje de circuito abierto	48.92 V
Corriente de circuito abierto	13.55 A
Peso	28.6 kg
Área	2.279*1.134 m ²
Temperatura de operación	-40°C – 85°C
Precio en el mercado nacional	\$230

Tabla 2.7 Especificaciones técnicas panel 450 W

Potencia nominal	450 W
Tolerancia	+5/0%
Eficiencia	20.3%
Voltaje de máxima potencia	41.52 V
Corriente de máxima potencia	10.84 A
Voltaje de circuito abierto	49.7 V
Corriente de circuito abierto	10.48 A
Peso	24.7 kg
Área	1.046*2.067 m ²
Temperatura de operación	-40°C – 85°C
Precio en el mercado nacional	\$200

Tabla 2.8 Especificaciones técnicas panel 405 W

Potencia nominal	405 W
Tolerancia	+3/0%
Eficiencia	20.13%
Voltaje de máxima potencia	42 V
Corriente de máxima potencia	9.65 A
Voltaje de circuito abierto	50.1 V
Corriente de circuito abierto	10.48 A
Peso	56 lbs (25.4 kg)
Área	1.046*2.067 m ²
Temperatura de operación	-40°C – 85°C
Precio en el mercado nacional	\$199

Tabla 2.9 Especificaciones técnicas batería 24V/2000 Ah

Capacidad nominal	200 Ah
Tiempo de vida útil	10 años
Voltaje nominal	24 V
Peso	34 kg
Dimensiones	460*261*210 mm
Corriente de carga	<50 A
Corriente de descarga continua	<80 A

Tabla 2.10 Especificaciones técnicas batería 48V/2000 Ah

Capacidad nominal	200 Ah
Tiempo de vida útil	10 años
Voltaje nominal	48 V
Peso	34 kg
Dimensiones	730*405*230 mm
Corriente de carga	80 A
Corriente continua de descarga	80 A (ajustable)

Tabla 2.11 Especificaciones técnicas inversor monofásico

Voltaje nominal de salida AC	220/230 V
Frecuencia nominal	50/60 Hz
Máximo voltaje de entrada	480 V
Voltaje nominal de entrada DC	380 V
Dimensiones	280*370*142 mm
Eficiencia del inversor	99.2
Precio de mercado nacional	≈ \$900

Tabla 2.12 Especificaciones técnicas inversor trifásico

Voltaje nominal de salida AC	380/220; 400/230 V
Frecuencia nominal	50/60 Hz
Máximo voltaje de entrada	900 V
Voltaje nominal de entrada DC	750 V
Dimensiones	540*315*191 mm
Eficiencia del inversor	98
Precio de mercado nacional	≈ \$1200

Tabla 2.13 Especificaciones técnicas gestor energético

Tensión de entrada	100-240 Vac
Frecuencia Nominal	50/60 Hz
Consumo de potencia	5-8 W
Salidas libres de potencial	2x (250 V-10 A)
Precio estimado	\$830.00

Actualmente se encuentra instalado en la comunidad de Cerrito de los Morreños un generador diésel con una potencia de 185 kVA que posee las características de la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Especificaciones técnicas generador INMESOL AI-210

Potencia nominal	185 kVA
Potencia de emergencia	204 kVA
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	220/127 V
Factor de potencia	0.8
Número de cilindros	6
Capacidad Aceite (L)	17.2
Motor de arranque (kW)	3
Número de polos	4
Precio en el mercado nacional	\$34.577,75

2.5.1 Consumo del combustible diésel

El grupo electrógeno que se procederá a emplear como referencia en el posterior diseño de la microrred es un generador diésel cuyas características se encuentran en Tabla 2.14. Para de la cantidad de consumo de diésel se usa la cantidad de litros por hora que consume el generador y se multiplica por el valor de venta de diésel, que se presenta en la Tabla 2.15. Con esto es posible conocer la cantidad y costo del combustible que consume el generador por día.

Tabla 2.15 Precios de combustible diésel Ecuador 2021

Precio del diésel, Ecuador noviembre 2021		
	Litro	Galón
Dólares	0.502	1.900
Euros	0.444	1.681

2.5.2 Costos operativos de la microrred

Para lograr plantear con mayor exactitud el modelo de optimización del diseño de la microrred se procedió a determinar de manera aproximada los costos de operación y mantenimiento para la microrred, junto con los salarios de los operadores de la Tabla 2.16 [19].

Tabla 2.16 Salarios básicos para operadores

Descripción	Cantidad	Salario	Total
Electricista	1	\$415.67	\$415.67
Técnico de mantenimiento	1	\$498.72	\$498.72

El presupuesto referencial para el servicio de compra e instalación del generador es mostrado en la Tabla 2.17, junto con el servicio de mantenimiento decenal se procede a mostrar desglosado en la tabla junto con los costos de cada uno de ellos.

Tabla 2.17 Cotización para compra e implementación del generador

Unidad	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Generador INMESOL AI-210	1	\$34577.75	\$34577.75
Mano de obra				
h	Electricista	0.479	\$8.02	\$3.84
h	Ayudante electricista	0.479	\$4.98	\$2.39
Herramienta menor				
%	Herramienta menor	2	\$34583.98	\$691.68
			Costo final	\$35275.66
Costo de mantenimiento decenal			\$86425.37 en los primeros 10 años	

El costo de mantenimiento decenal se refiere al valor económico que supone mantener al generador posterior a su instalación durante los primeros diez años, proporcionando un mantenimiento preventivo y correctivo en el caso de necesitarse.

Para un sistema fotovoltaico, independientemente que sea aislado o híbrido los gastos que se consideran para este principalmente son de equipo, transporte, obra civil, entre otros resumidos en la Tabla 2.18. Dentro de los gastos anuales fijos es necesario considerar el costo de operación y mantenimiento preventivo y correctivo del sistema. El caso del mantenimiento de los paneles consiste en la limpieza de estos, ya sea de polvo o cualquier suciedad que se encuentre presente en ellos, por lo que para este caso se considera un costo de operación y mantenimiento definido por la siguiente ecuación [7].

$$\text{Costo de operación y mantenimiento} = 0.01 \text{Costo total de inversión } 2-4$$

Tabla 2.18 Costos de elementos de una microrred

Descripción	Costos
Paneles solares	\$200
Inversor	\$1200
Batería	\$2300
Generador	\$34577.75
Mantenimiento del generador en los primeros 10 años	\$86425.37
Salario electricista	\$415.67
Salario técnico en mantenimiento	\$498.72
Galón de diésel	\$1.90

2.5.3 Datos de costos para ingresar en el modelo de optimización.

Límite máximo de generación renovable

Es el valor máximo que se puede generar dentro de la comunidad por parte de las energías renovables; tomando como referencia el valor de pico de demanda máxima mostrado en la Figura 2.2, el cual es de 53.95 kW, y tomando en cuenta las consideraciones necesarias para la proyección de la demanda que ya se describieron en la sección, se establece el límite de generación en 65.16 kW.

Costo de instalar las fuentes solares

Es el valor determinado por la cantidad de paneles que se procederá a emplear y el mantenimiento de estos para la generación de 1kW. Para el caso de optimización se emplearon los paneles de 520 W, los cuales poseen un costo de aproximadamente \$230, y se utilizaran dos para obtener los 1000W deseados. Utilizando la ecuación $\text{Costo de operación y mantenimiento} = 0.01 \text{Costo total de inversión}$ 2-4 se obtuvo el valor de operación y mantenimiento para dichos paneles.

$$\text{Costo de operación y mantenimiento} = 0.01(230 * 2) = 4.6 \$/kW$$

La suma de ambos valores corresponde al costo por instalar fuentes solares, que resulta ser de 464.6 \$/kW.

Costo por corte de carga

Es el valor correspondiente a la energía no suministrada por parte de la red, en Ecuador según la resolución Nro. 025/11 emitida por la ARCONEL, define al costo de energía no suministrada para generación hidroeléctrica de 0.646 \$/kWh, y se empleará este valor para el modelo de optimización [23].

Costo por invertir en generación térmica

Para calcular el costo perteneciente a la generación por parte del grupo electrógeno es necesario considerar la obtención de un generador nuevo, así como sus costos de operación y mantenimiento. En la Tabla 2.17 se mencionan los costos de compra y mantenimiento de un generador de 185 kVA, el cual es de \$86425.37 considerando que el generador se mantenga por lo menos 10 años. A partir de este valor se procedió a realizar una relación para encontrar el valor a invertir por kW, el cual sería:

$$\text{Costo por kW del generador} = \frac{\$86425.37}{185\text{kW}}$$

$$\text{Costo por kW del generador} = 467.1641 \text{ \$/kW}$$

Adicionalmente, considerando un escenario donde el generador entregue el 100% de su capacidad, este consumirá un valor de 44 litros/hora de diésel. Mediante los valores mostrados en la Tabla 2.15, es posible calcular el costo de diésel que el generador utilizará por hora:

$$\text{Costo diésel} = \left(44 \frac{\text{litros}}{\text{hora}}\right) \left(0.502 \frac{\text{dólares}}{\text{litros}}\right)$$

$$\text{Costo diésel} = 22.088 \text{ \$/hora}$$

Suponiendo un uso de 24 horas al día por parte del generador, el valor diario de diésel a utilizar será de 530.112\$. La idea sería usar el generador durante aproximadamente 10 horas, por lo que el valor estimado sería de \$220.8. La suma de los costos por kW del generador junto con el consumo de diésel diario será de 997.2761 \$/kW

Costo de invertir en capacidad máxima y potencia de transferencia de baterías

El costo de invertir en la capacidad de almacenamiento y potencia de transferencia dependerá de las características de la batería que se elija. Para el modelo de optimización se empleó una batería de 6V/240A, cuyo precio en el mercado es de aproximadamente \$285, por lo que para calcular el costo por kW referente al uso de la batería se procedió a encontrar la potencia necesaria para las baterías, para después mediante una relación con su costo definir el valor de \$/kW.

$$\text{Costo por kW del almacenador} = \frac{\$285}{6V * 240A} = \frac{\$285}{1.440kW}$$

$$\text{Costo por kW del almacenador} = 197.9166 \$/kW$$

Tarifa de compra de energía al grupo electrógeno

Dentro de la comunidad Cerritos de los Morreños, el valor que se pagaba de manera diaria por las seis horas de uso que proporcionaba el generador era de \$1 y este se cobraba a cada vivienda en la isla. Para encontrar el valor por una hora de uso del generador se procede a dividir el dólar por las 6 horas que se tenía electricidad.

$$\text{Tarifa de compra de energía al grupo electrógeno} = \frac{\$1}{6kWh}$$

$$\text{Tarifa de compra de energía al grupo electrógeno} = 0.1666 \$/kWh$$

Los distintos valores por utilizar para el modelo de optimización se muestran de manera resumida en la

Tabla 2.19.

Tabla 2.19. Tabla de costos fijos de operación para el modelo de optimización

Límite de instalación de fuente solar	60 kW
Costo por instalar las fuentes solares	464.6 \$/kW
Costo por corte de carga	0.646 \$/kWh
Costo por invertir en generación térmica	997.2761 \$/kW
Tarifa de compra de energía al grupo electrógeno	0.1666 \$/kWh
Límite de capacidad del generador diésel	185 kW
Costo de invertir potencia de transferencia de baterías	197.916 \$/kW
Costo de invertir capacidad máxima de almacenamiento de baterías	197.916 \$/kW
Energía inicial de las baterías	0 kWh
Eficiencia de la batería	0.95
Tasa de autodescarga de la batería	0.02

2.6 Formulación del problema de optimización

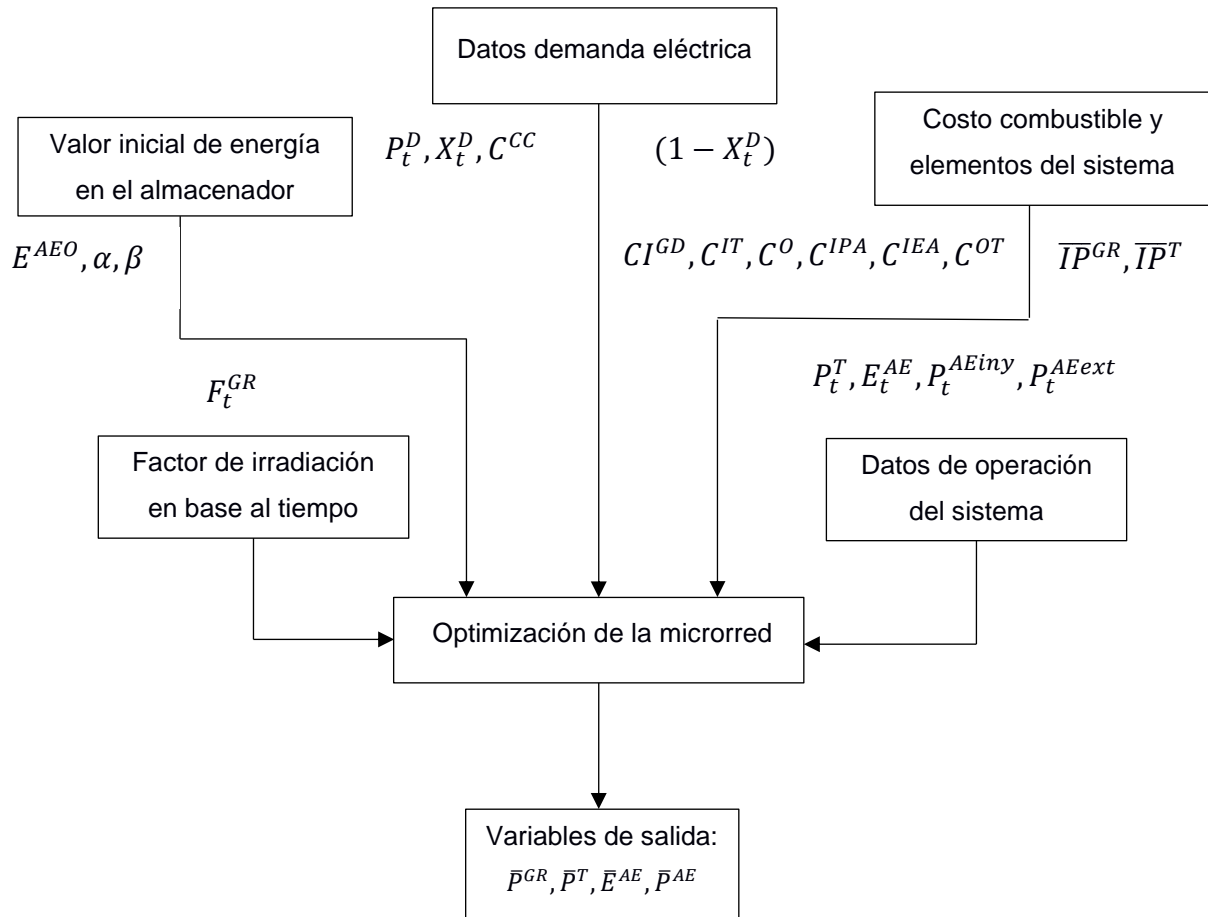


Figura 2.10 Diagrama de flujo para la formulación del problema de optimización

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.10 provee las variables de entrada y salida que se usaran para el modelo de optimización, entre las que se encuentran la potencia entregada por la fuente de energía renovable, la demanda del sistema, costos de inversión, entre otros. En la etapa final del diagrama es posible observar el proceso de optimización, el cual decidirá la potencia necesaria a instalar por parte de la fuente renovable, la potencia máxima del grupo electrógeno y la capacidad de los sistemas de almacenamiento necesarios para una óptima operación del sistema, minimizando los costos respecto al dimensionamiento de la microrred.

Para realizar el cálculo de la optimización es necesario identificar la función de costo con la que se procederá a trabajar y las restricciones propias del caso, se debe tener los costos de inversión en generación renovable (C^{IGR}), costo de inversión en grupo electrógeno (C^I), costo de operación y mantenimiento del grupo electrógeno (C^O).

2.6.1 Variables del sistema

Generación Renovable

Costo de invertir en generación renovable (C^{IGD}): Se define como los costos por la capacidad de la generación renovable, tales como, paneles, aerogenerador, inversor, metros de cable a utilizar, entre otros.

Inversión en la potencia de la generación renovable (\overline{IP}^{GR}): Limite de potencia a generar por parte de la fuente renovable, tomando en consideración dos casos, el primero con paneles en cada vivienda de la comunidad, y el segundo caso con paneles concentrados. El estudio de ambos casos dependerá de los siguientes factores:

- Terreno, en el caso que se desee un centro de paneles es necesario conocer el terreno disponible para la creación de este.
- Número de viviendas, definirá la demanda necesaria a generar para la comunidad.
- Irradiación solar.

Factor dependiente del tiempo de la generación renovable (F_t^{GR}): Se obtiene a partir de procesos estocásticos del histórico de la irradiación solar tomando en consideración las 24 horas del día en base a días representativos en el *machine learning*.

Grupo electrógeno

Costo en inversión del grupo electrógeno (C^{IT}): Es el costo necesario de inversión de un nuevo generador cuyo máximo de generación sea igual o menor al instalado previamente en la comunidad.

Costo de venta de energía diésel (C^{OT}): Este costo considera el precio de venta de la energía generada por el grupo electrógeno en cada hora t .

Costo de operación y mantenimiento del grupo electrógeno (C^O): Costos relacionados a la operación del generador como, combustible, mantenimiento, sueldo del operador, encargado del generador, entre otros.

Límite máximo del generador convencional (\overline{IP}^T): Valor máximo de generación por parte del grupo electrógeno tomando como referencia el generador que se encuentra en la comunidad.

Sistema de almacenamiento

Costo relacionado a la capacidad de potencia activa máxima del almacenador (C^{IPA}): Es el costo necesario para extraer o inyectar potencia a la red en el caso de tener energía almacenada. El costo de intercambio de potencia incrementa o disminuye los costos del sistema de almacenamiento.

Costo de inversión de capacidad de energía del almacenador (C^{IEA}): Costo definido a la capacidad de almacenamiento del sistema de almacenamiento.

Energía en el almacenador inicial (E^{AE0}): Posee dos factores que describen las características de funcionamiento del almacenador:

- Eficiencia del almacenador (α)
- Tasa de autodescarga (β)

Demanda

Curva de demanda (P_t^D): Corresponde a la representación gráfica respecto al tiempo del consumo de energía eléctrica.

Costo por corte de carga (C^{CC}): Costo correspondiente a la parte de la demanda de energía que no es cubierta por la red en un período de tiempo determinado.

2.6.2 Parámetros de dimensionamiento

Generación Renovable

Potencia máxima del generador renovable (\bar{P}^{GR}): Cantidad máxima de potencia producida por el generador renovable.

Grupo electrógeno

Potencia máxima de producción del grupo electrógeno (\bar{P}^T): Máxima cantidad posible de energía a generar por el grupo electrógeno.

Sistema de almacenamiento

Dimensión energética del almacenador (\bar{E}^{AE}): Capacidad máxima de energía posible para almacenar.

Dimensión potencia del almacenador (\bar{P}^{AE}): Máxima cantidad de potencia posible a intercambiar por el sistema de almacenamiento.

2.6.3 Variables de operación

Grupo electrógeno

Potencia inyectada del grupo electrógeno en cada hora y escenario de operación (P_t^T): Cantidad de potencia producida por el grupo electrógeno e inyectada dentro de la microrred en las distintas horas y en cada escenario de operación.

Sistema de almacenamiento

Nivel del almacenador de energía en cada hora y escenario (E_t^{AE}): Cantidad de energía dentro del almacenador en las distintas horas y escenarios de operación.

Potencia inyectada por el almacenador de energía en cada hora y escenario (P_t^{AEiny}): Cantidad de potencia inyectada a la microrred desde el sistema de almacenamiento en cada hora y escenario de operación.

Potencia extraída por el almacenador de energía en cada hora y escenario (P_t^{AEext}): Cantidad de potencia extraída de la microrred desde el sistema de almacenamiento en cada hora y escenario de operación.

Porcentaje de corte de carga (X_t): Variable dependiente de la hora y escenario tomando en consideración el valor de energía no suministrada para el modelo de optimización.

2.6.4 Función Objetivo

El criterio de optimización es minimizar los costos de dimensionamiento de la microrred, con este enfoque se plantea la siguiente función objetivo:

Minimizar costos

$$\begin{aligned}
 &= \text{Costo de invertir en generación solar} \\
 &+ \text{Costo de invertir en operación térmica} \\
 &+ \text{Costos de inversión en el sistema de almacenamiento} \\
 &+ \text{costos de operación del generador diésel} \\
 &+ \text{costos por racionamiento de carga}
 \end{aligned}$$

Minimizar costos

$$\begin{aligned}
 &= C^{IGD} \bar{P}^{GR} + C^{IT} \bar{P}^T + C^{IPA} \bar{P}^{AE} + C^{IEA} \bar{E}^{AE} + 365 \left(\sum_{t \in T} \delta C^{OT} P_t^T \right) \\
 &+ 365 \left(\sum_{t \in T} \delta C^{CC} P_t^D X_t \right)
 \end{aligned}$$

La primera parte de la función objetivo corresponde al costo referido para el uso de la generación solar, donde las variables utilizadas son:

C^{IGD} : Costo de invertir en generación renovable.

\bar{P}^{GR} : Tamaño de la generación renovable (Dimensión Solar).

El segundo término de la función representa el costo referido para el uso de la generación térmica, en este caso por parte del generador a diésel:

C^{IT} : Costo de invertir en operación térmico.

\bar{P}^T : Dimensión térmica.

El siguiente término se encuentra formado por el costo de compra para la batería a utilizar como almacenador, junto con la potencia o capacidad máxima de transferencia:

C^{IPA} : Costo de inversión (comprar) batería con cierta capacidad de intercambio de potencia.

\bar{P}^{AE} : Potencia activa máxima de transferencia (inyectar o extraer potencia).
 El cuarto término es el costo de inversión correspondiente a la capacidad de almacenamiento de la batería conformado por:

C^{IEA} : Costo por inversión tamaño del almacenamiento de energía.

\bar{E}^{AE} : Dimensión o capacidad de almacenamiento de energía.

El quinto término describe el costo por operación de grupo electrógeno durante las distintas horas del día y en todos los días del año.

δ : Variable de conversión (1 hora).

C^{OT} : Tarifa de venta de energía diésel.

P_t^T : Potencia entregada a la red por el generador en cada hora.

Por último, el sexto término denota la penalidad en base a la probabilidad de falla de la microrred durante las distintas horas del día y en todos los días del año.

C^{CC} : Costo por corte de energía (energía no suministrada).

P_t^D : Demanda de la curva.

X_t : Porcentaje de corte de carga.

2.6.5 Restricciones

Balance de potencia activa

Corresponde al balance de potencia activa en donde interviene el factor dependiente del tiempo para determinar la cantidad de generación junto con la potencia entregada por el grupo electrógeno, debe ser igual a la demanda considerando el porcentaje de corte de carga, adicionando la potencia entregada por las baterías menos la potencia extraída por esta.

$$f_t^{GR} \bar{P}^{GR} + P_t^T = P_t^D (1 - X_t^D) + P_t^{AEiny} - P_t^{AEext}$$

Capacidad de grupo electrógeno

La potencia entregada del grupo electrógeno, durante las distintas horas del día, debe ser menor o igual a la capacidad máxima del generador y mayor a cero.

$$0 \leq P_t^T \leq \bar{P}^T$$

Capacidad de potencia activa máxima de inyección de la batería

La potencia inyectada por el almacenador en las distintas horas del día, cuyo máximo será la capacidad de potencia activa máxima de inyección de la batería.

$$0 \leq P_t^{AEiny} \leq \bar{P}^{AE}$$

Capacidad de potencia activa máxima de extracción de la batería

La restricción limita la potencia extraída por el almacenador en las distintas horas del día, cuyo máximo será la capacidad de potencia activa máxima de extracción de la batería.

$$0 \leq P_t^{AEext} \leq \bar{P}^{AE}$$

Balance energético en cada hora y escenario de operación para $t > 1$

Describe el balance energético, permitiendo conocer la cantidad de energía que se encuentra dentro del almacenador en cada hora para $t > 1$, la cual será igual a la energía que se encontraba en la batería en la hora anterior, tomando en consideración la potencia inyectada, extraída y junto la cantidad de energía dentro del almacenador.

$$t > 1; E_t^{AE} = E_{t-1}^{AE} + \alpha \delta P_t^{AEext} - \frac{\delta P_t^{AEiny}}{\alpha} - \beta E_t^{AE}$$

Balance energético inicial en cada hora y escenario de operación $t=1$

Describe el balance energético, permitiendo conocer la cantidad de energía que se encuentra dentro del almacenador en cada hora, la cual será igual a la energía que se encontraba en la batería, tomando en consideración la potencia inyectada, extraída y junto la cantidad de energía dentro del almacenador.

$$t = 1; E_t^{AE} = E^{AEo} + \alpha \delta P_t^{AEext} - \frac{\delta P_t^{AEiny}}{\alpha} - \beta E_t^{AE}$$

Capacidad máxima de almacenamiento

Limita la cantidad de energía dentro del almacenador en cada hora, la cual deberá ser menor o igual a la capacidad máxima de almacenamiento.

$$0 \leq E_t^{AE} \leq \bar{E}^{AE}$$

Restricción de porcentaje de corte de carga

Define el valor del porcentaje de corte de carga que se procederá a emplear dentro del modelo de optimización.

$$0 \leq X_t^D \leq 1$$

Restricción para dimensionamiento de la fuente renovable

Define los límites para el dimensionamiento de la fuente renovable debe ser mayor a cero y menor o igual al límite máximo de generación renovable permitida.

$$0 \leq \bar{P}^{GR} \leq \overline{IP}^{GR}$$

Restricción para dimensionamiento del grupo electrógeno

Empleada para restringir el dimensionamiento del grupo electrógeno, el cual debe ser menor o igual al valor máximo de generación por parte del grupo electrógeno tomando como referencia el generador que se encuentra en la comunidad.

$$0 \leq \bar{P}^T \leq \overline{IP}^T$$

Restricción para la capacidad de transferencia de potencia

Representa la transferencia máxima correspondiente al almacenador, y debe ser mayor o igual a cero.

$$\bar{P}^{AE} \geq 0$$

Restricción para el dimensionamiento del almacenador

Define que el tamaño o dimensión de la batería, que debe ser mayor o igual a cero.

$$\bar{E}^{AE} \geq 0$$

2.7 Diseño del sistema Fotovoltaico para la comunidad en PVSyst

Para esta sección se procedió a realizar el diseño del sistema fotovoltaico mediante la herramienta de PVSyst para la comunidad Cerrito de los Morreños, tomando como base a los datos obtenidos en el levantamiento de carga.

Este software que permite el dimensionamiento, simulación y análisis de datos para instalaciones fotovoltaicas, ya sean conectadas a la red o aisladas, y permite el acceso a los valores meteorológicos pertenecientes a una zona en específico. Para la simulación realizada se emplearon datos de irradiación proporcionados por la NASA.

2.7.1 Orientación e inclinación de los paneles solares

Con el fin de aprovechar la máxima cantidad de irradiación posible, los paneles solares fueron orientados en el hemisferio opuesto del que se encontraba, por lo que, si estaban en el hemisferio sur, el correcto sentido de orientación para los paneles sería el norte.

En la Figura 2.11 es posible apreciar la ventana de configuración de orientación para los paneles, en la cual se pudo colocar el ángulo óptimo de inclinación del plano y del azimut, cuyos valores corresponden a 10 grados y cero grados respectivamente.

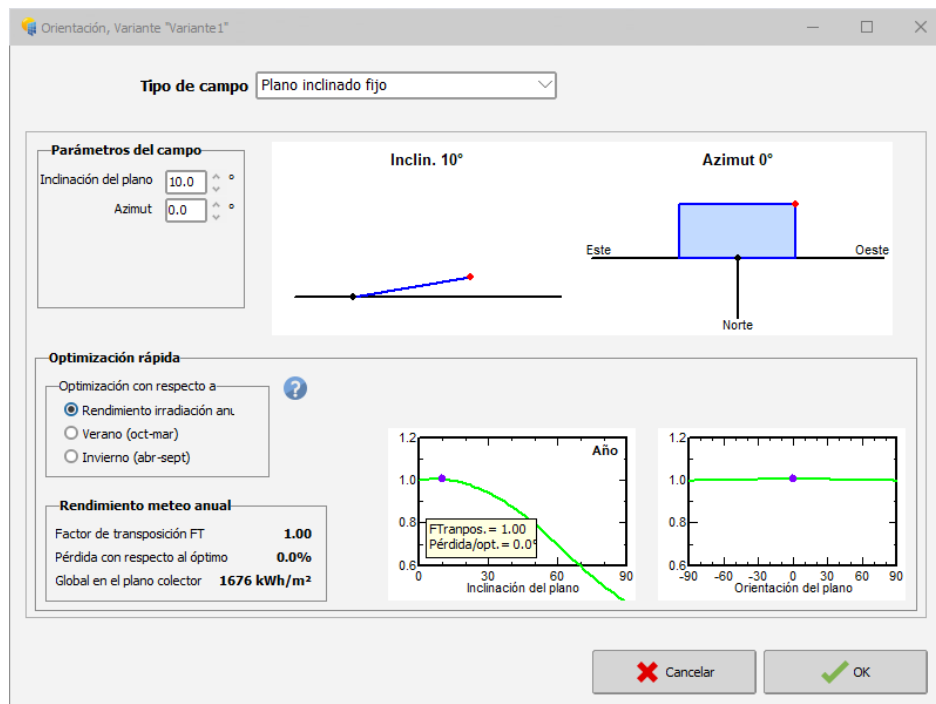


Figura 2.11 Configuración de la orientación de los paneles solares

2.7.2 Demanda energética de la comunidad Cerrito de los Morreños

Para el diseño fotovoltaico diseñado se estableció que este abastece toda la demanda de la comunidad durante las distintas horas del día, la cual pudo conocerse mediante los resultados de las encuestas realizadas a los habitantes de la isla.

En la Tabla 2.20 se encuentra un resumen de la cantidad de aparatos y la potencia que consumen. Debido a la gran variedad de marcas existente en la isla se procedió a tomar un promedio de la potencia; se empleó la Tabla 3.1 para conocer las horas de uso de los electrodomésticos en todo el día. Todos los valores conocidos se ingresaron dentro del programa, en donde se pudo colocar de manera ordenada cada característica de los elementos, dentro del apartado de consumo en la Figura 2.12 y en distribución de horas en la Figura 2.13.

Tabla 2.20. Tabla de consumo energético de la comunidad Cerrito de los Morreños

Cantidad	Aparato	Potencia	Horas de uso diario
388	Lámparas Led	9 W	6 horas
77	Tv	150 W	6 horas
37	Congelador	140 W	24 horas
24	Refrigeradora	0.75 kWh/día	24 horas
42	Lavadora	480 W	2 horas
33	Licuadaora	440 W	1 hora
26	Plancha	1000 W	1 hora

Uso diario de energía, variante "Variante1"

Definición de consumos domésticos diarios para el año.

Consumo | Distribución por hora

Consumos diarios

Número	Aparato	Potencia	Uso diario	Distrib. por hora	Daily energy
388	Lámparas (LED o fluo)	9 W/lámpara	6.0 h/día	OK	20952 Wh
77	TV	150 W/apar.	6.0 h/día	OK	69300 Wh
37	Congelador	140 W/apar.	24.0 h/día	OK	124320 Wh
24	Nevera / congelación profunda	0.75 kWh/día	24.0	OK	18000 Wh
42	Lavaplatos y lavadora	480.0 W prom	2.0 h/día	OK	40320 Wh
33	Licuadaora	440 W/apar.	1.0 h/día	OK	14520 Wh
26	Plancha	1000 W/apar.	1.0 h/día	OK	26000 Wh
Consumidores en espera		1 W tot	24 h/día		24 Wh
Energía diaria total					313436 Wh/día
Energía mensual					9403.1 kWh/mes

Info aparatos

Definición de consumo por

Años Estaciones Meses

Fin de semana o uso semanal

Usar solo durante

días en una semana

Modelo

Carga Guardar Otro perfil Cancelar OK

Figura 2.12 Configuración de valores de consumo de la comunidad

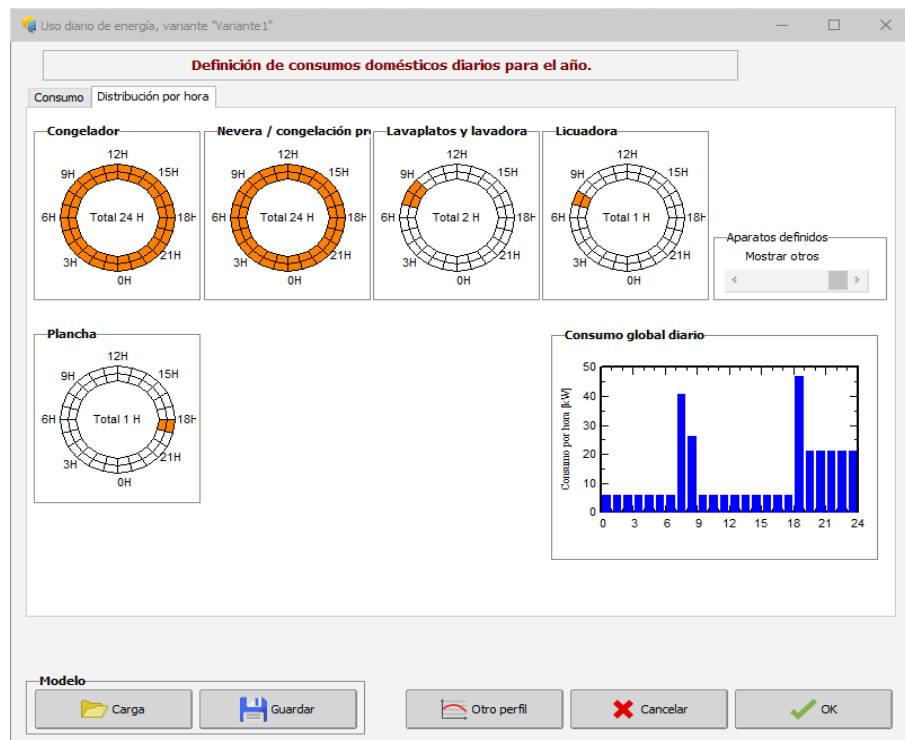


Figura 2.13 Configuración de distribución de horas

2.7.3 Selección de los elementos del sistema fotovoltaico

Para el diseño del sistema fotovoltaico se eligieron paneles de tecnología más actualizada, puesto que los que se encontraban dentro de la comunidad eran de 100W cada uno. Los paneles seleccionados fueron de 520W de la marca Longi Solar y cuyos datos generales se pueden apreciar en la Figura 2.14.

En el caso de las baterías, se utilizaron baterías de 6V 250Ah de la marca Electrona cuyas características se aprecian en la Figura 2.15. El mismo programa nos indica la cantidad de baterías y la forma de conexión necesaria de estas para abastecer la demanda de la comunidad, y se necesitarían 40 baterías conectadas en serie y 25 en paralelo, para un sistema independiente sin el uso del generador.

Como respaldo del sistema se ingresaron los datos del generador que se encuentra dentro de la comunidad, un generador a diésel de 185kVA que no se encontraba en el software, con ayuda del *datasheet* correspondiente del

equipo fue posible utilizarlo en la simulación como se aprecia en la Figura 2.16

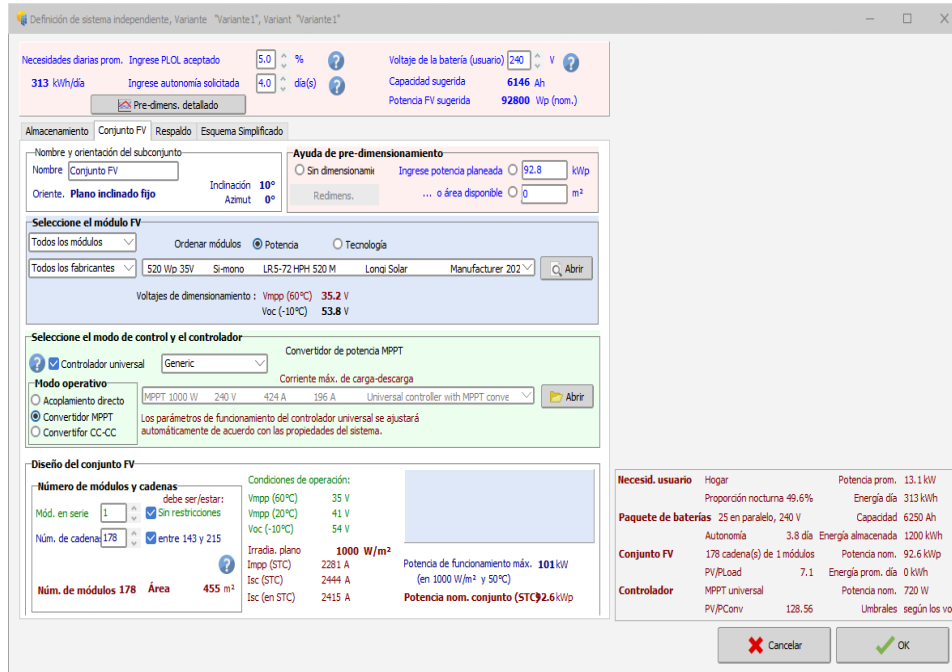


Figura 2.14 Características técnicas del panel de 520 W

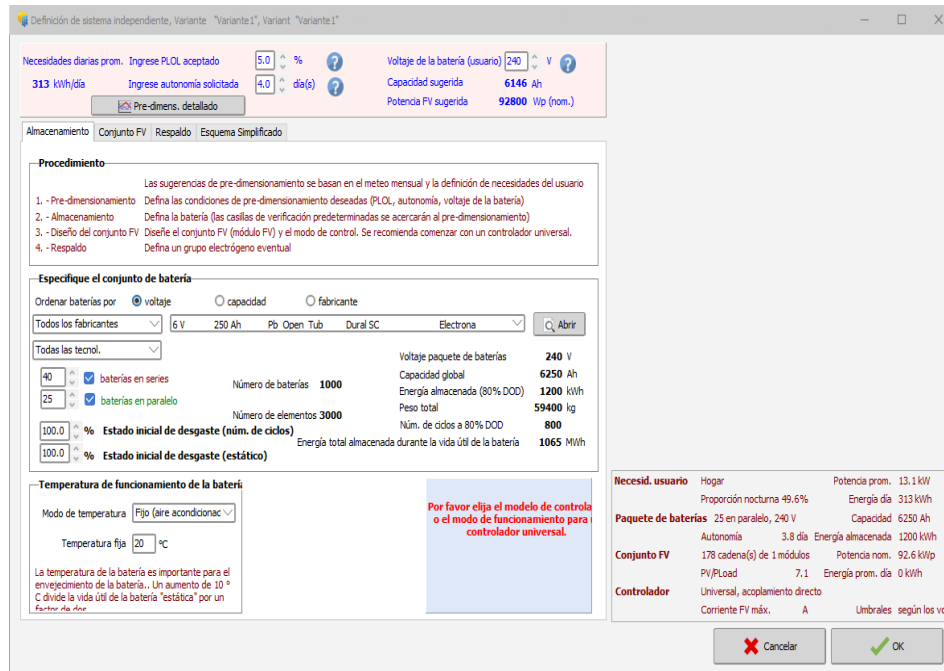


Figura 2.15 Características técnicas de las baterías de 6V 250Ah

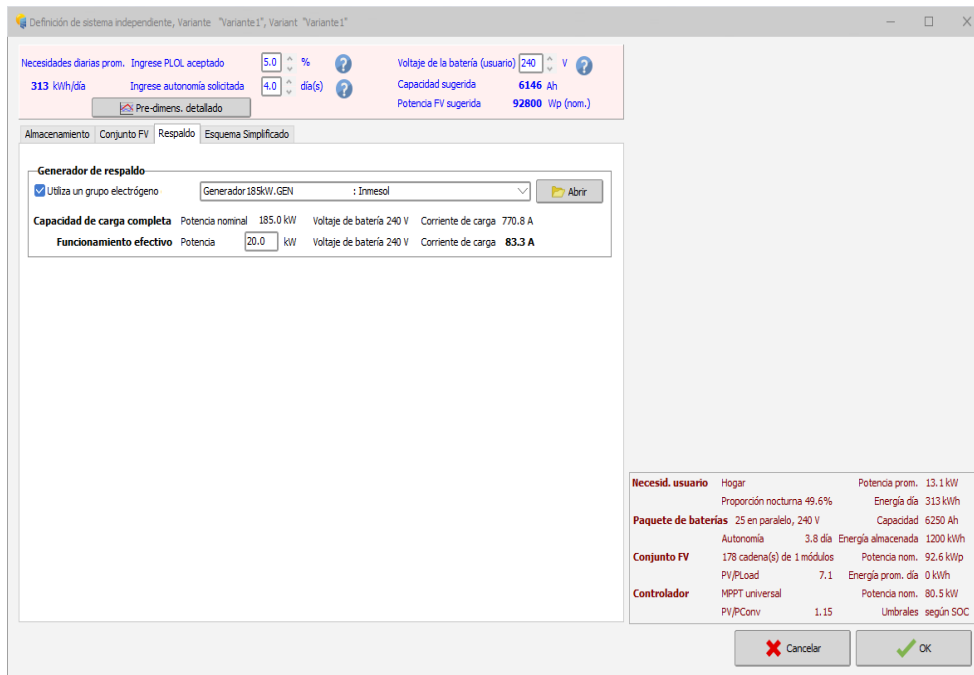


Figura 2.16 Características del generador ingresadas a PVSyst

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos de la metodología planteada, desde el levantamiento de información mediante la visita a la zona y la estimación de los perfiles de consumo, así como la obtención de valores representativos a través de las técnicas de *machine learning*, y el dimensionamiento óptimo de la microrred híbrida mediante la solución del problema de optimización.

3.1 Resultados del levantamiento de información

De levantamiento se encontró que en la comunidad actualmente se tienen 96 usuarios, de los cuales 4 viviendas se encontraban deshabitadas, existen alrededor de 6 pequeñas tiendas que se incluyen dentro del levantamiento del domicilio, este tipo de viviendas tienen más de un equipo de refrigeración, una casa comunal, dos iglesias, una escuela, un centro de salud comunitario.

En cuanto al uso del grupo electrógeno actualmente consume un promedio de 20 galones de diésel al día, con un costo aproximado de 2\$ por galón, y se cobra 1\$/día a cada vivienda por el uso del generador. Para la elección del factor de coincidencia, del levantamiento de información se tiene que todos los habitantes de la isla se dedican exclusivamente a la recolección de cangrejos y pesca, por lo cual tienen un horario definido para la realización de sus actividades. La mayor parte del día las viviendas son únicamente ocupadas por los niños y mujeres que se dedican a las actividades del hogar, debido a esto los picos de consumo se encuentran generalmente en las horas de la mañana, medio día y noche.

3.1.1 Perfiles de consumo de la comunidad

Los datos recopilados con el levantamiento de información permitieron estimar los patrones de consumo de los usuarios de la isla, basándonos en las actividades cotidianas que comúnmente realizan los habitantes de la isla y su duración media observables en la Tabla 3.1, información obtenida en base a entrevistas y observaciones directas durante la visita a la comunidad.

Tabla 3.1 Actividades principales relacionadas con patrones de ocupación

Actividades	Horario	Duración (horas)
Lavado/baño	10:00-11:00 15:00-16:00	0.5-2
Trabajo	6:00-12:00 14:00-17:00	6-8
Estudio	7:00-13:00	5
Cocina	4:00-6:00 10:00-12:00 18:00-20:00	1-2
Descanso/entretenimiento	18:00-21:00	1.5-4
Comida	6:00 -6:35 12:00-13:30	0.5-1

Los datos recolectados en la Tabla 2.2 y Tabla 3.1 fueron usados para estimar las curvas de demanda diaria por tipo de usuario en la comunidad. Si bien es una comunidad aislada, sus habitantes presentan patrones de ocupación de gran actividad, además se tiene una baja diversidad de trabajos entre sus habitantes.

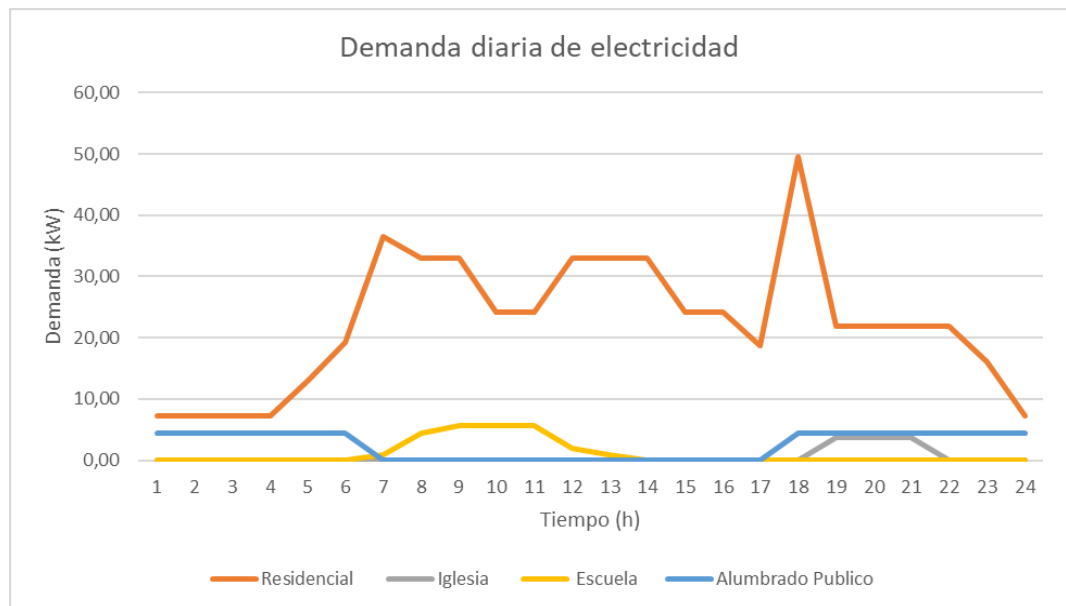


Figura 3.1 Curvas de demanda diaria por tipo de usuario

3.2 Resultados del *machine learning* aplicado a los datos históricos temperatura, viento e irradiancia

Luego del procesamiento de los datos en periodos de un mes para cada variable de interés, también se obtienen las curvas con GMD utilizando los datos históricos de tres años en el algoritmo, para un análisis de estos resultados se presenta la Figura 3.2. Nótese por ejemplo, en la Figura 3.2a la mayor parte de los datos de irradiancia se encuentran agrupados alrededor del segundo grupo, este es el que tiene mayor peso y es un 78% más probable encontrar que la irradiancia esta alrededor $384.02 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$ que de $51.40 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$ representado solo por un 22%, en la Figura 3.2b ocurre algo similar con la temperatura ambiente, ya que el 63% de los datos se centran alrededor de 23.45 °C y el 37% restante alrededor de 30.59 °C , así mismo representa este comportamiento las gaussianas de velocidad, estas señalan que a lo largo del año es 63% más probable tener velocidades alrededor de 3.31 m/s que de 5.67 m/s con un 37% medidos a 10 metros de altura, por ultimo para la velocidad media a 50 metros, el 36% alrededor de 6.43 m/s y el 64% alrededor de 3.90 m/s .

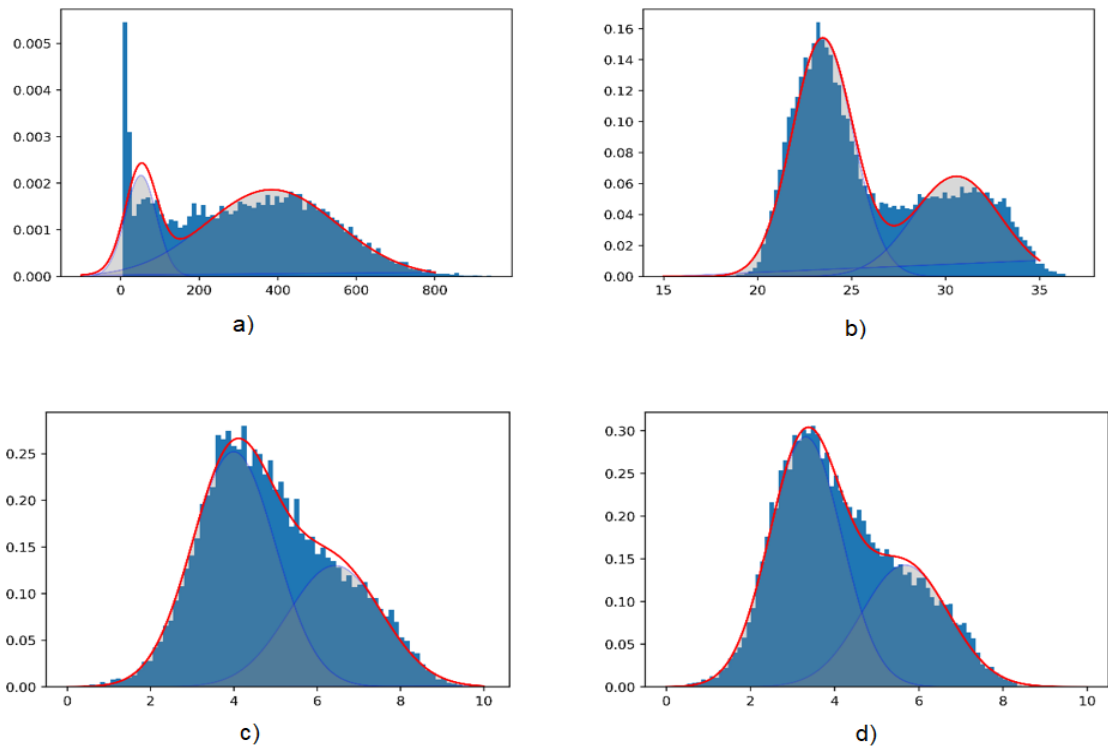


Figura 3.2 Curvas Gaussianas: a) Irradiancia Horizontal Global, b) Temperatura ambiente, c) velocidad del viento a 10 metros de altura d) velocidad del viento a 50 metros de altura

3.2.1 Energía eólica

Los representantes para la velocidad del viento obtenidos con las técnicas de *machine learning* muestran resultados desfavorables para la viabilidad de generación eólica en la región bajo estudio, con velocidades que la mayor parte del tiempo se encuentran por debajo de los 4 m/s. Desde un punto de vista técnico y económico no es viable la implementación de un sistema eólico para generación de electricidad, sin embargo el trabajo [24] presenta que para velocidades entre 3 y 4 m/s son una opción para equipos de bombeo de agua, recurso que es bastante apreciado y necesitado por los habitantes de la isla.

3.2.2 Energía Solar fotovoltaica

Por otro lado, en la Tabla 2.3 con las medias anuales de los datos de irradiancia y temperatura ambiental, obtenidas en base a las técnicas de *machine learning*, presenta resultados que hacen que el planteamiento de sistemas fotovoltaicos sea una opción técnicamente viable para la microrred.

Con una producción anual de energía alrededor de 1362.01 kWh/m² y una temperatura promedio mínima de 23.47 °C, en la Figura 3.2 se muestra que la mayor cantidad de datos se concentran alrededor de este grupo.

3.2.3 Energía de Biomasa

La producción de energía a partir de la biomasa depende de los residuos que puedan ser utilizados como biocombustibles. La comunidad no cuenta con sembríos ni desechos animales que puedan utilizarse como fuente de biocombustibles, como se mencionó anteriormente la principal actividad económica es la pesca y recolección de Cangrejos, por lo que para este estudio se descarta el uso de energía de Biomasa como fuente de generación en la microrred.

3.3 Resultados del dimensionamiento óptimo de la microrred mediante la solución del modelo de optimización en AMPL.

Con el modelo formulado en el capítulo 2, e implementado en Notepad mediante el lenguaje AMPL, se realizó el dimensionamiento mediante el estudio de varios escenarios de operación.

Escenario 1, en este se considera que la microrred no necesariamente debe ser capaz de suministrar energía las 24 horas del día a la comunidad, para tener en cuenta esto se introduce la variable de porcentaje de corte carga en el modelo, el cual ingresa a la optimización para obtener a qué hora el día y en qué porcentaje sería óptimo realizar un racionamiento de carga, además se da la libertad que el grupo electrógeno pueda funcionar a cualquier hora del día.

Escenario 2, en este segundo escenario no se considera el porcentaje de corte de carga, es decir se obliga en el modelo a que la microrred deba abastecer con energía las 24 horas del día, y se mantiene la libertad de operación para la fuente de energía que funciona con combustible diésel.

Escenario 3, ahora, se agrega una limitante al modelo respecto al uso del grupo electrógeno, para que se priorice y se aproveche al máximo el recurso renovable, se establece que el generador diésel debe estar apagado durante el horario de máxima irradiación, que se da en el horario de 9h00 a 16h00, además de considerar un porcentaje de corte de carga.

Escenario 4, además de tener la limitante en el uso del generador diésel, en este escenario se considera que la microrred no puede quitar el suministro a los clientes, es decir no se establece ningún porcentaje de corte de carga en el modelo.

los resultados de la optimización bajo estos escenarios de operación se presentan en la siguiente tabla.

Escenario 5, aquí se considera una modificación a las condiciones planteadas en el cuarto escenario. En todos los escenarios anteriores se plantea la solución con la peor condición posible para la disponibilidad del recurso solar, tomando el factor de generación renovable del mes de junio que es cuando se presenta la menor generación por parte de la fuente renovable, de esta manera nos aseguramos de que los resultados no tengan un sesgo favorable por considerar una condición que beneficie la generación fotovoltaica. En este último en lugar de tomar la peor condición, se procesan todos los representantes mensuales para obtener cual es el representante óptimo de todo ese conjunto, y es este factor el que ingresa al modelo.

Escenario 6, en este escenario se plantea que únicamente se puede utilizar fuentes de generación renovable.

Tabla 3.2 Resultados del problema de optimización para los diferentes escenarios.

Escenario	Potencia máxima del generador renovable kW \bar{P}^{GR}	Potencia máxima del generador diésel kW \bar{P}^T	Potencia máxima de transferencia de las baterías kW \bar{P}^{AE}	Capacidad máxima de energía de las baterías kWh \bar{E}^{AE}	Costos de operación del generador diésel \$/año	Costos por racionamiento o de carga \$/año	Costos totales dimensionamiento de la microrred \$/año
1	0.00	32.40	2.56	4.73	36,461.20	7,215.04	77,426.70
2	0.00	31.70	22.25	23.42	38,686.90	0.00	79,338.40
3	65.16	29.79	12.34	60.47	20,505.30	3,897.96	98,794.20
4	65.16	29.93	17.59	74.06	21,731.20	0.00	99,992.20
5	65.16	27.00	19.47	59.75	19,560.20	0.00	92,440.40
6	279.20	0.00	92.50	591.896	0.00	0.00	265,169.00

En base a la Tabla 3.2, el primer escenario con las condiciones planteadas se obtuvo el menor costo total para el dimensionamiento y operación durante un año de la microrred, recuerde que aquí se considera corte de carga a los usuarios en determinadas horas del día, en la Tabla 3.3 se muestran a qué hora ocurren los cortes, note que a las 18h00 se da el mayor porcentaje de corte con el 35%, tomando en cuenta que a esta hora se da el pico de demanda máxima, es de esperarse, y el costo por realizar estos cortes es de 7,215.04 \$/año. Tener estos cortes de carga a lo largo del día pueden representar una molestia para los usuarios, además que tener una intermitencia de este tipo puede causar que los electrodomésticos reduzcan su vida útil, entonces se debe analizar si en realidad el ahorro que se tiene en el dimensionamiento compensa todas las implicaciones de tener que quitar la energía a los usuarios, para esto precisamente se analiza el escenario 2.

Tabla 3.3 Porcentaje de corte de carga para el escenario 1

h	XD	5	0	10	0	15	0	20	0
1	0	6	0	11	0	16	0	21	0
2	0	7	0.06	12	0	17	0	22	0
3	0	8	0.09	13	0	18	0.35	23	0
4	0	9	0.16	14	0	19	0	24	0

En el escenario 2, los costos totales son de 79,338.40 \$, lo cual en comparación con el escenario 1 supone una diferencia de 1,911.7 \$, que no representa una diferencia realmente significativa, sin embargo, vemos que hay un aumento muy considerable en cuanto a la capacidad de potencia y energía del almacenador de energía, lo cual supone un incremento en los costos de compra de estos equipos. Para el escenario 3, se obtiene el máximo aprovechamiento de las fuentes renovables, llegando al límite máximo establecido para la generación solar que corresponde al pico máximo de la demanda proyectada a 15 años, así mismo aquí se considera que es posible realizar cortes de carga, en la Tabla 3.4 se muestran los resultados, el porcentaje de corte es menor si lo comparamos con el escenario 1, con un costo de 3,897.96 \$/año, pero las desventajas de esto siguen siendo las mismas planteadas anteriormente, por lo que ahora se plantea el escenario 4 para estudiar si realmente representa un gran ahorro realizar estos cortes de carga.

Tabla 3.4 Porcentaje de corte de carga para el escenario 3

h	XD	5	0	10	0	15	0.03	20	0
1	0	6	0	11	0	16	0.03	21	0
2	0	7	0	12	0.01	17	0	22	0
3	0	8	0	13	0.10	18	0.10	23	0
4	0	9	0.07	14	0.10	19	0	24	0

En el escenario 4, los costos totales se sitúan en 99,992.20 \$, frente a los 98,794.20 \$ que se obtiene en escenario 3, representa una diferencia de 1198.00 \$, que una vez mas no es una cantidad significativa, así mismo, se tiene un notable incremento en la capacidad máxima requerida para el sistema de almacenamiento de energía. Con las condiciones plateadas en el escenario 5 se mejoran los resultados en la parte técnica y económica, con una reducción en las capacidades máximas del almacenador de energía, además se obtiene los costos más bajos para la operación del generador diésel anualmente, los costos totales se sitúan en 92,440,40\$ que si se comparan con el escenario 4 representa una diferencia de 7,551.80 \$, siendo en términos de dimensionamiento y operación una cantidad considerable.

Desde una perspectiva general, los escenarios 1 y 2 son los que tienen los menores costos económicos, pero ambientalmente no son la mejor opción puesto que prácticamente se está teniendo un consumo neto de fuentes fósiles, y no se aprovecha el recurso solar, mientras que los escenarios 3,4 y 5 incrementan sus costos, pero se tiene un mejor panorama en términos ambientales, ya que se prioriza el aprovechamiento de la fuente solar lo máximo posible, a la vez que se optimiza el consumo de combustibles fósiles. Dentro de sus escenarios de operación cada uno es óptimo en sus condiciones, la elección de la propuesta más adecuada se encuentra ligada a una decisión ejecutiva según los requerimientos de los clientes, disponibilidad del recurso económico y requerimientos ambientales.

3.4 Resultados de simulaciones con PVSyst

Los resultados obtenidos mediante la simulación en PVSyst permitieron conocer el número de elementos necesarios para abastecer la demanda de la comunidad y la conexión para los componentes, en el caso de que la demanda deba ser abastecida únicamente por el sistema fotovoltaico, haciendo uso del generador a diésel como un respaldo. La cantidad de elementos y características se observa en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Cantidad de elementos para el diseño en PVSyst

Elemento	Característica	Cantidad
Panel Solar	520W	352
Batería	6V 250Ah	1000
Generador	185kVA	1

Al realizar las simulaciones dentro del programa, se consideró las pérdidas que se dan por diversos factores de manera automática, las cuales son:

- Pérdida por suciedad
- Pérdida por eficiencia del almacenador
- Pérdidas óhmicas en el conjunto
- Pérdida por nivel de irradiancia

En la Figura 3.3 se observa el resumen de los resultados de la simulación del sistema, en la cual se aprecia la producción del sistema por año, el rendimiento y las pérdidas. El perfil diario de demanda de la comunidad en el programa PVSyst se observa en la Figura 3.4, la cual coincide con la curva creada a partir de los datos recolectados en la Figura 3.1.

Tipo de sistema	Sistema independiente con baterías
Producción del sistema	255 MWh/año
Producción específica	1393 kWh/kWp/año
Proporción de rendimiento	0.716
Producción normalizada	3.39 kWh/kWp/día
Pérdidas del conjunto	1.08 kWh/kWp/día
Pérdidas del sistema.	0.26 kWh/kWp/día

Figura 3.3 Resumen de resultado de simulación en PVSyst

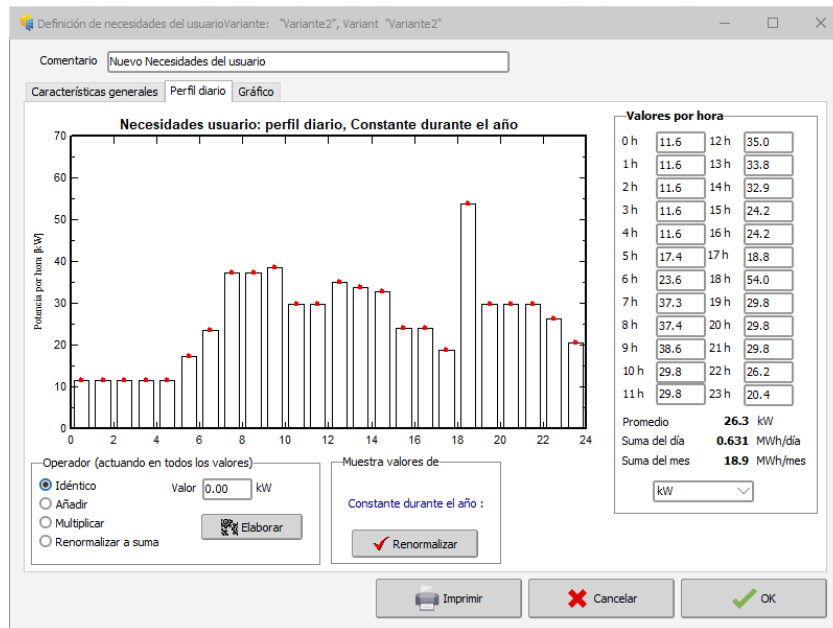


Figura 3.4 Curva de demanda diaria en PVSyst

3.4.1 Costo de inversión

El programa PVSyst permite realizar una evaluación económica del sistema a diseñar, en los cuales se procedió a colocar los valores de los elementos más significativos dentro del sistema para obtener los costos de inversión para la red aislada diseñada. El costo total de inversión para los equipos necesarios para el sistema fotovoltaico, con el fin de abastecer la demanda de la comunidad Cerrito de los Morreños es de aproximadamente \$366,760.00, considerando únicamente la compra de paneles, controladores, baterías y generador, dentro de este costo no se encuentran los valores referentes a operación y mano de obra para la implementación del sistema.

3.5 Análisis de costos de la microrred para la comunidad Cerrito de los Morreños.

En base a los datos de la Tabla 3.2, se obtuvo el número de paneles y baterías necesarias a utilizar para cada escenario. Para el escenario 1, la capacidad máxima de almacenamiento fue cubierta con 24 baterías; el escenario 2 requirió el uso de 88 baterías, el costo de inversión para los equipos se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Cantidad de equipo y costo para los escenarios 1 y 2

Escenario	Cantidad de paneles	Costo de inversión en paneles	Cantidad de baterías	Costo de inversión en baterías	Costo total de inversión en equipo
Escenario 1	0	\$0.00	24	\$6,840.00	\$6,840.00
Escenario 2	0	\$0.00	88	\$25,080.00	\$25,080.00

En los escenarios 3, 4 y 5 se utilizó 35 paneles solares. En el escenario 3 empleo 216 baterías. En el escenario 4, el uso de 264 baterías cumpliría el valor máximo de almacenamiento, para el escenario 5, la cantidad de baterías para el sistema de almacenamiento fue 208, y el escenario 6 utilizó 1056 baterías, siendo este caso el que posee el mayor costo de inversión en equipo como se observa en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Cantidad de equipo y costo para los escenarios 3, 4, 5 y 6

Escenario	Cantidad de paneles	Costo de inversión en paneles	Cantidad de baterías	Costo de inversión en baterías	Costo total de inversión en equipo
Escenario 3	35	\$8,050.00	216	\$61,560.00	\$69,610.00
Escenario 4	35	\$8,050.00	264	\$75,240.00	\$83,290.00
Escenario 5	35	\$8,050.00	208	\$59,280.00	\$67,330.00
Escenario 6	150	\$34,500.00	1056	\$300,960.00	\$335,460.00

Adicionalmente, para el sistema fotovoltaico diseñado en PVSyst fue necesario el uso de 352 paneles solares y 1000 baterías, los costos en equipos se muestran en la Tabla 3.8, demostrando un incremento en los costos de inversión en equipos superior a los casos del modelo de optimización.

Tabla 3.8. Cantidad de equipo y costo para modelo en PVSyst

Escenario	Cantidad de paneles	Costo de inversión en paneles	Cantidad de baterías	Costo de inversión en baterías	Costo total de inversión en equipo
Modelo PVSyst	352	\$80,960.00	1000	\$285,000.00	\$365,960.00

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se han llegado durante el desarrollo del proyecto, en base al análisis de los resultados obtenidos de la metodología planteada.

Conclusiones

Con el planteamiento de los diferentes escenarios de operación, se presentaron varias propuestas de microrred híbrida para la electrificación de la comunidad, cada una de estas basan su óptimo diseño según las necesidades y requerimientos de usuarios, así como las condiciones medioambientales. Desde el punto de vista netamente económico los mejores escenarios corresponden al 1 y 2, siendo el segundo el más adecuado cuando se considera la experiencia de los usuarios con el servicio. Cuando se considera la optimización del recurso fósil y el aprovechamiento de las fuentes renovables, los mejores resultados se obtienen en los escenarios 3, 4 y 5, siendo este último el más adecuado de los tres para los usuarios, ya que otorga el servicio de electricidad las 24 horas del día además de garantizar economía en su dimensionamiento, aprovechando al máximo el recurso renovable disponible en la región.

Mediante la visita a la comunidad Cerrito de los Morreños, se logró realizar el levantamiento de información geográfica y determinar los requerimientos de carga, identificando las características de consumo de la comunidad aislada, categorizadas según el tipo de usuario, se estimó una potencia total instalada de 97.44 kW y un consumo anual de 71,324,19 kWh/año.

Las técnicas de *machine learning* permitieron obtener representantes óptimos de irradiancia, temperatura y velocidad del viento, que representan una parte fundamental de este trabajo, ya que estos representantes posibilitaron convertir los datos estocásticos en valores determinísticos para el uso en el modelo de optimización, y según estos resultados se logró localizar en la zona geográfica de manera óptima, que no es viable técnica ni económicamente las implementación de

aerogeneradores para la generación eléctrica, así como también permitió encontrar de forma precisa que la disponibilidad del recurso solar en cada mes según los datos históricos, con una producción energética anual de 1362.01 kWh/m².

Con el procesamiento de datos se pudo establecer los patrones de ocupación de los habitantes mostrados en la Tabla 3.1, que luego se emplearon para estimar los perfiles de consumo según el tipo de usuario en la comunidad presentados en la Figura 3.1, estableciendo un pico de demanda máxima en 65.16 kW luego de hacer la proyección a un horizonte de tiempo de 15 años.

El diseño de una microrred híbrida a partir de técnicas de *machine learning* junto a la optimización en AMPL, permitió el dimensionamiento de un sistema con la capacidad de suministrar la demanda de la comunidad Cerritos de los Morreños, a la vez que minimizaron costos de diseño. La principal ventaja del modelo de optimización de la microrred híbrida radica en la versatilidad que ofrece al usuario permitiendo encontrar distintos resultados en base a sus preferencias, ya sean priorizar la generación renovable o disminuir los costos de dimensionamiento. Por otra parte, el modelo implementado en PVSyst únicamente considera los requerimientos para el diseño del sistema fotovoltaico, sin considerar el gasto económico que este pueda llegar a suponer. Dentro de la perspectiva económica, el diseño de una microrred híbrida presenta costos inferiores a los que posee un sistema fotovoltaico, tomando como ejemplo el escenario 5 del modelo de optimización cuyos costos totales de dimensionamiento son de \$92,440.40, lo que representa aproximadamente el 22% del costo total de inversión para el sistema fotovoltaico.

Un sistema de generación híbrida renovable, aunque no elimine el consumo total de combustible, disminuye el uso de este colaborando en reducir el impacto ambiental que puede llegar a presentar. El correcto dimensionamiento de un sistema híbrido provee una combinación óptima entre el tamaño de la fuente renovable, sistema de almacenamiento y grupo electrógeno, para minimizar el costo total de implementación y maximizar las horas de producción de energía.

Recomendaciones

Para el levantamiento de información sería recomendable utilizar un equipo de medición electrónica para registrar el consumo eléctrico de varias viviendas mediante un muestreo estadístico, estas mediciones podrían ayudar a estimar y proponer mejores curvas de consumo, que den resultados más precisos de cómo podría ser la demanda en la comunidad.

Incluir en el modelo, para que sea más robusto la posibilidad que este sea quien elija que tipo de panel, inversor y baterías utilizar, es decir que el modelo considere de una base de datos un conjunto de equipos con sus propias características técnicas para que sean evaluados en la optimización.

Es posible mejorar el enlace entre los resultados de los representantes obtenidos con las técnicas de *machine learning*, y el modelo de optimización implementado en AMPL, mediante la inclusión en la programación para que considere los 365 días del año y dentro de este se considere los 24 diferentes factores que dependen del tiempo y que corresponden a cada mes, recuerde que en este trabajo se abordó el estudio considerando la peor condición y la condición media de estos factores para la generación renovable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Mejdalani, M. Hallack, R. Costa, D. Lopez, and BID, “A Brighter Future: The Impact of Rural School Electrification Programs on the Dropout Rate in Primary Education in Brazil,” *IDB - Inter-American Dev. Bank*, no. December, 2018, [Online]. Available: <https://publications.iadb.org/en/brighter-future-impact-rural-school-electrification-programs-dropout-rate-primary-education-brazil>.
- [2] “Ecuador y el impacto en el aumento de su cobertura eléctrica - Energía para el Futuro.” <https://blogs.iadb.org/energia/es/ecuador-y-el-impacto-en-el-aumento-de-su-cobertura-electrica/> (accessed Oct. 13, 2021).
- [3] “Energía – Desarrollo Sostenible.” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/> (accessed Oct. 13, 2021).
- [4] R. Hidalgo-Leon *et al.*, “Impact of the reduction of diesel fuel subsidy in the design of an off-grid hybrid power system: A case study of the bellavista community in ecuador,” *Energies*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061730.
- [5] “Óptima Respuesta a la Demanda y Despacho Económico de Energía Eléctrica en Microrredes basados en Árboles de decisión Estocástica,” Universidad Politécnica Salesiana.
- [6] R. A. M. Caro, “Planificación de micro-redes para comunidades rurales con caracterización de incertidumbre de los recursos renovables y demanda eléctrica,” 2017.
- [7] R. Layla, “Diseño de una microrred Híbrida no conectada a la red para la comunidad de Chumbiriatza en la provincia de Zamora Chinchipe,” Universidad Politécnica Nacional, 2020.
- [8] D. R. Antonio and S. Puente, “Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales,” no. February, 2019, doi: 10.4995/Thesis/10251/118658.
- [9] H. V. E. González, “Generación distribuida por medio de energías alternas renovables y su influencia en la evolución del sistema eléctrico secundario de distribución tradicional,” pp. 39–100, 2008.
- [10] M. M. Chuqui Quinteros, “Análisis de Generación Distribuida en Hogares y Edificaciones,” p. 157, 2014.
- [11] J. Moragues and A. Rapallini, “Energía Eólica,” *Inst. Argentino la Energía “General*

Mosconi,” p. 22, 2003.

- [12] L. Mariam, M. Basu, and M. F. Conlon, “A Review of Existing Microgrid Architectures,” *J. Eng. (United Kingdom)*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/937614.
- [13] T. I. Tolón Martín, “Operación y gestión de microrredes energéticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energética y ambiental,” Universidad Potiténica de cataluña, 2013.
- [14] A. Keyhani and M. Marwali, *Smart Power Grids*. Ohio: Springer, 2012.
- [15] M. O. García, “Técnicas de aprendizaje máquina para la optimización de características de una red de datos,” 2020.
- [16] “PVSyst – Logiciel Photovoltaïque.” <https://www.PVSyst.com/> (accessed Nov. 03, 2021).
- [17] “Home - AMPLAMPL | STREAMLINED MODELING FOR REAL OPTIMIZATION.” <https://AMPL.com/> (accessed Nov. 03, 2021).
- [18] A. H. Pandyaswargo *et al.*, “Estimating the energy demand and growth in off-grid villages: Case studies from Myanmar, Indonesia, and Laos,” *Energies*, vol. 13, no. 20, Oct. 2020, doi: 10.3390/en13205313.
- [19] Ministerio del Trabajo del Ecuador, *Salarios Mínimos Sectoriales 2021*, no. 1. 2021.
- [20] S. Dhundhara, Y. P. Verma, and A. Williams, “Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, no. May, pp. 122–142, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.09.030.
- [21] R. Hernández, “Análisis de Factibilidad para la Instalación de un Sistema de Energía Limpia Mediante Celdas Fotovoltaicas para la Alimentación Eléctrica del Edificio 4 en el ITSLV,” *Ciateq*, p. 85, 2017, [Online]. Available: [https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/97/1/HernandezGallagosRodolfo MMANAV 2017.pdf](https://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1020/97/1/HernandezGallagosRodolfo%20MMANAV%202017.pdf).
- [22] M. Sufyan, N. A. Rahim, M. M. Aman, C. K. Tan, and S. R. S. Raihan, “Sizing and applications of battery energy storage technologies in smart grid system: A review,” *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 1, 2019, doi: 10.1063/1.5063866.
- [23] ARCONEL, “REGULACIÓN DENOMINADO ‘ GARANTÍAS FINANCIERAS PARA PROYECTOS DE GENERACIÓN PROMOVIDOS DE ECONOMÍA POPULAR Y SOLIDARIA Y EMPRESAS MIXTAS ,’” pp. 0–38, 2020.

[24] USAID, "Pautas ambientales sectoriales para un diseño ambientalmente sólido," p. 94, 2014, [Online]. Available: http://www.usaidgems.org/Documents/Spanish/SEG_EnergyGuideline_Final_May11-SP_FINAL_July2018.pdf.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Resultados de las matrices obtenidas durante el levantamiento

Refrigeradoras					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA (w)	CONSUMO ANUAL TOTAL (kWh/año)
Indurama	5				
Mabe	4				
Indurama RI 375	3	230.00	317.55	690.00	952.65
Indurama RI 385	2	125.00	365.00	250.00	730
Indurama RI 390	1	100.00	292.00	100.00	292
Indurama RI 480	1	100.00	292.00	100.00	292
Indurama RI 530	3	121.40	354.50	364.21	1063.5
Frigorifico	1	12.49	36.46	12.49	36.46
MC	1	43.84	128.00	43.84	128
Indurama	6	131.25	383.25	787.50	2299.5
Magic Queen	1	96.23	281.00	96.23	281
Mabe	5	103.77	303.00	518.84	1515

Congelador					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL (kWh/año)
Ecoline	1				
Indurama	7				
Indurama CL300	3	31.22	91.2	93.65	273.45
Indurama CL400	4	44.76	130.7	179.05	522.84
Mabe	3	100.00	216.7	300.00	650.22
Indurama	9	130.00	584.0	1170.00	5256.00
Indurama CL200	9	130.00	589.0	1170.00	5301.00
Whirpool	1	70.00	204.4	70.00	204.40
No especificado	1	210.00	730.0	210.00	730.00
American Star	1	71.23	208.0	71.23	208.00
Electrolux	1	200.00	581.4	200.00	581.40
Electrolux	1	359.59	1050.0	359.59	1050.00
EWO	1	62.50	182.5	62.50	182.50
EWO	1	89.04	260.0	89.04	260.00
Electrolux	1	156.25	456.3	156.25	456.25
Haiev	1	200.00	277.0	200.00	277.00

Lavadora					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA (w)	CONSUMO ANUAL TOTAL (kWh/año)
Global LDTG13BL20010	9	52.05	38.00	468.49	342.00
Electrolux LY20D	1	743.84	543.00	743.84	543.00
Electrolux EWTB15M3F	4	730.00	38.00	2920.00	152.00
Mabe	5	400.00	37.00	2000.00	185.00
Indurama	3	730.00	28.00	2190.00	84.00
Whirpool	1	315.07	230.00	315.07	230.00
LG	3	320.00	233.60	960.00	700.80
Mabe LMD6124PBAB0	3	420.00	36.00	1260.00	108.00
Royal	1	370.00	270.10	370.00	270.10
Durex	2	400.00	292.00	800.00	584.00
Mabe LMD1315B1	1	400.00	292.00	400.00	292.00
Continental	1	500.00	365.00	500.00	365.00
No especificada	1	850.00	620.50	850.00	620.50
No especificada	1	505.00	38.00	505.00	38.00
Electrolux	1	620.00	452.60	620.00	452.60
Magic Queen	1	400.00	292.00	400.00	292.00
LG	1	375.34	274.00	375.34	274.00
Mabe	1	400.00	28.00	400.00	28.00
Mabe	1	400.00	38.00	400.00	38.00
Mabe	1	380.00	24.00	380.00	24.00

Tv					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
Tubo 15 pulg	9	55	120.45	495	1084.05
Sony plasma 32	6	122	267.18	732	1603.08
Innova plasma 52	4	155	339.45	620	1357.8
Tubo 21 pulg	4	75	164.25	300	657
LG plasma 32	16	180	394.2	2880	6307.2
LG plasma 52	1	65	142.35	65	142.35
Antiguo	1	90	197.1	90	197.1
Samsung plasma 44	4	210	459.9	840	1839.6
Plasma de 42	9	70	153.3	630	1379.7
Hyundai plasma 50	3	120	262.8	360	788.4
Plasma 62	1	195	427.05	195	427.05
LG plasma 21	2	60	131.4	120	262.8
LG plasma 55	5	135	295.65	675	1478.25
TCL	2	105	229.95	210	459.9
TCL 48 pulgadas	2	95	208.05	190	416.1
Sony plasma 42	2	58	127.02	116	254.04
Prima plasma 32	1	62	135.78	62	135.78
Innova plasma	4	37	54	148	216
Riviera	1	54	86	54	86

Licadora					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
Samurai	1	500	45.625	500	45.625
Oster	2	350	31.9375	700	63.875
Oster	6	600	54.75	3600	328.5
No especificada	6	300	27.375	1800	164.25
Oster	1	1000	91.25	1000	91.25
Licadora	1	700	63.875	700	63.875
Imaco	6	450	41.0625	2700	246.375
Hometech	5	300	27.375	1500	136.875
Tekno	1	500	45.625	500	45.625
Umco	1	500	45.625	500	45.625
No especificada	2	400	36.5	800	73
No especificada	1	370	33.7625	370	33.7625

Tostadora					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
No especificado	4	800	73	3200	292
No especificado	3	750	68.4375	2250	205.3125
No especificado	1	120	10.95	120	10.95
Electriclife	1	650	59.3125	650	59.3125

Plancha					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
Oster	13	1000	91.25	13000	1186.25
Electrolux	4	1200	109.5	4800	438
Hometech	1	1100	100.375	1100	100.375
Oster	1	1100	100.375	1100	100.375
Bruder	1	1200	109.5	1200	109.5
Electrolife	1	1000	91.25	1000	91.25
Electrolife	1	1200	109.5	1200	109.5
Oster	2	1200	109.5	2400	219
Imaco	2	1000	91.25	2000	182.5

Computadora					
MODELO	CANTIDAD	POTENCIA (W)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
HP	9	168	183.96	1512	1655.64
Escritorio	1	374	409.53	374	409.53
No especificada	3	96	105.12	288	315.36
Extratech	1	65	71.175	65	71.175
No especificada	1	216	236.52	216	236.52

	Cantidad	Potencia	Consumo anual	POTENCIA INSTALADA	CONSUMO ANUAL TOTAL
Extra					
Microondas	1	1300	237.25	1300	237.25
Impresora	1	66	12.045	66	12.045
Batidora	1	200	36.5	200	36.5
Play station 4	1	120	87.6	120	87.6
Parlante	1	2000	730	2000	730
Reflector	1	150	27.375	150	27.375
Maquina de coser	2	90	16.425	180	32.85
Parlante	4	90	16.425	360	65.7
Plancha de cabello	1	60	10.95	60	10.95
Impresora Epson L3110	1	0.539726027	0.197	0.539726027	0.197
Equipo de sonido	1	180	65.7	180	65.7
Equipo de sonido	1	220	80.3	220	80.3
Piano eléctrico	110	1	0.365	110	40.15

APÉNDICE B

Código en Matlab k-means

```
close all
clc
%ALLSKY: All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance
(Wh/m^2)
%T2M:Temperature at 2 Meters (C)
%WS10M:Wind Speed at 10 Meters (m/s)
%WS50M: Wind Speed at 50 Meters (m/s)

%% Lectura de datos
filename = '04_abril-2018-2019-2020.csv';
Datos = readtable(filename);
Datos=table2array(Datos);

ALLSKY=Datos(:,2);
T2M=Datos(:,3);
WS10M=Datos(:,4);
WS50M=Datos(:,5);
%% Graficos
h = 1:length(ALLSKY);
t = tiledlayout(2,2);
nexttile
plot(h,ALLSKY)
xlabel('Hora')
ylabel('Irradiancia Global Horizontal (Wh/m^2)')
nexttile
plot(h,T2M)
xlabel('Hora')
ylabel('Temperatura del aire (°C)')
nexttile
plot(h,WS10M)
xlabel('Hora')
ylabel('Velocidad del viento a 10 metros (m/s)')
nexttile
plot(h,WS50M)
xlabel('Hora')
ylabel('Velocidad del viento a 50 metros (m/s)')
t.Padding = 'compact';
t.TileSpacing = 'compact';

%% Selección de datos
```

```

[ row, col ] = find( Datos(:,1) >= 6 & Datos(:,1) <= 18 ); %Registra
los índices del lugar donde se cumple la condición
COLVER = Datos( row, 1 ); %Devuelve los valores de los índices
que cumplan la condición
COLVER2 = Datos( row, 2 ); %Irradiancia durante el día
COLVER3 = Datos( row, 3 ); %Temperatura durante el día
SolcastNew = [ COLVER2 COLVER3 ]; %Irradiación y temperatura
desde las 6am hasta 18pm
colmin = min( SolcastNew ); %Se obtiene el valor mínimo por
cada columna
colmax = max( SolcastNew ); %Se obtiene el valor máximo por
cada columna
Bcol1 =
rescale( SolcastNew, 'InputMin', colmin, 'InputMax', colmax ); %E
scalamiento de los valores

%% Determina la cantidad de clústeres Radiación y
Temperatura
sa = [];
K = [];
for k = 1:8
    [ idx, c, sumd ] = kmeans( Bcol1, k );
    sa = [ sa sum( sumd ) ];
    K = [ K k ];
end
figure ( 2 )
plot( K, sa ) %Codo de Jambú
title( 'Codo de Jambú Irradiancia y Temperatura' )
xlabel( 'Número de grupos' )
ylabel( 'Inercia intraclass' )
grid on

%% Algoritmo de Kmeans Radiación y Temperatura
[ idx, C ] = kmeans( Bcol1, 2 );
figure ( 3 )
gscatter( Bcol1(:,1), Bcol1(:,2), idx, 'bgm' )
hold on
plot( C(:,1), C(:,2), 'kx' ) %Gráfica el centroide
legend( 'Grupo 1', 'Grupo 2', 'Centroide del Grupo' )
%title( 'Aplicando Kmeans' )
xlabel( 'Temperatura del aire a 2 metros' )
ylabel( 'Irradiación horizontal global' )

Asg = [ idx COLVER SolcastNew ];

```

```

%% IDENTIFICAR HORAS CLUSTER 2 Radiación y Temperatura
[row2,col2] = find(Asg(:,1)==2); %Registra los índices del
lugar donde se cumple la condición
HorasCluster2 = Asg(row2,1); %Devuelve los valores de los
índices que cumplan la condición
HorasCluster2_1 = Asg(row2,2);
HorasCluster2_2 = Asg(row2,3);
SolcastC2=[HorasCluster2 HorasCluster2_1
HorasCluster2_2] %Horas del cluster 2
%IDENTIFICAR HORAS CLUSTER 1
[row1,col1] = find(Asg(:,1)==1); %Registra los índices del
lugar donde se cumple la condición
HorasCluster1 = Asg(row1,1); %Devuelve los valores de los
índices que cumplan la condición
HorasCluster1_1 = Asg(row1,2);
HorasCluster1_2 = Asg(row1,3);
SolcastC1=[HorasCluster1 HorasCluster1_1
HorasCluster1_2] %Horas del cluster 1

%C1
c_NewT1=C(1,1)*(colmax(:,1)-colmin(:,1))+colmin(:,1)
c_NewI1=C(1,2)*(colmax(:,2)-colmin(:,2))+colmin(:,2)
%C2
c_NewT2=C(2,1)*(colmax(:,1)-colmin(:,1))+colmin(:,1)
c_NewI2=C(2,2)*(colmax(:,2)-colmin(:,2))+colmin(:,2)
%Centroides_Irradiancia_Temperatura=[c_NewT1,c_NewI1;c_NewT
2,c_NewI2]

%% CLUSTER PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO A 10 Metros
WS10M=Datos(:,4);
WS50M=Datos(:,5);

%%número de clusters
B1=WS10M;
colmin2=min(B1); %Se obtiene el valor mínimo por cada
columna
colmax2=max(B1); %Se obtiene el valor máximo por cada
columna
P1=rescale(B1,'InputMin',colmin2,'InputMax',colmax2); %Esca
lamiento de los valores

%Determina la cantidad de clústeres
sa=[];
K=[];
for k=1:8

```



```

        [idx,c,sumd]=kmeans(P1,k);
        sa=[sa sum(sumd)];
        K=[K k];
end
figure(6)
plot(K,sa) %Codo de Jambú Velocidad del viento
title('Codo de Jambú Velocidad del viento a 10')
xlabel('Número de Grupos')
ylabel('Inercia Intra-clases WCSS')
grid on
%%Kmeans solo con P

P=WS10M;
t=1:604800;
rng default; % For reproducibility
X = [P];
figure (7)
plot(X(:,1),'.');
title 'Cluster Wind Speed 10m';
opts = statset('Display','final');
[idx,C2] = kmeans(X,2,'Distance','cityblock',...
    'Replicates',5,'Options',opts);
% figure;
% plot(X(idx==1,1),'r.','MarkerSize',12);
% hold on
% plot(X(idx==2,1),'b.','MarkerSize',12)
% plot(C(:,1),'kx',...
%     'MarkerSize',15,'LineWidth',3)
% plot(X(idx==3,1),'g.','MarkerSize',12)
% plot(C(:,1),'kx',...
%     'MarkerSize',15,'LineWidth',3)
% legend('Cluster 1','Cluster 2','Cluster
3','Centroids',...
%     'Location','NW')
% title 'Cluster Assignments and Centroids'
% hold off
%Cluster_Velocidad_Del_Viento_10m= C2

%% CLUSTER PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO A 50 Metros
WS50M=Datos(:,5);

%%número de clusters
B1=WS50M;

```

```

colmin2=min(B1); %Se obtiene el valor mínimo por cada
columna
colmax2=max(B1); %Se obtiene el valor máximo por cada
columna
P1=rescale(B1,'InputMin',colmin2,'InputMax',colmax2); %Esca
lamiento de los valores

%Determina la cantidad de clústeres
sa=[];
K=[];
for k=1:8
    [idx,c,sumd]=kmeans(P1,k);
    sa=[sa sum(sumd)];
    K=[K k];
end
figure(8)
plot(K,sa) %Codo de Jambú Velocidad del viento
title('Codo de Jambú Velocidad del viento a 50m')
xlabel('Número de Clústeres')
ylabel('Inercia Intra-clases WCSS')
grid on
%%Kmeans solo con P

P=WS50M;
t=1:604800;
rng default; % For reproducibility
X = [P];
figure (9)
plot(X(:,1),'.');
title 'Cluster Wind Speed 50m';
opts = statset('Display','final');
[idx,C3] = kmeans(X,2,'Distance','cityblock',...
    'Replicates',5,'Options',opts);
% figure;
% plot(X(idx==1,1),'r.','MarkerSize',12);
% hold on
% plot(X(idx==2,1),'b.','MarkerSize',12)
% plot(C(:,1),'kx',...
%     'MarkerSize',15,'LineWidth',3)
% plot(X(idx==3,1),'g.','MarkerSize',12)
% plot(C(:,1),'kx',...
%     'MarkerSize',15,'LineWidth',3)
% legend('Cluster 1','Cluster 2','Cluster
3','Centroids',...
%     'Location','NW')

```

```

% title 'Cluster Assignments and Centroids'
% hold off

%Cluster_Velocidad_Del_Viento_50m= C3

%% RESULTADOS

Centroides_Irradiancia_Temperatura=[c_NewT1,c_NewI1;c_NewT2
,c_NewI2]
Cluster_Velocidad_Del_Viento_10m= C2
Cluster_Velocidad_Del_Viento_50m= C3

```

APÉNDICE C

Código en Python Gaussian Mixture Models

Basado en el ejemplo de: <https://github.com/scikit-learn/scikit-learn/issues/4717>

```

import numpy as np
from sklearn import mixture #Scikit-
Learn es una de estas librerías gratuitas para Python. Cuenta con algoritmos de clasific
ación, regresión, clustering y reducción de dimensionalidad.
from sklearn.cluster import KMeans
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns # Seaborn es una librería para Python que permite generar fácil
mente elegantes gráficos
p=[]
nombre_archivo = "DatosDemandac1.csv" # declaramos el nombre del archivo
with open(nombre_archivo,"r") as archivo : # abrimos el archivo con la funcion open
    next (archivo None) # omitimos la primera la primera linea del ecabezado con netx pa
r aque itere el archivo
    for linea in archivo :
        linea = linea.rstrip() # empezamos a leer cada linea con rstrip, que remeueve el salto d
e linea
        separador = "," # declaramos cual es el separador
        lista = linea.split(",") # .split convertira cada cadena de caracteres a una lista o arregl
o,

```

```

# seleccione en la lista:
#1 Porcentaje de crecimiento anual demanda de energía MWH
#2 Porcentaje de crecimiento anual Potencia MW
#3 Demanda de Energía MWH
#4 Potencia MW
p.append(float(lista[1])) # de la lista vamos a leer los valores como flotantes

np.random.seed(2)
x = np.concatenate([
    np.random.normal(0, 2, 2000),
    np.random.normal(5, 5, 2000),
    np.random.normal(3, 0.5, 2000)
])

x=np.array(p)
# filtramos los elementos que valen cero en el vector, de esta manera se toma únicamente las horas del día que hay radiación solar
x= np.fromiter((element for element in x if element >0), dtype = x.dtype)

plt.hist(x, 80, density=True)
plt.savefig('dwe')
# Data are in x
x.shape
# Again data have to be reshape for fitting GMM: Esta función devuelve un nuevo array con los datos del array pasado como primer argumento y el nuevo tamaño indicado:
x = x.reshape(-1, 1)
# Fit the GMM:
gmm_model2 = mixture.GaussianMixture(n_components=1, max_iter= 500, random_state=0)
gmm_model2.fit(x)
# Check that the means and variances correspond to the ones we generated the data from

```

```

print("GM: ", gmm_model2.means_, "Covariances: ", gmm_model2.covariances_, "Weights: ", gmm_model2.weights_)
xpdf = np.linspace(0, 10, 1000) # Points to generate
xpdf = xpdf.reshape(-1,1)

# Calculate mixture model's scores: avg. loglikelihood
# Get score for each of the points in linspace
loglikelihoods = gmm_model2.score_samples(xpdf)

# As we got log likelihoods, to get likelihoods we go back:
# Each point has a likelihood to belong to a certain mixture, plot those:

plt.plot(xpdf, np.exp(loglikelihoods), '-r')
plt.hist(x, 80, density=True)

for i in range(gmm_model2.n_components):
    pdf = gmm_model2.weights_[i] * stats.norm(gmm_model2.means_[i, 0],
                                              np.sqrt(gmm_model2.covariances_[i, 0])).pdf(xpdf)
    plt.fill(xpdf, pdf, facecolor='gray', edgecolor='blue', alpha=0.3)
plt.savefig('dwe2', dpi=400)

# Compare to kmeans:
kmeans2_model = KMeans(n_clusters=1, n_init=30, random_state=0)
kmeans2_model.fit(x)
kmeans2_model.cluster_centers_

```

APÉNDICE D

implementación del modelo de optimización en AMPL

```
#eliminar memoria
reset;
#cambiar al modo modelo
model;
#declarar conjuntos
set T; #conjunto de intervalos de tiempo
#declarar parámetros
param PD{T};      #demanda de la microred
param fGD{T};     #factor (machine learning) de producción solar
param IPGDmax;    #límite de instalación de fuente solar (terreno, techo, etc)
param IPTmax;     #límite para el tamaño del generador a diesel
param cIGD;       #costo de instalar las fuentes solares
param cIT;        #costo de instalar/invertir generación térmica
param cIPAE;      #costo de invertir potencia de transferencia de baterías
param cIEA;       #costo de invertir capacidad máxima de almacenamiento de baterías
param cOT;        #tarifa de compra de energía al grupo electrógeno
param cCC;        #costo por el corte de carga (energía no suministrada)
param EAE0;       #energía inicial de las baterías
param alpha;      #coeficiente de eficiencia de la batería
param beta;       #tasa de autodescarga de la abtería
param delta;      #intervalo de tiempo en horas
#param p{C};      #probabilidad del escenario de operación
#declarar variables
var PGDmax >= 0, <= IPGDmax; #dimensionamiento de las fuentes solares
var PTmax >= 0, <= IPTmax;   #dimensionamiento del grupo electrógeno
var PAEmax >= 0; #potencia activa máxima de inyección o extracción de la batería
var EAEmax >= 0; #capacidad máxima del almacenador de energía
var PT{T} >= 0; #potencia activa entregada por el grupo electrógeno (diesel)
var XD{T} =0; #pocentaje de corte de carga
#var XD{T} =0;
```

```

var PAEi{T} >= 0; #potencia activa de inyección
var PAEe{T} >= 0; #potencia activa de extracción
var EAE{T} >= 0; #energía almacenada en la batería
#definir función objetivo
minimize costo:
    cIGD * PGDmax + cIT * PTmax + cIPAE * PAEmax + cIEA * EAEmax +
    365 * sum {t in T} (delta * cOT * PT[t]) +
    365 * sum {t in T} (delta * cCC * PD[t] * XD[t]);
#definir restricciones
subject to balance_potencia_activa {t in T} :
    PT[t] + fGD[t] * PGDmax = PD[t]*(1-XD[t]) + PAEe[t] - PAEi[t];
subject to capacidad_grupo_electrogeno {t in T} :
    PT[t] <= PTmax;
subject to capacidad_potencia_activa_maxima_inyeccion_bateria {t in T} :
    PAEi[t] <= PAEmax;
subject to capacidad_potencia_activa_maxima_extraccion_bateria {t in T} :
    PAEe[t] <= PAEmax;
subject to balance_energetico {t in T : t > 1} :
    EAE[t] = EAE[t-1] + alpha * delta * PAEe[t] - delta * PAEi[t]/alpha - beta * EAE[t];
subject to balance_energetico_inicial {t in T : t = 1} :
    EAE[t] = EAE0 + alpha * delta * PAEe[t] - delta * PAEi[t]/alpha - beta * EAE[t];

subject to capacidad_maxima_almacenamiento {t in T} :
    EAE[t] <= EAEmax;
data;
param: T : PD      fGD :=
#      [kW]
1  11.64  0.000000000
2  11.64  0.000000000
3  11.64  0.000000000
4  11.64  0.000000000
5  17.37  0.000000000

```

6 23.59 0.114832511
7 37.29 0.114832511
8 37.35 0.114832511
9 38.61 0.417809216
10 29.83 0.417809216
11 29.83 0.417809216
12 34.95 0.417809216
13 33.75 0.417809216
14 32.93 0.417809216
15 24.15 0.417809216
16 24.15 0.417809216
17 18.77 0.114832511
18 53.95 0.114832511
19 29.79 0.000000000
20 29.79 0.000000000
21 29.79 0.000000000
22 26.15 0.000000000
23 20.43 0.000000000
24 11.64 0.000000000

;

param delta:= 1; # horas
param IPGDmax := 65.16; # kW
param clGD := 464.6; # \$/kW
param cCC := 0.646; # \$/kWh
param clT := 997.2761; # \$/kW
param cOT := 0.1666; # \$/kWh
param IPTmax := 185; # kW
param clPAE := 197.916; # \$/kW
param clEA := 197.916; # \$/kWh
#param EAE0 := 0; # kWh
param EAE0 := 74; # kWh


```
param alpha := 0.95; # porcentagem
param beta := 0.02; # porcentagem
# se obliga que la potencia generada por el grupo electrogeno sea cero
fix PT[9]:=0;
fix PT[10]:=0;
fix PT[11]:=0;
fix PT[12]:=0;
fix PT[13]:=0;
fix PT[14]:=0;
fix PT[15]:=0;
fix PT[16]:=0;
# define CPLEX como solver
option solver cplex;
# resolve o modelo
solve costo;
# mostrar os resultados
display PGDmax;
display cIGD * PGDmax;
display PTmax;
display cIT * PTmax;
display PAEmax;
display cIPAE * PAEmax;
display EAEmax;
display cIEA * EAEmax;
display 365 * sum{t in T} (delta*cOT*PT[t]);
display 365 * sum{t in T} (delta*cCC*PD[t]*XD[t]);
display XD;
display PT;
display PAEi;
display PAEe;
display EAE;
display costo;
```

APÉNDICE E

Resultados simulación en PVSyst de la planta fotovoltaica

The screenshot displays the PVSyst software interface for a project named "Diseño Cerrito de los Morreños". The interface is divided into several sections:

- Project Information:** Includes fields for "Nombre del proyecto" (Diseño Cerrito de los Morreños), "Nombre del cliente" (No definido), "Archivo del sitio" (Comunidad Cerrito de los Morreños_Nasa_1983.SIT, NASA-SSE satellite data 1983-2005, Ecuador), and "Archivo meteo" (Cerrito de los Morreños_MN73_SYN.MET, Meteonorm 7.3, Sat=100%, Sintético).
- Simulation Status:** A blue banner indicates "Simulación realizada (versión 7.2.10, fecha 22/01/22)".
- Variante Section:** Shows "Variante n°" as "VCO : Variante3". It includes sub-sections for "Parámetros principales" (Orientación, Necesidades usuario, Sistema, Pérdidas detalladas), "Opcional" (Horizonte, Sombreados cercanos, Evaluación económica), and "Simulación" (Ejecutar simulación, Simulación avanzada, Informe, Resultados detallados).
- Resumen de resultados:** A table summarizing the simulation results for a "Sistema independiente con baterías".

Resumen de resultados	
Tipo de sistema	Sistema independiente con baterías
Producción del sistema	255 MWh/año
Producción específica	1393 kWh/kWp/año
Proporción de rendimiento	0.716
Producción normalizada	3.39 kWh/kWp/día
Pérdidas del conjunto	1.08 kWh/kWp/día
Pérdidas del sistema.	0.26 kWh/kWp/día

A "Salida" button is located at the bottom right of the interface.

APÉNDICE F

Tabla de datos del panel 520 W

YLM-J 144 CELL (M10)

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module type	YLuxD-49e 1/2 (xxx=Pmax) YLuxD-49e 1500V 1/2 (xxx=Pmax)							
Power output	P_{max}	W	520	525	530	535	540	
Power output tolerances	ΔP_{max}	W	0/+5					
Module efficiency	η_m	%	20.09	20.29	20.48	20.67	20.87	
Voltage at P_{max}	V_{mp}	V	41.0	41.25	41.40	41.55	41.70	
Current at P_{max}	I_{mp}	A	12.66	12.73	12.81	12.88	12.95	
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	48.92	49.07	49.22	49.37	49.52	
Short-circuit current	I_{sc}	A	13.55	13.62	13.69	13.76	13.83	

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C module temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.
Average relative efficiency reduction of 3.3% at 200W/m² according to EN 60904-1.

Electrical parameters at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)

Power output	P_{nom}	W	386.9	390.6	394.3	398.0	401.8
Voltage at P_{nom} <td>V_{mp}</td> <td>V <td>38.2</td> <td>38.4</td> <td>38.5</td> <td>38.6</td> <td>38.8</td> </td>	V_{mp}	V <td>38.2</td> <td>38.4</td> <td>38.5</td> <td>38.6</td> <td>38.8</td>	38.2	38.4	38.5	38.6	38.8
Current at P_{nom} <td>I_{mp}</td> <td>A <td>10.13</td> <td>10.18</td> <td>10.25</td> <td>10.30</td> <td>10.36</td> </td>	I_{mp}	A <td>10.13</td> <td>10.18</td> <td>10.25</td> <td>10.30</td> <td>10.36</td>	10.13	10.18	10.25	10.30	10.36
Open-circuit voltage <td>V_{oc}</td> <td>V <td>45.8</td> <td>46.0</td> <td>46.1</td> <td>46.2</td> <td>46.4</td> </td>	V_{oc}	V <td>45.8</td> <td>46.0</td> <td>46.1</td> <td>46.2</td> <td>46.4</td>	45.8	46.0	46.1	46.2	46.4
Short-circuit current <td>I_{sc}</td> <td>A <td>10.95</td> <td>11.00</td> <td>11.06</td> <td>11.12</td> <td>11.17</td> </td>	I_{sc}	A <td>10.95</td> <td>11.00</td> <td>11.06</td> <td>11.12</td> <td>11.17</td>	10.95	11.00	11.06	11.12	11.17

NOCT: open-circuit module operation temperature at 800W/m² irradiance, 20°C ambient temperature, 1m/s wind speed.

THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	45± 2
Temperature coefficient of P_{max}	γ	%/°C	-0.35
Temperature coefficient of V_{oc}	$\beta_{V_{oc}}$	%/°C	-0.27
Temperature coefficient of I_{sc}	$\alpha_{I_{sc}}$	%/°C	0.05

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000V _{DC} or 1500V _{DC}
Max. series fuse rating	25A
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow)	5400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

*DO NOT CONNECT FUSE IN COMBINED BOX WITH TWO OR MORE STRINGS IN PARALLEL CONNECTION

GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	2279×1134×35mm
Weight	28.6kg

PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per pallet	31
Number of pallets per 40' container	20
Packaging box dimensions (L / W / H)	2295×1110×1245 mm
Box weight	942kg

Unit: mm

