



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Zapata Terán Edgar Marcelo

Tutor:

Álvaro Santiago Mullo Quevedo Msc.

**LATACUNGA –ECUADOR
2023**

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022**” presentado por Zapata Terán Edgar Marcelo para optar por el título magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, julio, 27, 2023



Alvaro Mullo Quevedo Msc.
CC. 0502768542

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: **“Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.”**, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia ; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, julio, 27, 2023



.....
Edwin Homero Moreano Martínez
C.I.: 0502607500
Presidente del tribunal



.....
Cristian Xavier Espin Beltrán
C.I.: 0502269368
Lector 2



.....
Cristian Fabian Gallardo Molina
C.I.: 0502847692
Lector 3

DEDICATORIA

Con todo mi amor y gratitud, les dedico esta tesis. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

A mis queridos padres, Armando y Elena, quienes me han brindado su constante aliento y me han enseñado el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por siempre creer en mí y por ser mis pilares en cada paso de este camino académico. Su amor y dedicación me han dado las bases sólidas para enfrentar cualquier desafío.

A ti, mi amada Ximena, mi compañera de vida y mi mayor inspiración. Tu apoyo inquebrantable, tu paciencia y tu comprensión han sido fundamentales en mi travesía hacia la culminación de esta tesis. Gracias por ser mi motivación constante. Tu amor me ha dado la fuerza para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis adorables hijos, Joel y Valentina, quienes son la luz de mi vida. Ustedes son mi mayor motivación y el motor que impulsa mis sueños. A través de este logro, espero inspirarlos a alcanzar todas sus metas y demostrarles que, con trabajo arduo y determinación, cualquier cosa es posible. Siempre estaré aquí para apoyarlos y guiarlos en cada paso de su propio viaje.

Esta tesis no solo es un testimonio de mi dedicación y perseverancia, sino también un tributo a su amor incondicional y apoyo constante. Gracias por estar a mi lado y creer en mí cuando más lo necesitaba. Su presencia en mi vida es un regalo invaluable y les estaré eternamente agradecido.

Marcelo Zapata

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Armando y Elena, quienes a lo largo de mi vida han apoyado y motivado mi formación académica. Sin ellos jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora eh conseguido, y a todos quienes me han apoyado de forma directa o indirectamente en mi carrera universitaria.

Edgar Marcelo Zapata Terán

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

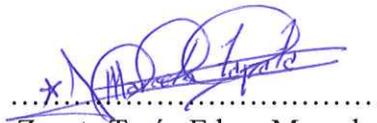
Latacunga, julio, 27, 2023


.....
Zapata Terán Edgar Marcelo
C.I. 0502450943

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

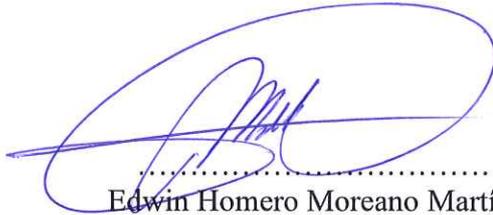
Latacunga, julio, 27, 2023


.....
Zapata Terán Edgar Marcelo
C.I. 0502450943

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: **“Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.”** contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, julio, 27, 2023



.....
Edwin Homero Moreano Martínez
C.I.: 0502607500

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCION SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Título: Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.

Autor: Zapata Terán Edgar Marcelo

Tutor: Mullo Quevedo Álvaro Msc.

RESUMEN

En el presente artículo, se propone un marco metodológico para la planificación óptima de una microrred distribuida (DER), que sirva como sistema eléctrico alternativo y emergente en la parroquia Pucayacu, considerado como una red aislada tomando en cuenta los recursos energéticos del sector como sistemas fotovoltaicos (PV), sistemas de microgeneración hidráulica (MH) de pasada, sistema de almacenamiento en baterías BESS y un sistema de generación térmica (GT). La metodología considera una formulación de un problema lineal y un análisis comparativo con la formulación de un problema de enteros mixtos (MIOP) para lo cual se requiere como parte de las variables de entrada la evaluación de los recursos energéticos y el perfil de carga necesaria para cubrir la demanda, la evaluación se lo realiza en un estudio anual. Pucayacu es una parroquia cerca de las orillas del río Quindigua que por su ubicación geográfica sufre desabastecimiento de energía eléctrica, un costo elevado en la reparación del sistema eléctrico. Para la planificación de la DER se estableció un análisis comparativo entre un problema lineal y un problema lineal de enteros mixtos, dándose el mismo los mejores resultados con una inversión de \$149.320, un costo de operación de \$214,23 estimando un consumo de 233,33 litros de diésel con una emanación de 0.93 Tn de CO₂. La metodología puede ser aplicada en escenarios aislados para el aprovechamiento de sus recursos renovables que sirva como un sistema emergente y pueda funcionar durante todo el año.

PALABRAS CLAVE: *Planificación; optimización; micro-red; generación distribuida.*

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title: Optimal planning of energy resources that allows establishing a proposal for distributed micro-generation as an alternative system to the electrical distribution network Pucayacu, 2022.

Author: Zapata Terán Edgar Marcelo

Tutor: Mullo Quevedo Álvaro Msc.

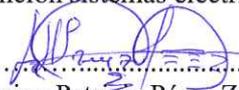
ABSTRACT

In this article, a methodological framework is proposed for the optimal planning of a distributed microgrid (DER), which serves as an alternate and emergent electrical system in the Pucayacu parish, considered as an isolated network taking into account the energy resources of the sector as systems. photovoltaic (PV), run-of-the-river hydraulic microgeneration (HM) systems, BESS battery storage system and a thermal generation (TG) system. The methodology considers a formulation of a linear problem and a comparative analysis with the formulation of a mixed integer problem (MIOP) for which the evaluation of energy resources and the load profile necessary to cover the demand, the evaluation is carried out in an annual study. Pucayacu is a parish near the banks of the Quindigua river that due to its geographical location suffers from a shortage of electricity, a high cost in repairing the electrical system. For the planning of the DER, a comparative analysis was established between a linear problem and a linear problem of mixed integers, giving me the best results with an investment of \$149,320, an operating cost of \$214.23, estimating a consumption of 233.33 liters of diesel with an emanation of 0.93 tons of CO₂. The methodology can be applied in isolated scenarios for the use of its renewable resources that serve as an emerging system and can work throughout the year.

KEYWORD: *Planning; micro-grid; optimization; distributed generation.*

Myrian Patricia Pérez Zambrano con cédula de identidad número: 050240748-9. Licenciada en: CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN ESPECIALIDAD INGLÉS con número de registro de la SENESCYT:1031-02-274587; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alterno a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.”** de Zapata Terán Edgar Marcelo, aspirante a magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

Latacunga, julio, 27, 2023

.....

Myrian Patricia Pérez Zambrano
C.I. 0502407489

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Planteamiento del problema..... | 3 |
| Formulación del problema. | 4 |
| Justificación..... | 6 |
| Hipótesis..... | 6 |
| CAPÍTULO I..... | 7 |
| FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA..... | 7 |
| 1.1 Antecedentes de la investigación | 7 |
| 1.2 Fundamentación Teórica..... | 11 |
| 1.2.1 Microgeneración Distribuida. | 11 |
| 1.2.2 Características micro generación distribuida | 11 |
| 1.2.3 Esquema general de la microgeneración distribuida..... | 12 |
| 1.3 Micro redes eléctricas | 15 |
| 1.3.1 Cómo funcionan las micro redes..... | 16 |
| 1.3.2 Estructura y elementos de una Micro red..... | 17 |
| 1.4 Micro red conectada a la red | 18 |
| 1.4.1 Ventajas de las micro redes..... | 20 |
| 1.5 Energía Fotovoltaica | 21 |
| 1.5.2 Sistemas de almacenamiento de energía | 21 |
| 1.5.2 Demanda Eléctrica en micro redes..... | 22 |
| 1.5.3 Despacho económico | 22 |
| 1.6 Modelos de optimización | 23 |
| 1.6.1 Programación Lineal Entera Mixta (PEM) | 23 |
| 1.6.1 Tipos de algoritmos..... | 23 |
| 1.6.2 Algoritmos Heurísticos | 24 |
| 1.6.3 Algoritmos Metaheurísticos | 25 |

| | |
|---|----|
| 1.6.4 Redes Neuronales..... | 25 |
| 1.7 Fundamentación metodológica | 26 |
| 1.8 Tipo de Investigación..... | 26 |
| 1.9 Generación Distribuida en Zonas Rurales..... | 27 |
| 1.9.1 Condiciones de las micro redes en zonas rurales | 28 |
| 1.10 Marco regulatorio de la generación distribuida | 28 |
| 1.10 Consideraciones IEEE 1547 21..... | 29 |
| 1.11 Metodología de Investigación..... | 29 |
| 1.12 Instrumentos..... | 30 |
| CAPÍTULO II | 31 |
| 2.1 Título del proyecto:..... | 31 |
| 2.2 Objetivo del Proyecto..... | 31 |
| 2.3 Justificación..... | 31 |
| 2.4 Descripción de la propuesta. | 34 |
| 2.4.1 Estudio de la potencia requerida. | 36 |
| 2.4.2 Análisis del potencial energético solar..... | 38 |
| 2.2.3 Panel Fotovoltaico considerado para el estudio | 40 |
| 2.2.3.1 Modelado del funcionamiento del panel fotovoltaico..... | 41 |
| 2.2.4 Selección del Método de Optimización para realizar la planificación..... | 43 |
| 2.2.5 Modelos del portafolio de inversión (PV)..... | 44 |
| 2.5 Formación LP | 48 |
| 2.5.1 Características del generador | 50 |
| CAPÍTULO III | 52 |
| APLICACIÓN DE LA PROPUESTA | 52 |
| 3.1 Análisis de resultados..... | 52 |
| 3.1.1 Marco metodológico para analizar los resultados a obtener | 52 |
| 3.1.2 Consideraciones para determinar el programa que ayudara a la utilidad del optimizador. | 53 |

| | |
|--|----|
| 3.1.3 Consideraciones de costos para determinación del sistema de optimización. | 53 |
| 3.2 Resultados y análisis de los escenarios propuestos..... | 55 |
| 3.2.1 Consideración de Resultados analizados mediante potencia máxima instalada..... | 55 |
| 3.2.2 Análisis con el mes de más alto recurso hídrico | 56 |
| 3.2.3 Análisis con el mes de más bajo recurso hídrico | 58 |
| 3.3 Resultados de la modelación con una inversión de cien mil dólares | 60 |
| 3.3.1 Resultados obtenidos del mes de enero..... | 60 |
| 3.3.2 Planificación de los recursos para el mes de diciembre. | 61 |
| PRUEBA DE HIPÓTESIS..... | 63 |
| 4. CONCLUSIONES GENERALES | 64 |
| RECOMENDACIONES | 66 |
| Bibliografía | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema general de la microgeneración distribuida | 13 |
| Figura 2. Esquema general de microgeneración distribuida asilada..... | 14 |
| Figura 3. Esquema general de microgeneración distribuida conectada a red | 15 |
| Figura 4. Ejemplo de micro red..... | 16 |
| Figura 5. Estructura general de una microred | 18 |
| Figura 6. Diagrama de una Micro red con base ERNC | 20 |
| Figura 7. Configuración de las señales de un red neuronal..... | 26 |
| Figura 8. a) Configuración de un red eléctrica convencional b) esquema de ingreso de fuentes renovables | 27 |
| Figura 9. Metodología de la investigación..... | 29 |
| Figura 10. Ubicación geográfica de la parroquia Pucayacu..... | 32 |
| Figura 11. Perfil de carga promedio anual | 33 |
| Figura 12. Diagrama esquemático de la Micro generación Distribuida..... | 35 |
| Figura 13. Esquema de variación de la potencia instalada por horas en el día..... | 37 |
| Figura 14. Esquema de carga en el año..... | 38 |
| Figura 15. Análisis de las curvas medidas y adquiridas en la página de la NASA40 | |
| Figura 16. a) Medición de la radiación solar, voltaje generado corriente..... | 40 |
| Figura 17. Modelo de circuito equivalente de una celda fotovoltaica | 42 |
| Figura 18. Curva de I-V y V-W de una celda solar | 42 |
| Figura 19. Variación del caudal del recurso hídrico m/s un año..... | 51 |
| Figura 20. Marco metodológico..... | 52 |
| Figura 21. Escenario I de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso..... | 57 |
| Figura 22. Escenario II de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Escenario I de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso..... | 58 |
| Figura 24. Escenario II de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso..... | 59 |
| Figura 25. Participación de las diferentes tecnologías de generación..... | 61 |
| Figura 26. (a)(b) Porcentaje de participación por tecnología para suplir la demanda..... | 62 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos | 5 |
| Tabla 2 Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica..... | 21 |
| Tabla 3 Consumos eléctricos promedio unifamiliar | 33 |
| Tabla 4 Consumo esperado emergente por día y emanación de partículas de CO2 | 34 |
| Tabla 5 Valores de Radiación solar medidor por el equipo Solar Power Meter SM206..... | 39 |
| Tabla 6 Datos de placa del panel fotovoltaico | 41 |
| Tabla 7 Comparación entre métodos | 43 |
| Tabla 8 Costos del kWh de potencia máxima..... | 54 |
| Tabla 9 Costo por análisis de equipos..... | 55 |
| Tabla 10 Resultados de la planificación de los recursos energéticos distribuidos. | 56 |
| Tabla 11 Resultados de la operación..... | 56 |
| Tabla 12 Planificación de generación FV de 11 kW..... | 60 |
| Tabla 13 Aporte de potencia por equipo | 61 |
| Tabla 14 Distribución de potencia entregada por cada tecnología | 62 |

INTRODUCCIÓN

(Miguel S., 2022) en su artículo propone un marco metodológico práctico para la planificación óptima de una microrred rural aislada considerando los recursos de energía distribuida (DER) como los sistemas fotovoltaicos (PV), los sistemas microhidroeléctricos (MH) de pasada, el almacenamiento de energía en baterías (BESS) para el suministro de energía a microrredes rurales aisladas. La metodología considera la formulación de un problema de optimización estocástica (SOP) considerando una ecuación de enteros mixtos. Además, para estimar la curva de carga de la demanda diaria de la comunidad rural se utiliza el clasificador de hogares basado en el método Self-Organizing Map (SOM), el cual proporciona patrones de demanda utilizando las características socioeconómicas de la comunidad en una encuesta. La metodología se aplica en una comunidad ubicada a orillas del río Aguarico. En horas nocturnas es necesario una unidad GGS para suministrar energía durante las horas de mayor demanda en los meses donde las fuentes hidroeléctricas no están disponibles, demostrando la efectividad de la metodología propuesta.

Los sistemas fotovoltaicos como sistemas distribuidos conectado a la red de distribución ayudaran a mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico, por ende, alivian a los alimentadores y como caso de estudio el alimentador A4401 de la subestación Chupaca 2021.

(D. Arango, 2017) formula un modelo de optimización para gestionar y regular el voltaje en micro redes de distribución con Generación Distribuida (GD) y Almacenamiento de Energía (AE).

El modelo se plantea de manera general, para una micro red de “N” barras, donde en la barra 1 (Slack) se conecta un generador equivalente aguas arriba hacia la red de distribución; en todas las demás barras se puede conectar GD y AE. El periodo de simulación/optimización del modelo y la frecuencia de muestreo puede ser variado, sin embargo, se recomienda 24 horas para la simulación con una frecuencia de muestreo cada hora.

Un modelo de planeación para despliegue de los sistemas aéreos de distribución eléctrica, el cual permita bajo criterios heurísticos y de optimización reducir los costos asociados a los recursos empleados en la construcción de la red; muestra un despliegue óptimo de transformadores de distribución considerando restricciones técnicas y de capacidad. Se advierte que el modelo presenta un enrutamiento sobre un escenario georreferenciado con información obtenida de la plataforma OpenStreetMap, con el propósito de que la topología de la red sea bajo condiciones reales y de diseño de una ciudad; por otro lado, se hace uso del árbol mínimo de Steiner para el emplazamiento de la red aérea de distribución. Adicionalmente el modelo adjunta los principios de escalabilidad y flexibilidad, ajustando los resultados a las variaciones en distintos escenarios. (G.Arguello, 2018)

Las micro redes aisladas, formada específicamente por fuentes de generación eólica, solar, hidráulica con sistemas de almacenamiento (baterías) y por un grupo electrógeno (diésel) establece una metodología basada en programación dinámica probabilística (PDP), la cual permite un estudio estocástico de los recursos renovables, la respuesta a la demanda (RD) y el impacto económico que presenta. El modelo de programación tiene como función objetivo minimizar los costos de energía sujeta a sus restricciones de disponibilidad del recurso eólico y fotovoltaico, que permitan cubrir una demanda diaria. Presenta el árbol de escenario encargado de optimizar costos, basados en los datos de entrada que corresponden a la aleatoriedad del recurso a utilizarse. Los resultados de simulación de la micro red bajo tres escenarios, logrando un despacho económico de las unidades de generación al menor costo de producción de energía.

Si se analiza el potencial de los recursos energéticos se podrá aplicar un algoritmo de optimización para la planificación en la instalación y operación de una Microred Distribuida.

Antecedentes:

El proyecto propuesto se ubica en la línea específica de investigación de la Universidad Técnica de Cotopaxi relativo a la maestría en Electricidad: energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental y la sub

línea: conversión y uso racional de la energía eléctrica; donde las fuentes de generación renovable han ido expandiendo a través de los años en todo el mundo, la microgeneración se ha convertido en un modelo energético convencional, siendo la energía fotovoltaica la primera fuente de generación eléctrica, usada en varios hogares, edificios y empresas.

Con el desarrollo de la generación distribuida las poblaciones que se encuentran lejanas a las redes de suministro de energía podrán ser electrificadas con estos medios con el propósito de mejorar las condiciones de vida de sus habitantes, aprovechando los recursos de la localidad y haciendo uso de generadores renovables, no obstante en países en vías de desarrollo, invade el concepto de que su aplicación no es factible, debido a los altos costos de implementación, las variantes naturales que implican el despacho económico y sobre todo control de estos sistemas.

Planteamiento del problema.

El sector de Pucayacu es una Parroquia del Cantón la Maná en la provincia de Cotopaxi cuya geografía no ha permitido que exista un desarrollo en el crecimiento de carreteras y mejoramiento en el desarrollo eléctrico a un sistema más confiable y resiliente frente a circunstancias climáticas o naturales, tanto así que el desbordamiento de los ríos Quindigua, Pilaló y San Pablo el domingo 30 de enero del 2022 afectó gran cantidad del sistema eléctrico de sub transmisión y distribución quedándose el cantón sin abastecimiento de energía eléctrica y la incomunicación de albergues, centro de salud, unidad educativa sin existir un sistema eléctrico alternativo a la misma. Adicional a desbordamiento de los ríos también se considera la destrucción del puente de ingreso a la parroquia lo que dificultó más aún más los trabajos de operación y mantenimiento de la empresa eléctrica.

Este evento natural afectó a los 2400 habitantes, el desabastecimiento de la energía eléctrica provocó la incomunicación, daños en las reservas de alimentos, un pueblo con varias noches en vela y sin albergues con energía eléctrica para atención de emergencia. Es por ello que es necesario realizar un estudio de planificación de los recursos energéticos que pueden aportar al abastecimiento de energía eléctrica a la parroquia Pucayacu que pueda ayudar a servir como sistema alternativo ante el continuo

desabastecimiento de energía eléctrica, tomando en consideración un sistema de microgeneración distribuida con recursos de energía hidráulica, solar, baterías (BESS) y un sistema térmico.

Formulación del problema.

En consideración de mejorar las condiciones de abastecimiento de energía eléctrica es necesario tener un estudio preliminar que permita planificar los recursos energéticos como un sistema alterno en caso de emergencia

General:

Planificar la operación de los recursos energéticos de una microred distribuida mediante la aplicación de un algoritmo de optimización para obtener un sistema eléctrico de distribución confiable.

Específicos:

- Realizar una investigación bibliográfica para determinar conceptos que se van a ser aplicados en el estudio.
- Adquirir datos de los recursos energéticos que van a ser parte de la microred distribuida.
- Elaborar un algoritmo de optimización para el análisis mediante la aplicación de enteros mixtos.
- Realizar la validación del método aplicado mediante análisis comparativo y bibliográfico.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Tabla 1 Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos

| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | ACTIVIDAD (TAREAS) | RESULTADO DE LA ACTIVIDAD | MEDIO DE VERIFICACIÓN (TÉCNICAS E INSTRUMENTOS) |
|--|---|---|--|
| Realizar una investigación bibliográfica para determinar conceptos que se van a ser aplicados en el estudio. | Investigación bibliográfica mediante libros, publicaciones relevantes dentro de la generación distribuida. | - Fundamentación técnica-científica para el desarrollo de las variables que intervengan en la planificación de los recursos energéticos de la red- distribuida. - Aplicar una metodología de desarrollo de la investigación. | Investigación de Campo. Investigación Bibliográfica. Sistematización de la información. |
| Adquirir datos de los recursos energéticos que van a ser parte de la microrred distribuida. | - Recolección de datos de la demanda energética emergente. - Recolección de datos de potencial solar. - Estudio de potencial energético Hidráulico. - Tabulación de datos. | - Obtener una curva de demanda energética. - Curva del potencial solar y las condiciones de temperatura. - Potencial hídrico en base a la altura y caudal. - Tablas de los recursos energéticos variables en el tiempo diario y anual. | Investigación de Campo. Tabulación de datos. |
| Elaborar un algoritmo de optimización para el análisis mediante la aplicación de enteros mixtos | Análisis de posibles algoritmos de optimización. | Aplicación del algoritmo lineal de enteros mixtos | Investigación Experimental. Diagramas de frecuencias. |
| Realizar la validación del método aplicado mediante análisis comparativo y bibliográfico. | Validar los resultados y verificación de la variable. | Verificación mediante fichas bibliográficas de la aplicación del algoritmo. | Diagramas eléctricos. Diagramas de recursos energéticos planificados. Análisis Económicos de implementación y operación. |

Elaborado por: Autor

Justificación.

La Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi suministra el servicio de electricidad a 127.600 clientes registrados hasta diciembre de 2016, siendo estos clientes residenciales, comerciales e industriales, distribuidos en un área de concesión de 5880.00 [km²] que comprende la provincia de Cotopaxi (Mullo & Javier, 2017). La energía eléctrica es un recurso fundamental para el desarrollo social que también permite el equilibrio natural (Correa & Rojas, 2017), al ser un recurso importante para los sectores sociales y económicos por su aplicación en el alumbrado, calefacción, tecnologías de la información, telecomunicaciones, en la salud y demás procesos industriales del mundo moderno (Fenercom, 2009). En la actualidad dentro del área de concesión de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A. existen sectores alejados que por su geografía ante una emergencia eléctrica no permite un tiempo de respuesta inmediata y tomando en consideración que el equipo de abastecimiento eléctrico emergente es generación térmica teniendo el mismo un limitante en el almacenamiento de combustible y la emanación de CO₂. En la actualidad para suplir necesidades de energía eléctrica existe la utilización de generación distribuida (GD) que aprovecha los recursos naturales del entorno las mismas que se convierten en un camino viable para el abastecimiento eléctrico, las producciones de electricidad en instalaciones relativamente pequeñas resultan ser suficientes en relación a grandes centrales conectadas en un mismo sistema eléctrico en un área mediante puntos de conexión común (IEEE Std 1547.2, 2003) (Velásquez-Lozano, Aguirre-Velasco, 2021).

Hipótesis

Si se analiza el potencial de los recursos energéticos se podrá aplicar un algoritmo de optimización para la planificación en la instalación y operación de una Microred Distribuida.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El crecimiento del consumo eléctrico en zonas rurales ha generado una gran preocupación dentro las empresas eléctricas distribuidoras ya que esto cambia la planificación de reforzamiento de las redes de sub transmisión que sean más resiliente ante las adversidades atmosféricas, climáticas y desastres naturales que se puedan ejecutarse en determinado momento inesperado y adicionalmente el tiempo de respuesta en zonas alejadas o inaccesibles de maquinaria resulta prolongado el tiempo de respuesta, por ende las empresas distribuidoras deben tener un plan de respuesta inmediata para que las zonas no se queden sin servicio eléctrico y todos los problemas que conlleva esta circunstancia como la falta de comunicación, salud , atención emergente, iluminación; etc.

1.1 Antecedentes de la investigación

El crecimiento de los sistemas eléctricos son alimentados por sistemas de GD, por lo que existe un interes a nivel mundial y local por diversificar la matriz energetica que incentiva al uso de energía solar, eolica e hidraulica que funcionan como un sistema electrico único diseñado para satirfacen la demanda de de una zona o vivieda, con esto también ayuda a reducir el impacto al medio ambiente minimizando el uso de generadores de combustion interna (Parekh, 2012) (Hammons T.J, 2007). En el Ecuador cerca del 2.67% aun no disponene de energía eléctrica en vista que las comunidades se encuentran alejadas y dispersos por su zona geografica distantes de las ciudades centrales o de un sistema electrico de transmisión, por ende el costo tanto en la operación, mantenimiento y restauracion de energia resulta costosa y con daños irreversibles, por ende un sistema de GD coordina fuentes de energia de acuerdo a la necesidad de la frecuencia de carga ("Plan Maestro de Electricidad", 2020) (R. Palma-Behnke, 2012). El Ecuador por su diversidad y de manera especial la provincia de Cotopaxi posee un diversidad en

sus recursos renovables las misma que actuan de acuerdo a las condiciones climáticas y estaciones del año por ende resulta importante analizar una predicción de la planificacion de los sistemas energeticos que forman parte de la GD y su impacto de podría derivar de la conexión de esta forma de tecnología tomando en consideración su ubicación geográfica, tecnología modelación y nivel de penetración, asi como tambien las características del alimentador de distribución (Katiraei & Arguello, 2021), tomando en consideracion que los sistemas electricos de transmisión existentes fueron diseñados sin la penetración de GD.

Una micro red se puede definir como una red eléctrica local con la capacidad de controlar la conexión con la red de la energía convencional o de otra red y funcionar de forma autónoma. Igualmente se desea que la red sea capaz de manejar los flujos de energía con otras redes de forma bidireccional, es decir que pueda entregar o recibir flujos de energía de acuerdo con determinadas condiciones de demanda, generación, estados de contingencia, entre otros. (J.Jamaica, 2019)

Ángela Patricia Clavijo Reyes en su trabajo de titulación manifiesta que la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica, son procesos que se realizan a diario que permiten el avance y la sostenibilidad de las ciudades actuales, que responden a la demanda de energía que crece día a día con los avances tecnológicos y con el crecimiento de la población, lo que hace necesario encontrar nuevas formas de generación que no afecten el medio ambiente y que constituyan una fuente inagotable de recursos. Presentándose así diversos desafíos al utilizar las energías renovables como es el despacho de estas unidades, teniendo en cuenta los aspectos técnicos y comerciales de cada generador para poder entregar energía mediante una planeación periódica. Lo cual permite analizar el concepto de micro red eléctrica, en la cual se integran los generadores y los consumidores en estaciones cercanas, presentado así diversos beneficios como es la Disminución de pérdidas de potencia en la red de distribución, Mejora la capacidad de la red, Regulación de voltaje y frecuencia, Reducción las emisiones de CO₂ y la mejora de la operación y control del sistema. Para lo cual en el trabajo se plantea modelar y simular el despacho de energía eléctrica en una micro red mediante un problema de

optimización de costos tal que se maximice la utilidad total de la red. (A.Clavijo, 2015)

En el trabajo de investigación “Despacho económico en micro redes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales” establece una metodología para determinar el despacho económico de los recursos energéticos mediante un algoritmo lineal los mismos que determina resultados de despachos usando algoritmos de predicción lineal para determinar una planificación en la operación y al validarlo los resultados son bastante similares a los obtenidos con el flujo de potencia óptimo de Matpower, en las diferentes horas de análisis, con la ventaja de que el método utilizado respecto al de Matpower se ahorra el tiempo de simular el flujo de potencia final. Aunque estos tiempos no son apreciables para sistemas como el que se analizó si puede ser significativo cuando se analicen sistemas con mayor penetración de energías renovables o con más nodos. (D.Arango, 2017.)

Gissela Belén Arguello Escobar en su trabajo de titulación denominado “Óptima Respuesta a la Demanda y Despacho Económico de Energía Eléctrica en Micro Redes basados en Árboles de Decisión Estocástica” lo cual sus estudios de predicción en la planificación de la microrred se enfoca en la toma de decisiones rápidas mediante redes neuronales y la formulación de un pseudocódigo que permite obtener respuestas que luego tienen que ser validadas mediante una matriz de confusión, los resultados demuestran la eficacia de la aplicación de un modelo basado en árboles de escenarios en el pronóstico de costos de operación de generación de los recursos energéticos, cuya planificación óptima se enmarca en base al análisis de resultados y se concluye que todos los escenarios cumple con las mejores condiciones técnicas y económicas en la instalación y operación, para el abastecimiento de una máxima, intermedia y mínima demanda, con una potencia de instalación de 245 MW compuesta por 5 generadores fotovoltaicos 2 de ellos con baterías, 5 generadores eólicas, 2 hidráulicos y 2 térmicos. . (G.Arguello, 2018)

La investigadora Ángela Clavijo Reyes en su investigación “Despacho económico de una red de energía eléctrica”. Establece un algoritmo de planificación de los recursos energéticos renovables con restricciones en los costos de operación obteniendo como resultado una demanda optima dentro de costos, establece un algoritmo lineal que ingresan los valores estocásticos de viento, solar e hídrico, cuyo balance de potencia se mantiene con un error del 5% nodos consumidores y generadores funciona correctamente entregando a la carga, la potencia que demanda durante los 24 intervalos, suministrando la potencia esperada. En estos resultados no se tuvo en cuenta la temperatura del panel ya que no se tenían valores de referencia para ingresar durante las 24 horas, profundización plantea un modelo de optimización basado en teoría de juegos que se conoce como replicator dynamics, utilizado en sistemas distribuidos de energía ya que se caracteriza por utilizar todos los recursos disponibles y llegar a un equilibrio en el cual ninguna otra respuesta habría tenido mejor desempeño, la razón de implementar este tipo de sistemas es que ha sido investigado ampliamente en los últimos años y ha dado soluciones favorables con sus resultados. (Á. P. Clavijo Reyes, 2015)

En el trabajo de investigación realizado por Victor Alozo Villa & Alexander Aguilla con el tema “Optima gestión y regulación de voltaje en microredes de distribución con generación distribuida y almacenamiento de energía” plantea un problema de este estudio en gestionar y regular los niveles de voltaje en una microred distribuida y almacenamiento de energía conectado a todas las barras menos la Slack de las que se puede destacar una planificación, Por otro lado, la optimización y gestión se realiza al cargar las baterías en las horas cuando el costo de la energía es menor, el pseudocódigo plantea una metodología de solución y el algoritmo que puede ser implementado en cualquier software de programación de análisis . (V.Alonzo&A.Aguila, 2018)

1.2 Fundamentación Teórica

1.2.1 Microgeneración Distribuida.

Una microred se considera a la integración de varias fuentes de energía que cumplen el propósito de operar de acuerdo a una planificación óptima y dependerá de las limitaciones o restricciones que el sistema de funcionamiento eléctrico lo requiera. La generación distribuida o descentralizada es una parte fundamental en una Smart City. Consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación que se instalan cerca de los puntos de consumo. La generación distribuida se basa en la cooperación entre esta microgeneración y la generación de las centrales convencionales. (Balaguera & A. Cortes, 2012) (P. Zervas, 2008).

El funcionamiento de una red distribuida se basa en las fuentes de generación que se encuentran disponibles, el análisis del escenario que va a ser abastecido es decir su perfil de carga, los escenarios estocásticos de la variación de los recursos. La micro red tiene su característica especial de que puede abastecer de manera aislada o conectada a la red cuando existe excedentes de energía generada a un área específica como puede ser una comunidad aislada. (Vercelli, 2012)

A nivel mundial existen países que mantienen políticas de impulso económico y promueven políticas de incentivos a las redes distribuidas para que exista un incremento tecnológico con las ventajas sociales y ambientales que con ello se obtiene. (Vercelli, 2012)

1.2.2 Características micro generación distribuida

a) Mejorar la fiabilidad y sustentabilidad del sistema eléctrico

Ayuda a mantener un sistema eléctrico con un nivel de confianza estable ya que al poseer varias fuentes de generación eléctrica es flexible a que cuando una de estas falle el sistema se reincorpore de manera inmediata con una limitación en la potencia máxima generada o a su vez sea suplida de manera emergente.

b) Reducir las pérdidas en la red eléctrica.

Las redes distribuidas se gestionan los recursos para que mantengan un despacho de acuerdo al perfil de carga en el lugar exacto donde se requiera no son para transporte lejano evitando de esta forma efectos eléctricos como pérdidas de corriente, calentamiento, efectos electromagnéticos, etc.

c) Potencias reducidas

Por lo general las micro redes distribuidas son de baja potencia que oscilan entre los 3KV hasta los 50KW, aunque dependiendo de los recursos energéticos pueden llegar a los 500KW el sistema apoya a la red eléctrica convencional cuando existe un excedente de generación.

d) Energías renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene a partir de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales para la moderación de la extracción de minería de fluidos gases y fósil. La energía se obtiene mediante aerogeneradores que aprovechan la energía cinética del viento transformándola en energía eléctrica. Este recurso puede calificarse como perpetuo, y la cantidad potencialmente obtenible en una zona geográfica concreta depende del régimen de vientos y de la orografía del lugar.

1.2.3 Esquema general de la microgeneración distribuida.

Dependiendo del recurso energético que se esté utilizando se podrá cuantificar la energía generada ya sean estas fuentes solares, eólicas o hidráulicas las cuales son variables en tiempo, dependiendo directamente del día, estación y factores climáticos. De acuerdo con la demanda energética se puede tener tipos de respaldos en la generación para tener energía eléctrica de una manera más eficaz un esquema general de microgeneración distribuida donde se encuentran los distintos tipos de microgeneración (fotovoltaico, eólico, entre otros.), como se muestra en la figura 1. (Energy-VM, 2020)

La generación distribuida se la puede aprovechar para satisfacer la demanda en horas pico, que sirva como respaldo ante eventualidades naturales o catastróficas, caídas del sistema eléctrico, en lugares distantes se la puede usar como fuente de generación unidas entre varias micro generaciones hasta armar una MicroGrid, como se aprecia en la figura 1.

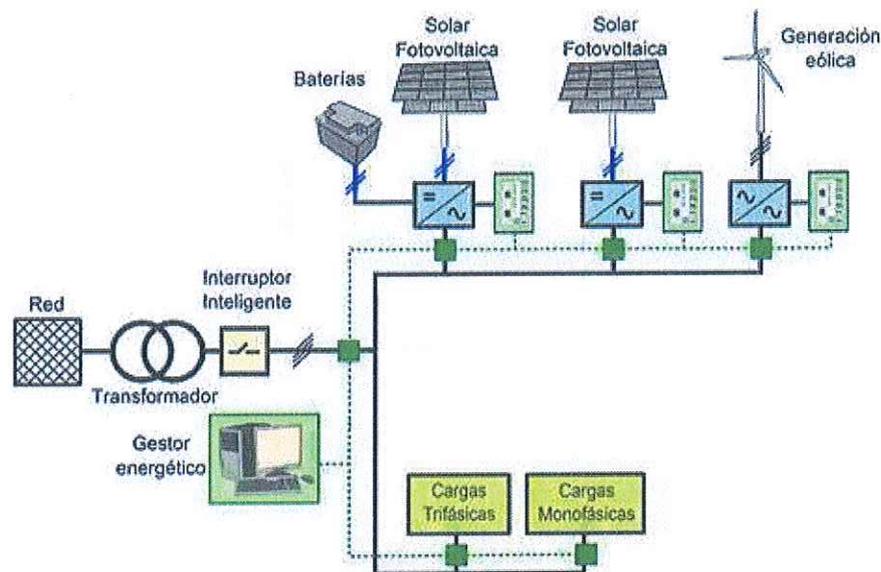


Figura 1. Esquema general de la microgeneración distribuida

Existen dos tipos de sistemas en la microgeneración que son:

- Los sistemas aislados
- Los sistemas conectados a la red.

a) Microgeneración distribuida de un sistema aislado

Para un sistema aislado, la energía generada será para autoconsumo, debido a que no requiere puntos de interconexión con la red principal y no hay manera de que esta sea transmitida a otro punto. (Energya-VM, 2020)

Usualmente los sistemas aislados constan de baterías, que al momento de estar totalmente cargadas entregan energía de acuerdo a su capacidad en los momentos que la fuente renovable no esté disponible en la cantidad necesaria. Un esquema básico de microgeneración distribuida aislada puede tener las siguientes, como se aprecia en la figura 2.

1. Controlador de carga
2. Banco de baterías
3. Inversor de corriente
4. Punto de consumo (electrodomésticos, entre otros)

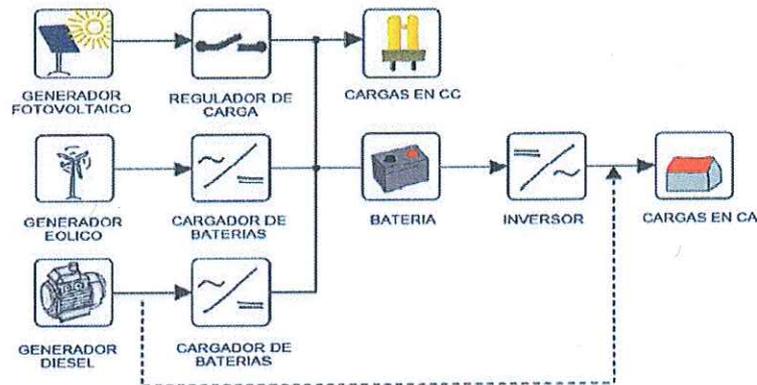


Figura 2. Esquema general de microgeneración distribuida asilada

b) Microgeneración distribuida de un sistema conectado a red

Para un sistema conectado a red, se tiene un micro generador que será utilizado en forma de autoconsumo, y a su vez tiene conexión a la red eléctrica, en este tipo de sistemas no es necesario utilizar baterías como acumulación de energía, ya que cuando no se está generando se puede utilizar energía de la red eléctrica.

Para la microgeneración conectada a red los sistemas combinados con generación fotovoltaica y generación eólica han sido utilizados con éxito a fin de disponer de energía eléctrica las 24 horas del día de un modo eficaz, y si se desea puede recurrirse también a un respaldo con un generador a combustible.

La microgeneración distribuida conectada a red tiene los siguientes componentes:
Ver figura 3.

1. Inversor de Corriente
2. Punto de Consumo (Electrodomésticos, entre otros.)
3. Red Eléctrica

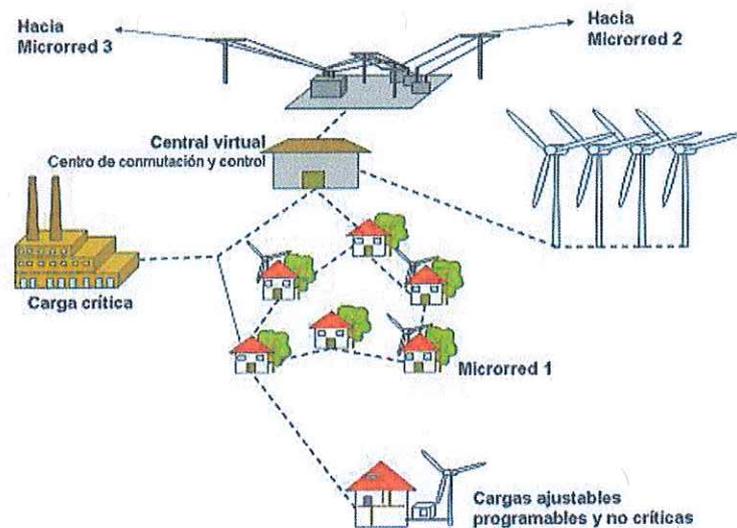


Figura 3. Esquema general de microgeneración distribuida conectada a red

1.3 Micro redes eléctricas

Las Micro-redes son un tema de alto interés debido a su potencial para lograr una infraestructura eléctrica confiable. El enfoque de los estudios incluye ser un medio de contingencia durante eventos catastróficos, debido a la habilidad de una microrred para ser funcional tanto conectada a la red principal como en forma de isla independiente con sus propias fuentes de energía limpia de generación distribuida. (J.Morejon, 2018)

La micro red permite una coordinación exitosa entre los Sistemas de Generación Distribuida como se aprecia en la figura 4 los componentes que pueden aportar a la generacon, al incluir de forma integrada generacion distribuida, cargas locales y sistemas de almacenamiento. En una Micro-red inteligente, cada carga y generador deberá poder ser controlado, por tanto, cada actor de la red deberá participar activamente en un ambiente desregulado donde los usuarios finales puedan participar en el comercio de la energía, recibiendo y entregando energía según su necesidad. (J.Morejon, 2018)

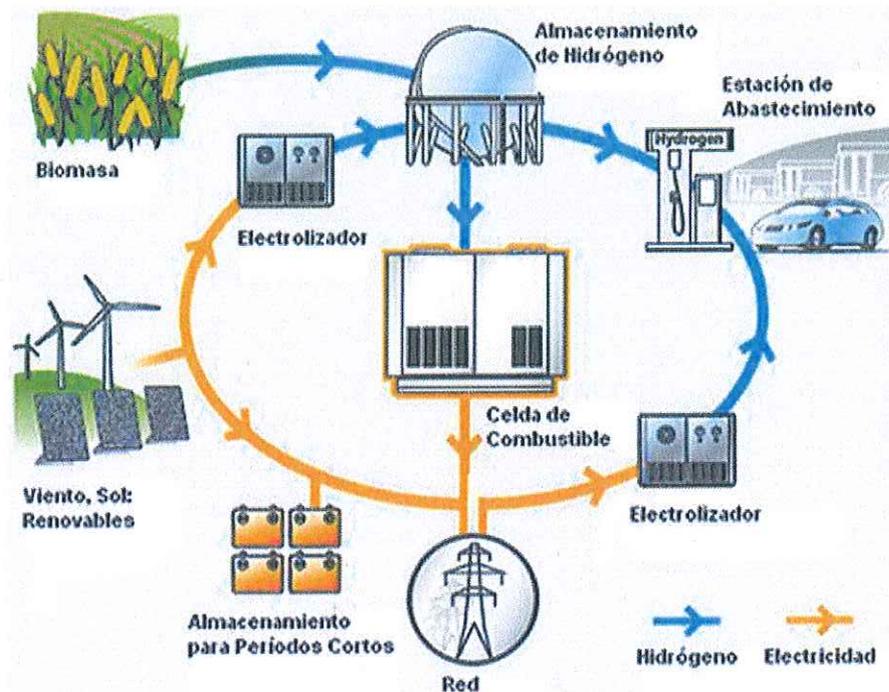


Figura 4. Ejemplo de micro red

1.3.1 Cómo funcionan las micro redes

La red eléctrica general conecta nuestros hogares, negocios y otros edificios con las grandes centrales generadoras de energía. Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo, precisamente como se hacía en los albores de la industria eléctrica, incorporando ahora las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de electricidad. A esta modalidad de generación eléctrica se le conoce como generación in-situ, generación dispersa, o más comúnmente, generación distribuida. En la mayoría de los casos, un aspecto necesario en la GD es la interconexión con la red eléctrica, para poder cubrir cualquier eventualidad del sistema de compra o venta de energía eléctrica. Algunos de los aspectos técnicos a considerar en la interconexión son: (J.Jamaica, 2019)

- Relevadores de protección
- Conexión del transformador
- Sistema de puesta a tierra
- Coordinación de protecciones y regulación de la tensión de la compañía

- Equipos de calidad de servicio
- Conformidad con normas de los convertidores de potencia
- Monitoreo y control remoto del grupo
- Mantenimiento preventivo y correctivo periódico
- Sistema de comunicación entre el operador privado y el controlador de la red de distribución.

Todo depende también de cuál es la forma en la que se alimentan las micro redes. Estas pueden recibir energía de paneles solares, baterías o generadores distribuidos. Dependiendo de cómo se gestione, una micro red puede funcionar de manera indefinida y limpia, por ejemplo, si se alimenta con renovables. (Energy-VM, 2020)

1.3.2 Estructura y elementos de una Micro red

Existen diferentes arquitecturas de microrredes y enfoques de gestión. Por lo que es necesario explorar los conceptos de arquitectura y proporcionar un análisis detallado para tener un escenario completo para un posterior diseño de las microrredes, en la figura 5 muestra la arquitectura base de la microrred donde básicamente se observa que son sistemas interconectados que consisten en módulos de control central de la microrred, control de las fuentes de generación distribuida, control de las cargas, medios de almacenamiento de energía y comunicación. Una microrred es un sistema integrado en el que las fuentes de energía distribuida forman una red que proporciona de energía eléctrica a un número variable de cargas distribuidas. Ambos elementos constituyen la mayor parte de la microrred, pero también se considera como recurso energético distribuido a los esquemas de acumulación de energía siendo un importante complemento para las fuentes renovables, y estos sistemas requieren además de otras infraestructuras que se puntualizan a continuación. (M.Ruiz, 2022)

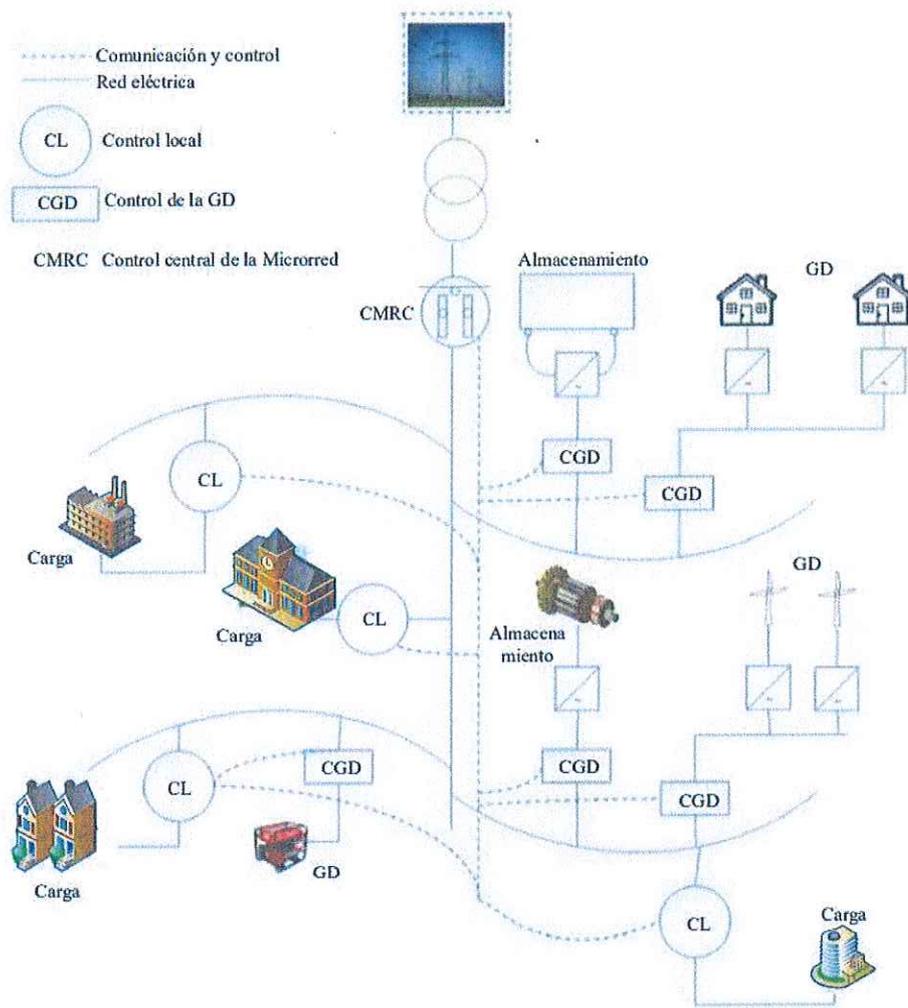


Figura 5. Estructura general de una microrred (A.S.Carvalho, 2013)

1.4 Micro red conectada a la red

En esta situación no es necesario que toda la energía demandada por las cargas sea producida por los generadores de la micro red ya que el desfase entre generación y consumo será cubierto por la energía que fluye a través del punto de conexión. La micro red podrá ser vista como un pequeño generador o como una carga en función de si la generación es mayor o menor que la energía demandada por las cargas. Cuando la micro red trabaja conectada a la red de distribución, el sistema de control tiene como objetivo la disminución de coste de la energía para los consumidores que están asociados a ella.

Usa la generación local cuando es económicamente rentable, disminuyendo la cantidad de energía que toma de la red.

Desde el punto de vista de la red de distribución, el comportamiento es el adecuado ya que tiende a aplanar la curva de demanda. Esto es debido a que, en momentos de elevado consumo, cuando el precio de la energía es mayor, la micro red tiende a autoabastecerse disminuyendo la energía que toma de la red de distribución. (Z.Li & C.Zang, 2016)

a) Micro red aislada

Una de las ventajas más importantes de la implantación de la generación distribuida y la agrupación de pequeños generadores y cargas es la posibilidad de limitar la afectación a los clientes ante un fallo en la red de transporte o distribución. Como se ha comentado, una micro red estará habitualmente (modo normal de operación) conectada a la red de distribución. Sin embargo, ante un fallo en esta red, es posible pasar al modo de emergencia en que la micro red se desconecta, pasando a trabajar de forma autónoma.

Una vez detectado un problema en la red de distribución, se tratará siempre de que la desconexión se realice de la forma más transparente posible para las cargas conectadas. Si no es posible aislar la micro red con éxito y el suministro queda afectado, se pone en marcha un procedimiento automático con el objetivo de restaurar el servicio de forma independiente de la red de distribución. Una vez la red de distribución vuelva a estar operativa el sistema que conforma la micro red procederá a sincronizarse con ella para a continuación volver al modo normal de operación. Como se aprecia en la figura 6 (Z.Li & C.Zang, 2016)

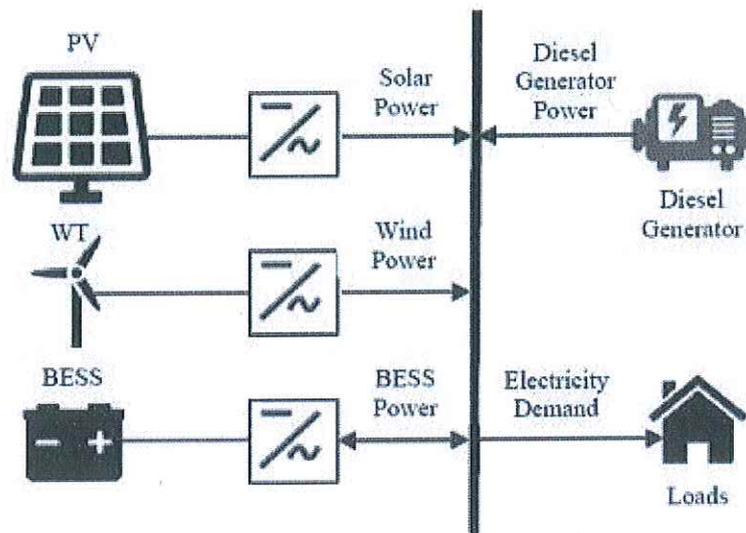


Figura 6. Diagrama de una Micro red con base ERNC (Awinburn, 2021)

1.4.1 Ventajas de las micro redes

- Sintetizando, las ventajas de las micro redes, estas facilitarían:
- Seguir funcionando cuando la red principal no lo hace.
- Permitir la generación de energía en caso de desastre, de manera que hospitales o servicios de emergencia puedan seguir operando.
- Reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático, además de reducir las emisiones contaminantes directas.
- Producir energía eficiente y a bajo coste.
- Producir esa energía con una capacidad de respuesta dinámica que no tenía precedente hasta ahora.
- Mejorar el funcionamiento y la estabilidad de la red eléctrica general. La generación y distribución de energía es más segura, robusta y optimizada.
- Aumentar la resiliencia local. Esto significa que las comunidades locales conectadas a micro redes tienen un mejor servicio eléctrico, además de que otras zonas, donde es muy difícil llevar la energía o la red general con calidad, pueden tener acceso a electricidad con una micro red. (Energy-VM, 2020)

1.5 Energía Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se considera una tecnología que permite la generación de corriente directa, por medio de conductores mediante la iluminación por un haz de fotones, cuando la radiación es reflejada en la célula solar (elemento individual solar fotovoltaico), genera potencia eléctrica que puede ser medida en vatios o kilovatios; cuando la radiación desaparece las células solares dejan de generar energía eléctrica. (F. I. Ávila Swinburn, 2013)

En la tabla 2 se puede observar detalladamente varias ventajas y desventajas en la parte técnica y no técnica de la energía solar fotovoltaica.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Limpia, renovable, infinita, silenciosa | Gran inversión inicial |
| Retribuida económicamente la producción para venta a red | Proceso de fabricación de módulos complejos |
| Subvenciones | No competitiva con otras energías en la actualidad |
| Sin partes móviles y modular | Producción variable según climatología y época del año |

1.5.2 Sistemas de almacenamiento de energía

Las unidades de almacenamiento de energía desempeñan su función como cargas en el sistema ya que incorporan energía de la micro red. Los generadores son considerados como elementos de almacenamiento, ya que pueden transferir la energía almacenada al sistema y así aportar a satisfacer la demanda. Son objeto de estudio debido a la baja capacidad que tenemos actualmente. Se consideran sistemas de almacenamiento a los supercondensadores, las baterías químicas, almacenaje de aire comprimido y la batería inercial. (H. Rudnick Van De Wyngard, 2010)

a) Batería de Ion – Litio

Es de una nueva tecnología, la cual ofrece una densidad de energía de 3 veces la de una batería plomo-ácido. Esta gran mejora viene dada por su bajo peso atómico 6,9 vs 209 para la de plomo. Además, cuenta con un voltaje por celda de 3.5 [V], lo

cual disminuye el número de celdas en serie para alcanzar cierto voltaje, reduciendo su costo de manufactura.

b) Características de las baterías Ion - Litio

Mínima tasa de autodescarga.

Rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión.

Requieren en su configuración como producto de consumo.

La inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones. (Z. J., 2015)

1.5.2 Demanda Eléctrica en micro redes

La demanda eléctrica cumple un rol importante en la optimización de los sistemas eléctricos, a través de las predicciones de ésta se puede predecir la generación requerida para compensar un consumo planeado. Ésta corresponde a la potencia presente en los terminales de un sistema promedio en un intervalo específico de tiempo. La generación instalada debe ser capaz de ejecutar con la demanda máxima, variante a lo largo del año en los días de cada mes, del mismo modo tendrá la condición suficiente para hacer frente a las dificultades en la generación y aumentos imprevistos en la demanda. (M. Vergara, 2022)

1.5.3 Despacho económico

En el despacho económico se establece de una forma óptima los recursos de generación eléctrica para satisfacer la demanda de un SEP al menor costo posible, tomando en cuenta insumo como la disponibilidad de generación, parámetros de la demanda y restricciones. Este es un proceso indispensable para cualquier mercado eléctrico porque permite realizar una adecuada utilización de sus recursos energéticos. (F. I. Ávila Swinburn, 2013)

El problema de despacho económico es uno de los desafíos que se presentan en la operación de sistemas de potencia. Se trata como un problema de optimización donde el objetivo es reducir los costos totales de generación satisfaciendo las restricciones.

Es una tarea que debe efectuarse a diario en las estaciones generadoras, tomando a consideración los costos de operación y las limitaciones técnicas de cada uno de los generadores en periodos determinados, los datos de entrada se modificaran de forma versátil y el optimizador debe reaccionar de la mejor manera ante las condiciones de la demanda.

1.6 Modelos de optimización

Para optimizar el despacho económico de una micro red distribuida , es necesario plantear un algoritmo de solución. (M.G., 2021)

1.6.1 Programación Lineal Entera Mixta (PEM)

Es una forma de expresión de los modelos de programación lineal, constituye de varios algoritmos complejos para su solución, esto conlleva varios tipos de ventajas, como la utilización de variables naturales binarias o enteras en todos los modelos.

Empleando variables enteras mixtas, ayuda el manejar modelos de programación lineal, una serie de parámetros y elementos que se utilizan al ser aplicadas en una gran variedad de problemas, son mediciones exactas generadas en campo o prácticas de laboratorio. (M.G., 2021)

El objetivo de implementar un PEM en una MR, es la capacidad de mejorar la acción rápida de la generación de energía y el abastecimiento de la demanda, de una manera confiable en todo el sistema.

Un sistema de gestión de energía debe tener la condición de reunir toda la información requerida, para ser resuelta de forma óptima, segura y que tenga la capacidad de comunicarse con cada uno de los elementos, para una correcta distribución de energía. Para garantizar la estabilidad de una MR y tener la capacidad de diferenciar modos de operación, tomando como principal dato de variación la potencia de salida, ya que existe una desviación entre la potencia instantánea y la potencia nominal. (M.G., 2021)

1.6.1 Tipos de algoritmos

Al hablar de algoritmos es necesario diferenciar entre algoritmos deterministas y algoritmos no deterministas. Un algoritmo es determinista si en un conjunto de

problemas, todas las ejecuciones del algoritmo producen el mismo resultado final (y, además, todos los resultados intermedios también son iguales). Un algoritmo no es determinista si se introduce algo de aleatoriedad en el proceso de encontrar la solución y por lo tanto los resultados finales e intermedios no tienen por qué coincidir. (W., 2007) (Awinburn, 2021)

Al resolver problemas de optimización en respuesta a la “precisión”, damos la siguiente clasificación:

- **Algoritmos exactos**

Son algoritmos que siempre devuelven una solución óptima.

- **Algoritmos aproximados**

Son algoritmos que producen soluciones que están dentro de un cierto porcentaje del óptimo.

1.6.2 Algoritmos Heurísticos

Producen soluciones sin ninguna garantía de optimalidad y, a su vez, por lo general tienen un tiempo de ejecución mucho menor.

Podemos definir una heurística como una técnica que aumenta la eficiencia de un proceso de búsqueda, posiblemente sacrificando demandas de completitud. Las heurísticas son como los guías de turismo: resultan adecuados en el sentido de que generalmente suelen indicar las rutas interesantes; son malos en el sentido de que pueden olvidar puntos de interés para ciertas personas. Al usar buenas heurísticas se pueden expresar buenas (aunque posiblemente no óptimas) soluciones a problemas difíciles.

Una función heurística es una correspondencia entre las descripciones de estados del problema hacia alguna medida de deseabilidad, normalmente representada por números. Quiere decir que mensura cada estado del problema (solución) y dice qué tan cerca de la solución óptima está. (M.G., 2021)

El propósito de una función heurística es el de guiar el proceso de búsqueda en la dirección más provechosa sugiriendo qué camino tomar cuando hay más de uno disponible. Cuanto más exactamente estime la función heurística los méritos de

cada nodo del árbol (o grafo) que representa al problema, más directo será el proceso de solución. En general, hay que hacer una ponderación entre el costo de evaluación de una función heurística y el ahorro de tiempo de búsqueda que proporciona la función. (Z.Li & C.Zang, 2016)

1.6.3 Algoritmos Metaheurísticos

Imitan fenómenos simples observados en la naturaleza y que parecen estar asociados con la inteligencia artificial. Estos algoritmos tratan de adaptar el comportamiento de diferentes especies a soluciones de problemas altamente complejos mediante optimización. (V.Alonzo&A.Aguila, 2018)

El término metaheurística o meta-heurística fue acuñado por F. Glover en el año 1986. Con este término, pretendía definir un “procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local”. (Z.Li & C.Zang, 2016)

Imitan fenómenos simples observados en la naturaleza y que parecen estar asociados con la inteligencia artificial. Estos algoritmos tratan de adaptar el comportamiento de diferentes especies a soluciones de problemas altamente complejos mediante optimización. Se han encontrado soluciones de muy alta calidad a problemas que hace tiempo parecían inabordables. De modo general, se puede decir que las metaheurísticas combinan ideas que provienen de cuatro campos de investigación bien distintos.

Los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, pero no garantizan ese alcance. (Z.Li & C.Zang, 2016)

1.6.4 Redes Neuronales

Al hablar de una red neuronal, viene la idea a la cabeza es la imagen de una neurona del cerebro, de esas que se han visto en algún libro o en algún reportaje, una masa redonda, con un núcleo y unas ramificaciones. En el cerebro se tiene miles de millones de neuronas, todas ellas forman una red neuronal, y se sabe que la información se transmite mediante la sinapsis. Pues bien, una red neuronal artificial es algo similar, un conjunto de redes neuronales que tienen como objetivo resolver problemas difíciles de resolver mediante algoritmos convencionales. Dentro de

dicho conjunto, en cada una de ellas se pueden distinguir una entrada de señal, un nodo y una salida o respuesta hacia otra neurona artificial.

En la figura 7, las señales de entrada, la información que recibe la neuronal artificial, son variables independientes. Los n-valores de entrada son multiplicados por sus respectivos pesos, es decir en la sinopsis el vector entrada es multiplicado por el vector peso, dando como resultado una combinación lineal de las entradas y los pesos, algo que se denomina función de ponderación.

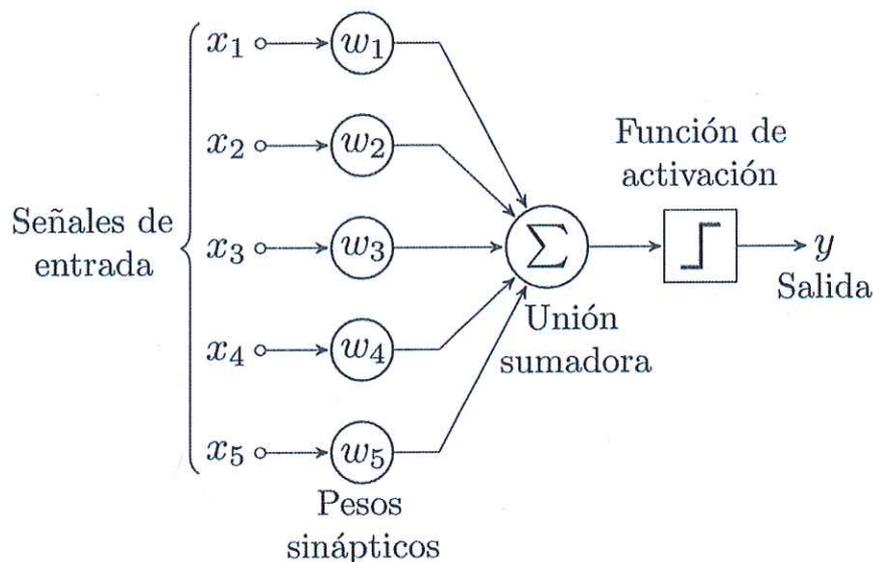


Figura 7. Configuración de las señales de una red neuronal

1.7 Fundamentación metodológica

- Enfoque

La investigación tiene enfoque cuantitativo con la descripción del despacho económico de una micro red distribuida en la parroquia de Pucayacu, con el registro de las variables climáticas de la radiación solar, caudal de agua y capacidad de almacenamiento de batería, con intervalos de medición de minuto todos los días durante los meses de enero y diciembre del año 2022.

1.8 Tipo de Investigación.

a) Investigación descriptiva. - con la cuantificación de los parámetros climáticos que son receptados en la estación meteorológica y con el uso de programas

computacionales se aspira interpretar el comportamiento de los parámetros climáticos de la radiación solar, velocidad del viento y capacidad de almacenamiento de batería.

b) Investigación correlacional. - Se desea conseguir la relación que existe en las variables climáticas con el tiempo determinado a corto plazo con la ayuda de programas estadísticos que analicen los registros en los meses de medición.

c) Investigación experimental. – Se creará un algoritmo de análisis de extensas cantidades de datos en busca del patrón característico entre los parámetros climáticos y en los tiempos establecidos

1.9 Generación Distribuida en Zonas Rurales

La necesidad de una mayor flexibilidad del sistema eléctrico, los nuevos escenarios legislativos y económicos, el ahorro de energía y el impacto medio ambiental, han contribuido al desarrollo de la generación distribuida. El término de generación distribuida se considera a la utilización de generadores instalados en un territorio próximo a las cargas y conectados a la red de distribución como se aprecia en la figura 8, estos recursos energéticos pueden ser convencionales o no convencionales.

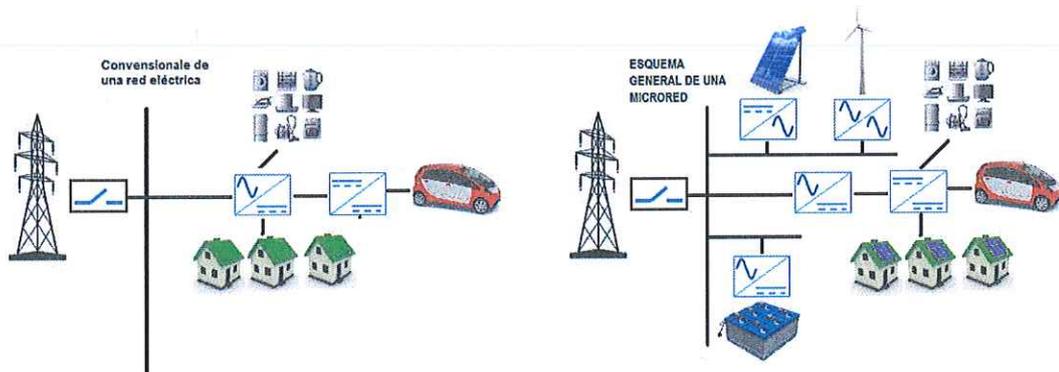


Figura 8. a) Configuración de una red eléctrica convencional b) esquema de ingreso de fuentes renovables

La generación distribuida posee efectos en las redes de distribución a considerar la presencia de flujos bidireccionales, el aumento de la contribución de capacidad de cortocircuito, el impacto de niveles de voltaje, el deterioro de las protecciones del sistema y la coordinación y la variación de las pérdidas en las líneas. (V.Alonzo&A.Aguila, 2018)

1.9.1 Condiciones de las micro redes en zonas rurales

El sector eléctrico ecuatoriano se enfrenta a grandes retos dentro de su plan maestro de electrificación es dotar al cliente una energía eléctrica confiables y que cumpla las condiciones de servicio. Existen lugares remotos y aislados especialmente en zonas rurales donde la construcción de las líneas de transmisión necesarias para el servicio eléctrico no es una solución económicamente viable para las políticas empresariales. Por ende, la planificación de la construcción de una micro red eléctrica se torne la opción más acertada en comparación a una repotenciación o extensión de red que resulta costosa y enfrentar las restricciones económicas y ambientales. (A.Clavijo, 2015) (Awinburn, 2021)

1.10 Marco regulatorio de la generación distribuida

Regulación ARCONEL N 004/15

El objetivo de la regulación es asegurar la operación eficiente de la red, estableciendo criterios y requisitos técnicos con respecto a la conexión a la red de distribución con la finalidad de no degradar la confiabilidad y calidad de servicio de energía eléctrica, manteniendo los niveles de voltaje y corriente dentro de los rangos admisibles.

La regulación aplica para fuentes de energía convencionales y no convencionales conectados en alto y medio voltaje con una potencia igual o superior a los 100KW, incluyendo las tecnologías tales como eólica, solar, biomasa, fotovoltaica y micro centrales hidráulicas con una potencia igual o menor a 10MW y plantea tres escenarios como:

- Red de distribución sin generación renovable.
- Red de distribución con generación renovable.
- Red de distribución con generación renovable funcionando en isla.

1.10 Consideraciones IEEE 1547 21

La Recomendación IEEE aplica para todas las tecnologías de generación distribuida cuya capacidad no debe superar los 10 MW en el punto común de conexión. La generación distribuida contempla las fuentes de energía como: celdas de combustible, sistemas fotovoltaicos, almacenamientos de energía y generación distribuida, para lo cual se establecen parámetros principales para brindar mayor seguridad y confiabilidad con la interconexión de la generación distribuida hacia los SEP.

1.11 Metodología de Investigación

Para la ejecución del presente proyecto de investigación se parte de una investigación bibliográfica para establecer conceptos de funcionamiento de sistemas de generación distribuida dentro de la planificación en costos de instalación y operación, de manera específica la aplicación de algoritmos de optimización, para posteriormente pasar a una investigación de campo y por último consolidar en una investigación experimental.



Figura 9. Metodología de la investigación

a) Investigación bibliográfica

Para el desarrollo del presente análisis de optimización se utilizarán varias fuentes bibliográficas que ayuden a identificar información requerida para plantear conceptos claros.

b) Investigación de campo

La investigación se la desarrollara en la parroquia de Pucayacu en vista que es un lugar que ha tenido varios eventos de suspensiones de servicio eléctrico, desastres naturales, en este lugar se ejecutarán los estudios. Se obtendrá datos de potencial de radiación solar, estudios de afluentes hídricos para determinar microgeneración hídrica, y elementos alternos de respaldo como baterías (BESS) y un generador térmico. mediante un piranómetro para su análisis.

c) Investigación experimental

El análisis correspondiente a los resultados obtenidos por el algoritmo para ser validados mediante un análisis comparativo.

1.12 Instrumentos

Para la recolección de datos sobre el potencial de radiación solar se ha utilizado un instrumento de medición como lo es el piranómetro, este instrumento me permite realizar la medición de la radiación solar, mediciones de caudal y altura de afluentes hídricos que sirvan como apoyo a microred, análisis del espacio de terreno que servirá como limitación del espacio donde serviría como centro de operación de la microgrid.

CAPÍTULO II

2.1 Título del proyecto:

Planificación óptima de los recursos energéticos que permita establecer una propuesta de micro-generación distribuida como sistema alternativo a la red eléctrica de distribución Pucayacu, 2022.

2.2 Objetivo del Proyecto

- Ejecutar un estudio de campo de los recursos naturales para analizar el potencial de radiación solar y microgeneración hidráulica.
- Establecer una metodología matemática de optimización considerando las variables de entrada los recursos energéticos disponibles, paneles fotovoltaicos, batería y microgeneración hidráulica para obtener un análisis en la operación de la microred.

2.3 Justificación

Pucayacu es una parroquia del Cantón la Maná en la provincia de Cotopaxi, un consumo de carga variable con un alimentador que debido a la geografía existe continuas caídas de suministro de energía eléctrica por lo que existe la necesidad de tener un sistema de respaldo que garantice la resiliencia del sistema de distribución. Al mantenerse en una zona alejada el consumo energético principal es el del generador de combustión interna con una potencia instalada máxima de 250KV de uso limitado ya que el combustible principal es la gasolina, siendo este un limitante para extender los servicios de turismo, centro de descanso, salud y relajamiento del público en general, a más de ello es una zona de protección animal y vegetal.

La metodología propuesta se pondrá en consideración en la parroquia Pucayacu del cantón La Maná de la provincia de Cotopaxi, que posee el afluente hídrico del Río Quidigua (latitud: -0.718592, longitud -79.116462) como se observa en la figura 10. La zona consta con una población de aproximadamente 2400 habitantes que

poseen un sistema eléctrico estable pero en temporadas invernales su sistema eléctrico colapsa y si esta circunstancia se le considera la complejidad de su geografía el tiempo de respuesta para reestablecer el sistema es muy largo, tanto así que el domingo 30 de enero del 2022 su sistema eléctrico de sub-transmisión dejó de suministrar energía quedándose la parroquia en tinieblas, sin servicio de salud de emergencia, varios damnificados, las redes eléctricas de distribución en el piso, alberges y atención de emergencia sin energía, existiendo por parte de la Empresa eléctrica un generador de 1MVA con la restricción en la reserva de combustible para abastecimiento continuo

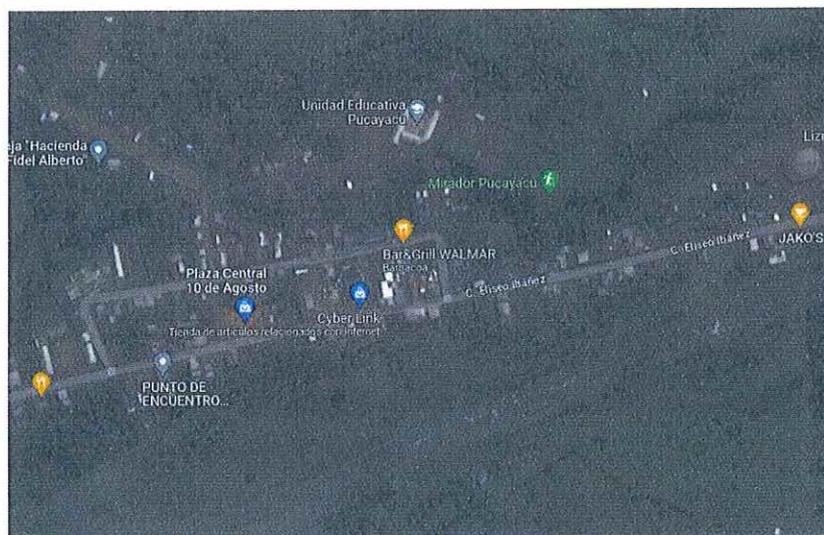


Figura 10. Ubicación geográfica de la parroquia Pucayacu

La cantidad de un galón de gasolina para generación eléctrica envía al ambiente 8,887 gramos de CO₂/ Si el sistema de generación térmica estuviera al 100% de su capacidad máxima como sistema de emergencia estaría enviando al ambiente una cantidad de Kg de CO₂ tomando en consideración la investigación de la EPA (EPA, 2020) en un estudio realizado, la tasa de salida de dióxido de carbono que existe es de 1,021lb de CO₂ por cada KWh de energía eléctrica.

En la tabla 3 se puede apreciar los perfiles de carga máximos que se estiman de manera mensual siendo los de máximo consumo los meses de noviembre, diciembre y febrero cuyas potencias alcanzan hasta los 180KW.

Tabla 3 Consumos eléctricos promedio unifamiliar

| | (KW) Total del Alimentador | (KW) Requeridos Emergentes |
|-----|----------------------------|----------------------------|
| ENE | 1.004,78 | 100,5 |
| FEB | 1.660,60 | 166,1 |
| MAR | 1.543,94 | 154,4 |
| ABR | 1.155,19 | 115,5 |
| MAY | 1.321,28 | 132,1 |
| JUN | 1.158,36 | 115,8 |
| JUL | 1.237,44 | 123,7 |
| AGO | 1.286,41 | 128,6 |
| SEP | 984,61 | 98,5 |
| OCT | 869,68 | 87,0 |
| NOV | 1.256,54 | 125,7 |
| DIC | 1.789,54 | 179,0 |

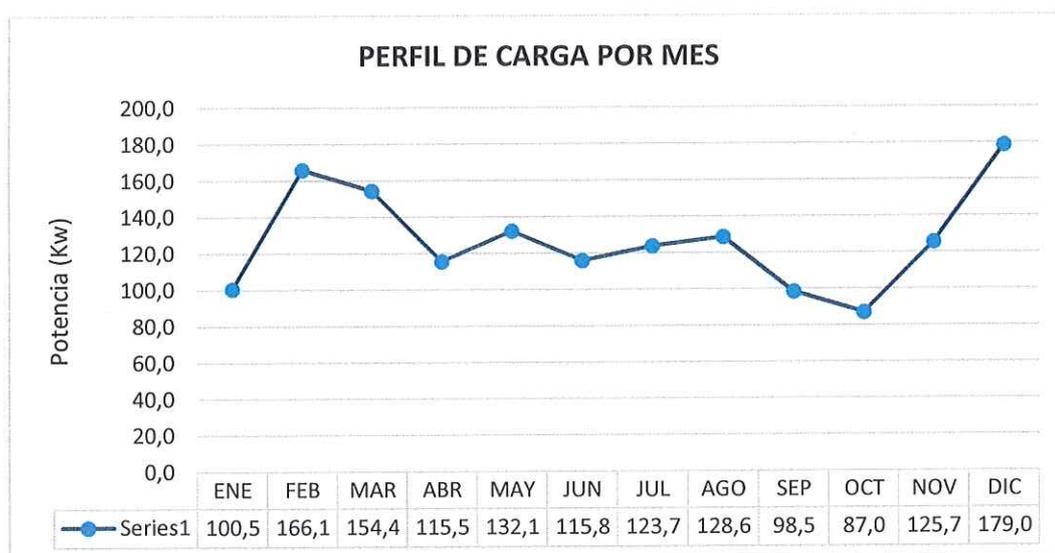


Figura 11. Perfil de carga promedio anual

Como se puede apreciar en la tabla 4 la emanación de CO₂ es elevada de acuerdo al perfil de carga diaria por lo que es necesario limitar su utilización por lo que la restricción del algoritmo, deberá estar enmarcado en la utilidad óptima del recurso térmico debido a que tiene que tender a la baja la emanación de CO₂, adicionalmente considerando que la contaminación ambiental genera multas llegando a tener una contaminación hasta los 1389Kg de Co₂.

Tabla 4 Consumo esperado emergente por día y emanación de partículas de CO2

| HORA | (KW) Total del Alimentador | (KW) Requeridos Emergentes | Emanación de CO2 por hora |
|-------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 0:00 | 1007,34 | 100,73 | 102,749 |
| 1:00 | 1004,36 | 100,44 | 102,445 |
| 2:00 | 990,19 | 99,02 | 100,999 |
| 3:00 | 964,61 | 96,46 | 98,390 |
| 4:00 | 1008,73 | 100,87 | 102,890 |
| 5:00 | 1130,59 | 113,06 | 115,320 |
| 6:00 | 1154,26 | 115,43 | 117,735 |
| 7:00 | 1058,1 | 105,81 | 107,928 |
| 8:00 | 994,65 | 99,47 | 101,454 |
| 9:00 | 1117,72 | 111,77 | 114,007 |
| 10:00 | 1170,45 | 117,05 | 119,386 |
| 11:00 | 1205,73 | 120,57 | 122,984 |
| 12:00 | 1246,7 | 124,67 | 127,158 |
| 13:00 | 1196,32 | 119,63 | 122,025 |
| 14:00 | 1283,48 | 128,35 | 130,915 |
| 15:00 | 1240,87 | 124,09 | 126,569 |
| 16:00 | 1311,16 | 131,12 | 133,738 |
| 17:00 | 1260,12 | 126,01 | 128,532 |
| 18:00 | 1719,75 | 171,98 | 175,415 |
| 19:00 | 1974,56 | 197,46 | 201,405 |
| 20:00 | 1805,02 | 180,50 | 184,112 |
| 21:00 | 1624,4 | 162,44 | 165,689 |
| 22:00 | 1405,16 | 140,52 | 143,326 |
| 23:00 | 1176,21 | 117,62 | 119,973 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| Emanación de CO2 al Dia (lbs) | 3.065,146 |
| Emanación de CO2 al Dia (Kg) | 1.389,459 |

2.4 Descripción de la propuesta.

En la parroquia Pucayacu cómo se observa en la figura 10 es un lugar alejado con dificultad de movilización rápida para solventar el suministro de energía eléctrica por lo que se debe pensar en un sistema eléctrico que permita el suministro en caso de emergencias que se han suscitado como apagones, roturas de líneas, inundaciones, etc.

El estudio es la parroquia de Pucayacu del canton La Maná de la provincia de Cotopaxi dado que su ubicación geográfica en los últimos años el alimentador 09MA13B1S2 ha sufrido continuas interrupciones y con ello la pérdida económica por energía no suministrada a más de ello los problemas internos sociales como la falta de comunicación y salud como ocurrió en el año 2023 donde el sistema eléctrico sufrió un colapso total, con esta eventualidad la parroquia quedó totalmente fuera de servicio eléctrico. Por lo tanto este documento propone un marco teórico de la planificación óptima de los recursos energéticos renovables que están presentes en el lugar como es: la energía hidráulica (GH), solar (FV), térmica (GT), y almacenamiento en sistema de baterías (BESS). La planificación óptima del sistema se considerará un sistema aislado en el caso del colapso de las redes eléctricas convencionales para lo cual actuará como una microred rural aislada y se formulará un problema de optimización estocástica SOP que se considerará como variables de entrada sus recursos energéticos y la variación de carga a satisfacer. Una vez que el SOP haya generado una planificación óptima para satisfacer la demanda se considerarán las restricciones técnicas en el funcionamiento de la microred considerando escenarios estocásticos de las fuentes energéticas, se puede observar en la figura 12, las consideraciones iniciales estarán encaminadas a obtener un sistema con una implementación óptima al igual que una operación óptima del despacho de energía eléctrica cuya función operativa será una ecuación matemática de optimización.

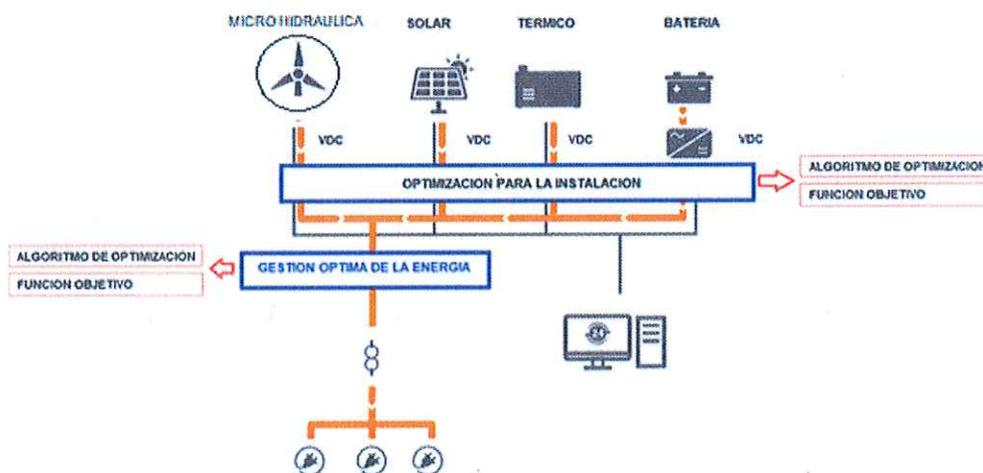


Figura 12. Diagrama esquemático de la Micro generación Distribuida

Una vez realizado las mediciones con los equipos de medición de viento y solar se procederán a establecer modelos de funcionamiento de acuerdo a las características técnicas, con ello establecer cuáles son sus posibles potenciales entregados a la red. En la primera etapa de optimización se analizará mediante el software FICO EXPRES (optimización comercial para programación lineal, programación lineal de enteros mixtos, programación cuadrática convexa, programación cuadrática convexa cuadrática ...) esto porque dentro de sus librerías permite realizar un análisis completo para la toma de decisiones así como su versatilidad al momento de la programación, en esta etapa de optimización las restricciones son evaluadas con la proyección de potencia generada y el costo económico de implementación.

Una vez obtenido los valores óptimos de implementación, es importante analizar una segunda etapa, que es la de gestión óptima en el despacho de energía hacia la carga considerando las restricciones de costo de operación, penalización en la contaminación ambiental por emanación de CO₂ al ambiente, la función objetivo es que la gestión tienda a que se ocupe lo mínimo de energía fósil.

Para que los valores tiendan a ser los más reales se toman en consideración el estudio de un año tanto de la radiación solar como los de viento, también los estudios actuales de consumo de carga, y para realizar una proyección del consumo máximo requirente se proyectara con un estudio de una hostería de las mismas características, también se considera un análisis de los datos de la página de la NASA para realizar un estudio del porcentaje de error.

2.4.1 Estudio de la potencia requerida.

a) Potencia de carga actual instalada. - En la figura 13 se puede observar un perfil de demanda diaria que se estima sirva para suplir un consumo emergente en el caso que la parroquia Pucayacu se quede desabastecido de energía eléctrica, que requiere la parroquia, se obtuvo mediante un aproximado del consumo anual por mes tomando en consideración un proporcional de las variaciones de carga en el año 2022 destacado los consumos por mes, y los servicios comunitarios que son importantes que no deben ser suspendidos la energía eléctrica como escuelas, albergues, centros de comunicaciones, centros de salud e iluminación, el perfil de carga obtenido se proyecta a 10 años considerando como población aislada en caso

de interrupción total del sistema eléctrico, por lo que la investigación inicia con el análisis de disponibilidad de las fuentes de energía renovables en la zona que requiere la microred rural aislada para analizar su planificación óptima considerando los estocásticos críticos como la falta de disponibilidad de los recursos y la variación por estaciones climáticas.

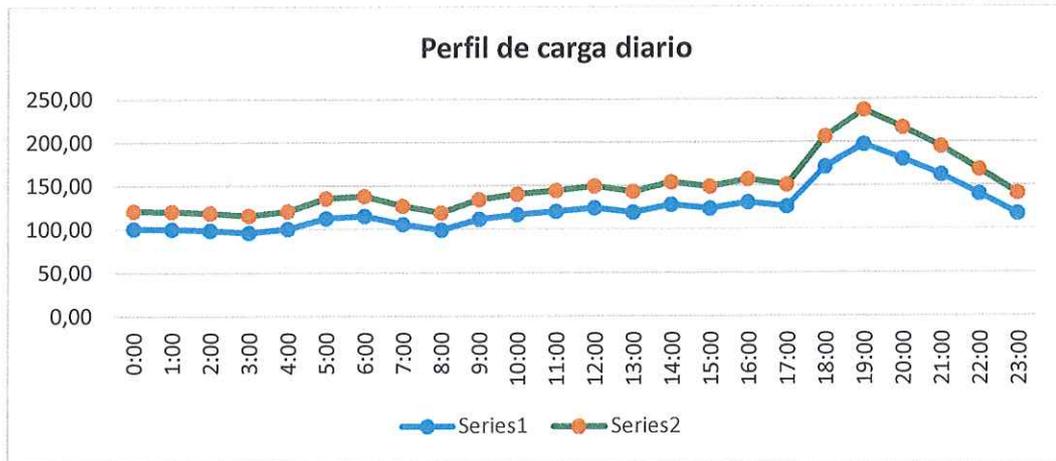


Figura 13. Esquema de variación de la potencia instalada por horas en el día

b) Potencia máxima proyectada a instalar. - En la figura 13 se observa la curva proyectada (anaranjada) para una condición de carga máxima, tomando como referencia la máxima cantidad de servicios que serían los emergentes adicionalmente tomando como referencia la curva de carga que posee la parroquia en un estudio de un año, con la disponibilidad de las 24 horas del día, como se puede observar es necesario alcanzar a una potencia de los 250 KVA y una potencia mínima continua de 120KVA, esta potencia ayudara a mantener una energía disponible en caso de emergencias.

c) Potencia máxima proyectada en un año considerando una variación de carga.

En la figura 14 de acuerdo a las fechas mensuales al año se puede apreciar que existe variación en el perfil mensual de carga los mismos que deben ser suplidos por los recursos energéticos existentes siendo el pico máximo de consumo el mes de diciembre con un consumo pico que llega hasta los 300KW cabe destacar que en

este mes el afluente hídrico se encuentra también en su máxima potencia, de existir un daño en el sistema eléctrico el sistema emergente debe suplir toda esta carga.

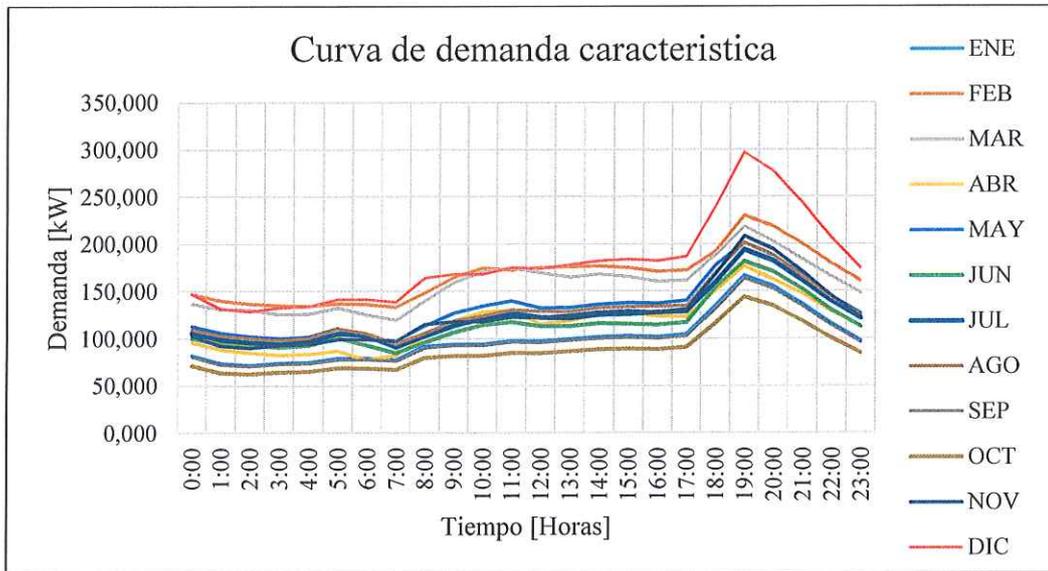


Figura 14. Esquema de carga en el año

2.4.2 Análisis del potencial energético solar.

De acuerdo a las mediciones tomadas con el equipo **Solar Power Meter SM206** adquiridos por el lapso de un año, así como también la variación de temperatura que es importante para determinar la eficiencia en la generación fotovoltaica. En la tabla 5 se puede apreciar las mediciones adquirida por el equipo en el lapso de un año en donde se destaca las mismas características mensuales desde las 11:30 hasta las 15:00 en las que se aprecia potencias de radiación solar promedio mínima de 780W/m^2 y las máximas de 933 W/m^2 siendo estas las más óptimas para la generación fotovoltaica ya que la temperatura promedio del sector sub trópico es de 22 a 25 °C que me permite obtener la máxima eficiencia de los paneles fotovoltaicos, así como también se puede destacar que los periodos de pico máximo de radiación son los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

Tabla 5 Valores de Radiación solar medidor por el equipo Solar Power Meter SM206

| Hora | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPT | OCT | NOV | DIC | Promedio |
|----------|-------|---------|--------|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 1:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 2:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 3:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 4:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 5:00 | 7,8 | 8,9 | 7,5 | 9,2 | 7,5 | 8,6 | 11 | 10,2 | 9,5 | 9,2 | 8,7 | 7,2 | 8,8 |
| 6:00 | 72,1 | 60,05 | 58,75 | 98,7 | 70,4 | 60,02 | 72,05 | 68,75 | 40,15 | 74,15 | 81,25 | 40,15 | 66,4 |
| 7:00 | 240 | 298,15 | 224,25 | 189,75 | 165 | 225 | 180 | 210 | 190 | 240 | 254 | 180 | 216,3 |
| 8:00 | 320 | 420 | 380 | 320 | 380 | 280 | 360 | 360 | 350 | 256 | 280 | 320 | 335,5 |
| 9:00 | 390 | 450 | 380 | 390 | 458 | 426 | 489 | 520 | 548 | 516 | 560 | 380 | 458,9 |
| 10:00 | 480 | 470 | 460 | 520 | 560 | 580 | 560 | 765 | 690 | 720 | 765 | 698 | 605,7 |
| 11:00 | 645 | 725 | 790 | 820 | 680 | 780 | 825 | 758 | 920 | 870 | 820 | 758 | 782,6 |
| 12:00 | 925 | 890 | 978 | 850 | 820 | 950 | 925 | 970 | 980 | 924 | 956 | 887 | 921,3 |
| 13:00 | 845 | 920 | 895 | 890 | 920 | 985 | 965 | 974 | 948 | 989 | 978 | 893 | 933,5 |
| 14:00 | 689 | 720 | 789 | 750 | 859 | 920 | 954 | 945 | 965 | 978 | 948 | 856 | 864,4 |
| 15:00 | 720 | 820 | 845 | 780 | 890 | 925 | 948 | 920 | 845 | 950 | 958 | 870 | 872,6 |
| 16:00 | 680 | 520 | 560 | 720 | 780 | 840 | 790 | 854 | 705 | 793 | 720 | 690 | 721,0 |
| 17:00 | 489 | 378 | 497 | 458 | 452 | 520 | 670 | 520 | 496 | 520 | 489 | 320 | 484,1 |
| 18:00 | 125 | 225 | 102 | 220 | 159 | 226 | 250 | 190 | 180 | 210 | 231 | 110 | 185,7 |
| 19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 20:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 21:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 22:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| 23:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| Temp max | 24 | 23 | 24 | 23 | 23 | 30 | 28 | 29 | 30 | 29 | 30 | 26 | |
| Temp | 20 | 19 | 20 | 18 | 18 | 23 | 21 | 24 | 24 | 23 | 24 | 20 | |
| Temp min | 15 | 16 | 16 | 14 | 14 | 16 | 16 | 18 | 17 | 18 | 18 | 15 | |

En la figura 15 se observa la variación de la radiación solar medida durante el periodo de un año. Para validación de los resultados obtenidos mediante la adquisición de datos para el respectivo estudio del potencial de radiación solar se considera también los datos promedios que ofrece en la página (<https://power.larc.nasa.gov/>) de la NASA como se puede apreciar en el ANEXO A cuyos valores son lo más aproximados a los valores medidos con un margen de error es del 8% que se lo considera como dentro de los parámetros aceptables para los respectivos estudios, cabe destacar que los valores de la NASA dependen de valores históricos y muchas veces se alejan de la realidad local ya que las probabilidades climáticas son cambiantes y depende de varios factores.

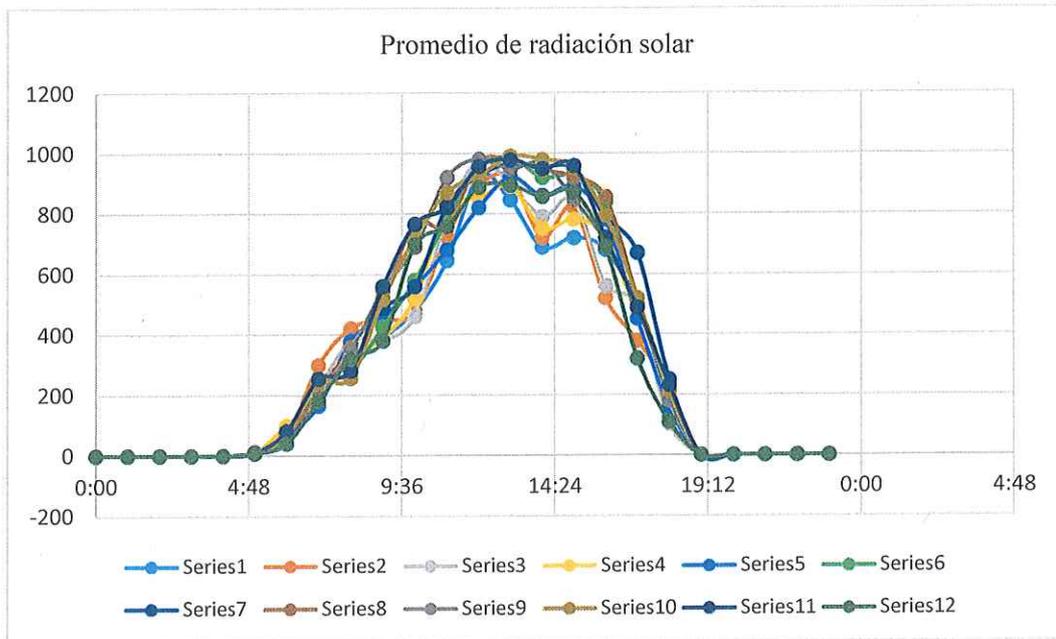


Figura 15. Análisis de las curvas medidas y adquiridas en la página de la NASA

2.2.3 Panel Fotovoltaico considerado para el estudio

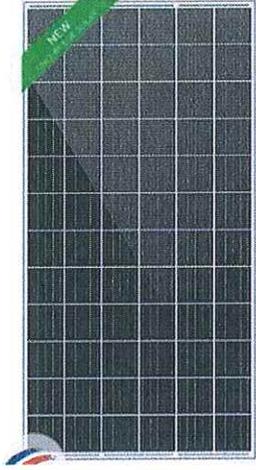
Se establecieron mediciones de campo para determinar la eficiencia del panel fotovoltaico con un panel de 550W marca VERTEX que establece una potencia de salida de hasta el 90% en condiciones óptimas de operación, se aplicaron métodos de medición por hora y establecer los horarios de máxima eficiencia para contrastar los datos de placa. En la figura 17 se puede observar las mediciones tomadas en campo para determinar la potencia máxima generada al igual que la corriente.



Figura 16. a) Medición de la radiación solar, voltaje generado corriente

En la tabla 6 muestra el DataSheet del panel fotovoltaico a considerar en la MicroGrid.

Tabla 6 Datos de placa del panel fotovoltaico

| MARCA: VERTEX 550W Monocristalino | |
|--|---------|
|  | |
| Potencia de Salida (Pmax) | 550 W |
| Tolerancia de potencia | 5 +/- W |
| Voltaje de circuito abierto Voc | 37.9 V |
| Corriente de Cortocircuito Icc | 18.52 A |
| Voltaje máximo (Vmp) | 31.6 V |
| Corriente máxima (Imp) | 17.4 A |
| Eficiencia | 21 % |

2.2.3.1 Modelado del funcionamiento del panel fotovoltaico

Para la ejecución del funcionamiento del panel fotovoltaico se lo puede realizar mediante su equivalente en circuito eléctrico permitiendo obtener valores con una excelente precisión y con los valores de las variables respectivas que determinan su eficiencia. Dentro de los parámetros importantes que se consideran esta las condiciones de temperatura ambiental, la composición estructural (monocromático, policromático y amorfo), la irradiación. En la figura 17 se muestra el modelo circuital del panel fotovoltaico considerando el análisis I – V (J.C. Díaz Guillen, Septiembre 2014,) en la misma que se consideran condiciones ideales de parámetros constantes.

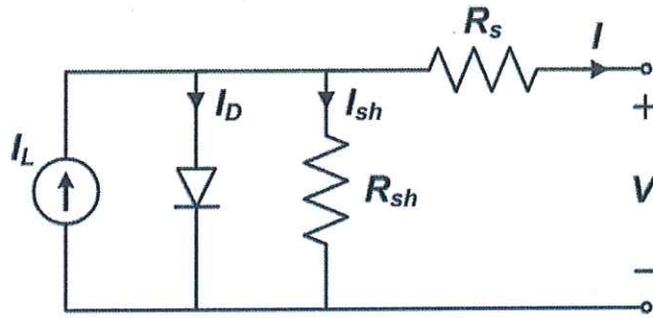


Figura 17. Modelo de circuito equivalente de una celda fotovoltaica

En la figura 18 (J.C. Díaz Guillen, Septiembre 2014,) se analiza la curva I vs V que están determinados por los parámetros de la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de máxima transferencia de potencia (V_{MPP}), máxima transferencia de potencia (MPP), corriente de máxima transferencia de potencia (I_{MPP}), potencia en el punto de máxima transferencia de potencia.

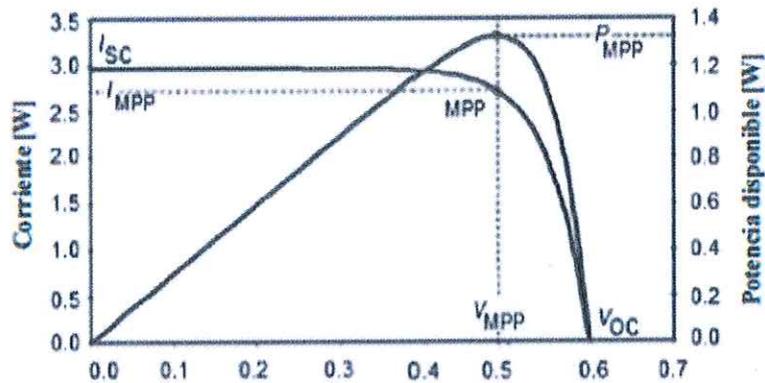


Figura 18. Curva de I-V y V-W de una celda solar (Á. P. Clavijo Reyes, 2015)

En la Ecuación 1 se describe la ecuación matemática que define los parámetros de operación de la celda.

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad \text{Ec. [1]}$$

Donde:

I_L = Corriente Fotogenerada.

I_o = Corriente de saturación inversa.

R_s = Resistencia en serie.

R_{SH} = Resistencia en paralelo.

V = Voltaje de salida.

q = Carga de un electrón (1.6×10^{-19} C)

a = a = kTcA.

k = Constante de boltzman (1.28×10^{-23} J/K)

Tc = Temperatura de celda.

A = Factor de identidad.

2.2.4 Selección del Método de Optimización para realizar la planificación.

Dentro de los métodos de optimización se los puede clasificar en clásica a destacar la programación lineal, programación lineal de enteros mixtos programación cuadrática, programación no lineal, optimización estocástica, teoría de grafos y la moderna como métodos Metaheurísticos (Inteligencia Artificial) algoritmos evolutivos, templado simulado, búsqueda aleatoria, sistemas multiagente (colonia de hormigas). Para el presente estudio se opta por el método de la optimización clásica realizando un análisis comparativo entre la programación lineal y la de enteros mixtos en vista que de acuerdo a los datos que se mantiene se puede ingresar en las variables de entrada obteniendo como variables de salida la planificación optima. Dentro de las variables de entrada se tiene el portafolio de inversión de cada una de las tecnologías y la potencia en un escenario estocástico de los recursos energéticos. En la tabla 7 muestra un análisis comparativo de cada uno de los métodos.

Tabla 7 Comparación entre métodos

| Método Clásico | | | | | Metaheurísticos (Inteligencia Artificial) | | | |
|--|------|----|-----|----|---|----|----|----|
| PL | MILP | QP | LNP | SP | GP | SA | RS | MS |
| - Busca la respuesta optima localmente. - Garantiza el óptimo numérico. - Elevado número de restricciones. | | | | | - Imitan fenómenos de inteligencia. - No garantizan la obtención del optimo. - Mecanismos específicos para evitar óptimos locales. - No permiten un elevado número de restricciones. | | | |

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - Explotan un gran número de soluciones. - Para problemas combinatorios. |
|--|---|

- PL** Programación Lineal
- MILP** Programación Lineal de Enteros Mixto
- QP** Programación cuadrática
- LNP** Programación Lineal
- SP** Programación Estocástica
- GP** Programación genética
- SA** Simulación Recocida
- RS** Simulación Aleatoria
- MS** Sistemas Multiagente

De acuerdo con la investigación realizada se estima que existen restricciones de acuerdo a la variación de los escenarios estocásticos de las fuentes energéticas, restricciones en la carga y descarga de la batería, restricciones en el uso de combustible, Restricciones sen el portafolio de inversión cuya función objetivo consiste en minimizar los costos de inversión y operación. Por lo tanto, de acuerdo a nuestra consideración no se aplica métodos de inteligencia artificial. Como nuestros escenarios son variables lineales y la consideración es que una fuente de energía ingrese o salga de servicio se considera un funcionamiento binario, por lo que el problema se lo puede considerar como una consideración de enteros mixtos.

2.2.5 Modelos del portafolio de inversión (PV).

Se formula un problema de optimización de enteros mixtos (mixed integer optimization problem) MIOP con la función objetivo de obtener una solución de la planificación optima de los recursos renovables que suministrara a la microred emergente con la restricción del uso de la GT por la emisión de CO2 y abastecimiento de combustible. Adicionalmente la minimización en los costos de inversión de la red eléctrica de distribución DER y el costo en la operación a lo largo de un año considerando la variación de los recursos energéticos y el perfil de carga. Para dar solución al MIOP se utiliza el software FICO XPRES 8.8.0 (FICO, 2021). La formulacion matemática del MIOP se defienen en las ecuaciones (1) para el costo minimo de inversion y operación. (Miguel S., 2022)

Función Objetivo. – La función objetivo está orientada a obtener el costo óptimo de inversión en la que se observa en la ecuación (1)

$$\text{Min } \{IC + CO\} \quad (1)$$

IC: Costo de Inversión

CO: Costo de Operación

Formulación de generación fotovoltaica. - Se considera la formulación de una ecuación lineal de enteros mixtos MILP. En (2) se define la variable entera, que indica cuantos paneles fotovoltaicos serán instalados en el problema de optimización. En (3) se define la potencia máxima producida por parte de los paneles fotovoltaicos en donde se incluye la variable entera x , en este contexto se la variable es dos, se podrá calcular la disponibilidad de energía dado la instalación de dos paneles. (Esta formulación ya se ha utilizado antes por lo que no detallo los parámetros utilizados). Cabe mencionar que las variables de esta formulación es la energía total producida ($PV(t, m)$), cantidad de paneles a instalar (x), y el vertimiento de PV, los demás son datos conocidos.

$$x \text{ is_integer} \quad (2)$$

$$PV(t,m) = x * PV_{max} * ((Irradiancia(t,m)/1000) * (1 - NT * (TempC(t,m) - 25))) * n_{inv} - PV_{curt}(t,m) \quad (3)$$

Formulación de generación microhidro. - En (4) se define la variable entera, que indica cuantas turbinas hidráulicas se van a instalar. En (5) se define la potencia hídrica disponible en la zona que depende de la gravedad (g) la altura (h), la velocidad (v), el área de la sección transversal de la tubería de la toma de agua de la turbina (A) y rendimientos de turbina y generador eléctrico. En (6) se establece la potencia máxima que puede suministrar el sistema micro hidroeléctrico que dependen del número de turbinas a instalar y la capacidad hidráulica de la zona ($PT_{MH}(t, m)$). En (7) se establece la potencia máxima hidro, pero esta vez con las limitaciones de potencia del generador eléctrico en este caso particular 20 kW,

este valor se multiplica por la cantidad de turbinas a instalar para conocer la potencia máxima eléctrica a producir. Cabe mencionar que las variables de esta formulación es la energía total producida (MH (t, m)) y la cantidad de turbinas a instalar (y), los demás son datos conocidos.

$$\text{y is_integer} \quad (4)$$

$$PT_MH(t,m) := g * \text{densidad} * h * v(t,m) * \text{Area} * n_turbina * n_genMH / 1000 \quad (5)$$

$$MH(t,m) \leq PT_MH(t,m) * y \quad (6)$$

$$MH(t,m) \leq MHmax * y \quad (7)$$

Formulación de generación térmica. - En la formulación de generación térmica se considera la ecuación de inventario definidos por (8) y (9), donde $f(t,m)$ es la cantidad de combustible disponible en la hora t y escenario m . $f_d(t,m)$ representa el flujo de combustible que se consume en la hora t . Y finalmente, Capacidad de diésel representa la capacidad de almacenamiento de combustible en este caso es de 1000 litros. En las ecuaciones (10) y (11) se definen las restricciones de la cantidad de combustible, (12) por otro lado calcula la cantidad de combustible consumido $f_d(t, m)$ en litros dada la potencia generada $PT(t,m)$ en kWh, para ello se utiliza la constante 0.249 dada la aproximación lineal del consumo de combustible de un generador de 320 kW (Megapower, 2020). En (13) se define las emisiones de CO2 donde k es el factor de emisiones de CO2 expresado en TON/kwh.. $K=0.001$ Ton/kwh (Qayoom & Al-Khalid Othman, 2022). Finalmente (14) y (15) definen los límites máximos y mínimos de generación de la central térmica a Diesel. Nótese que se utiliza la variable entera z que define la cantidad de unidades térmicas a instalar.

$$\text{if } (t \geq 2) \text{ then}$$

$$f(t,m) = f(t-1,m) - f_d(t,m) \quad (8)$$

$$\text{else}$$

$$f(t,m)=\text{CapacidadDiesel}-f_d(t,m) \quad (9)$$

end-if

$$f(t,m)\leq\text{CapacidadDiesel}*z \quad (10)$$

$$f(t,m)\geq 0 \quad (11)$$

$$f_d(t,m)=PT(t,m)*0.249 \quad (12)$$

$$\text{Eco2}(t,m)=k*PT(t,m) \quad (13)$$

$$PT(t,m)\leq PT_{\max}*z \quad (14)$$

$$PT(t,m)\geq 0 \quad (15)$$

Formulación de baterías. - En la representación de la batería de acuerdo a la ecuación (16) se representa el estado inicial de carga. En las ecuaciones (17) y (18) son las ecuaciones de inventario de la batería es decir representa la energía hora a hora donde también se considera la eficiencia del inversor n. En la ecuación (19) se define la variable de estado de la batería, considerando una variable binaria.

$$E0=0.9*\text{BESS_installed} \quad (16)$$

if (t>=2) then

$$E(t,m)=E(t-1,m)-PD_BESS(t,m)*n+PC_BESS(t,m)/n \quad (17)$$

else

$$E(t,m)=E0-PD_BESS(t,m)+PC_BESS(t,m) \quad (18)$$

end-if

$$B(t,m) \text{ is_binary} \quad (19)$$

$$E(t,m)\leq 0.9*\text{BESS_installed} \quad (20)$$

$$E(t,m)\geq 0.2*\text{BESS_installed} \quad (21)$$

$$PD_BESS(t,m)\leq (1-B(t,m))*BM \quad (22)$$

$$PD_BESS(t,m)\geq 0 \quad (23)$$

$$PC_BESS(t,m)\leq B(t,m)*BM \quad (24)$$

$$PC_BESS(t,m)\geq 0 \quad (25)$$

Ecuación de balance. - En la ecuación de balance considera la energía suministrada por parte de las diferentes tecnologías, además de la carga y descarga de las baterías, la demanda y la energía no suministrada.

$$\begin{aligned} PV(t,m)+MH(t,m)+PT(t,m)+PD_BESS(t,m) &= Dem(t,m) \\ ENS(t,m)+PC_BESS(t,m) & \quad \quad \quad (26) \end{aligned}$$

Función objetivo. - En la función objetivo se minimizan los costos de inversión representado por (27) que considera los costos por equipos USD/Unidad. A excepción de las baterías donde se utiliza el costo USD por capacidad de energía instalada kWh.

$$CI = x \times Cost_{PV} + y \times Cost_{MH} + z \times Cost_T + BESS_{installed} \times Cost_{BESS} \quad (27)$$

También se considera los costos de operación representado por (28) en que esta la energía no suministrada y los costos asociados al generador térmico (Consumo de combustible y emisiones de co2). Es importante notar que aquí se aplica el promedio de todos los escenarios. En otras palabras, se considera que todos los escenarios son equiprobables.

$$CO = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^T (ENS_{i,s} \times Cost_{ENS} + f_{i,s} \times Cost_{OPPDiesel} + Eco2_{i,s} \times Cost_{CO2}) \quad (28)$$

2.5 Formación LP

En la formulación del problema lineal LP se modifican todas las ecuaciones para eliminar todas las variables enteras. De esta forma la formulación de cada tecnología cambia.

Formulación de generación fotovoltaica. - En esta formulación PVmax pasa a ser una variable de optimización (29).

$$PV(t,m)=PV_{max}*((Irradiancia(t,m)/1000)*(1-NT*(TempC(t,m)-25))^n_{inv})-PV_{curt}(t,m) \quad (29)$$

Formulación de generación microhidro.- En la formulación de la central minihidro se define la potencia máxima a instalar en (30). Se calcula la potencia máxima hidráulica en la zona, donde el área es una variable de decisión como se representa en la ecuación (31). Posteriormente en la ecuación (32) se define que la potencia máxima a generar por energía hidráulica PT_MH, debe ser menor a la potencia máxima instalada PH_installed.

$$PH_{installed} \leq 100 \quad (30)$$

$$PT_{MH}(t,m) = g * densidad * h * v(t,m) * Area * n_{turbina} * n_{genMH} / 1000 \quad (31)$$

$$PT_{MH}(t,m) \leq PH_{installed} \quad (32)$$

Formulación de generación térmica. - En la formulación (10) y (14) de unidades térmica únicamente se debe eliminar la variable entera z.

Formulación de baterías. - En la formulación de las baterías se elimina la variable de estado, y adicionalmente no se considera la eficiencia del inversor (33), debido a que si se considera no se puede formular como un problema lineal como se aprecia en las ecuaciones (34)(35).

$$E_0 = 0.9 * BESS_{installed} \quad (16)$$

if (t >= 2) then

$$E(t,m) = E(t-1,m) - PD_{BESS}(t,m) + PC_{BESS}(t,m) \quad (33)$$

else

$$E(t,m) = E_0 - PD_{BESS}(t,m) + PC_{BESS}(t,m) \quad (18)$$

end-if

$$E(t,m) \leq 0.9 * BESS_{installed} \quad (20)$$

$$E(t,m) \geq 0.2 * BESS_{installed} \quad (21)$$

$$PD_{BESS}(t,m) \leq E(t,m) \quad (34)$$

$$PD_{BESS}(t,m) \geq 0 \quad (23)$$

$$PC_{BESS}(t,m) \leq E(t,m) \quad (35)$$

$$PC_{BESS}(t,m) \geq 0 \quad (25)$$

Ecuación de balance. - La ecuación de balance no se modifica tomando en consideración la ecuación (26).

Función objetivo. - En la función objetivo lo que se modifica son los costos de inversión como se presenta a continuación (36). Aquí se considera el costo por kw instalado de cada tecnología, estos valores son referenciados actuales.

$$CI = PV_{installed} \times Cost_{PV} + PH_{installed} \times Cost_{MH} + PT_{installed} \times Cost_T + BESS_{installed} \times Cost_{BESS}$$

$$CO = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \sum_{i=1}^T (ENS_{i,s} \times Cost_{ENS} + f_{i,s} \times Cost_{OPPDiesel} + Eco2_{i,s} \times Cost_{CO2}) \quad (36)$$

2.5.1 Características del generador

Para el cálculo de la potencia a la salida del generador se debe considerar el rendimiento del generador que está en un promedio (93% - 98.5%), también se debe considerar la eficiencia de transmisión de potencia mecánica por la conexión del eje de la turbina y el eje del generador.

$$P = P * \eta_{TR} * \eta_G \quad (7)$$

Donde:

η_{TR} = Es la eficiencia de la transmisión de potencia mecánica

η_G = Es la eficiencia del generador

Para calcular la potencia aparente (S) se debe consideraran el factor de potencia de acuerdo a la red que se conecte.

$$SG = \frac{PG}{fp}$$

Donde:

SG = Potencia aparente [kVA]

fp = Es el factor de potencia.

Recurso Hidráulico. – Se aplicó la técnica de medición volumétrica considerando la sección transversal, la profundidad y la velocidad, de esta forma se determinó el

caudal aproximado por el lapso de un año en mediciones mensuales, como se puede apreciar en la figura 19, puede apreciar los datos del afluente en el Anexo B.

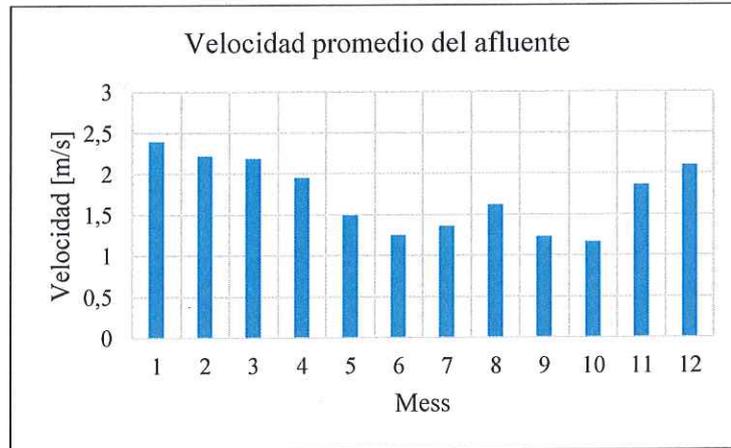


Figura 19. Variación del caudal del recurso hídrico m/s un año

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1 Análisis de resultados

3.1.1 Marco metodológico para analizar los resultados a obtener

La metodología aplicada consta de tres escenarios de investigación como se observa en la figura 20 que inicia con la investigación de campo tanto para determinar el perfil de demanda actual y poderlo proyectar a una curva optima deseada en condiciones de emergencia, así como también los recursos energéticos renovables disponibles como son hidráulico (GH), solar (FV), baterías (BESS) y generación térmica (GT). En segunda instancia si plantea un algoritmo de optimización lineal ya que se estima la rapidez en respuesta que se ajuste a las condiciones óptimas tanto en la implantación como en la operación de los recursos que de manera especial la GT tendrá un limitante el tiempo considerando la disponibilidad del combustible y emisión de gas CO₂. En el último escenario se estima la validación de los resultados que se ajusten a una propuesta en costos.



Figura 20. Marco metodológico

3.1.2 Consideraciones para determinar el programa que ayudara a la utilidad del optimizador.

Los recursos energéticos disponibles en la zona de servicio deben ser planificadas sus operaciones tanto al momento de implementar como en el momento de operación es por ello que aplicara dos modelos comparativos que manejan datos estocásticos, cuyo algoritmo respondió a la necesidad de mantener el recurso energéticos funcionales dependiendo de las condiciones de los recursos existentes en la parroquia Pucayacu, manteniendo de esta forma la resiliencia en el suministro de energía sobre todo en épocas climáticas que históricamente han sido problemáticas y que han provocado la incomunicación en casos emergentes. Los meses de alta demanda eléctrica son los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, para lo cual climáticamente son los meses invernales que han determinado aperturas del sistema eléctrico y una baja en la generación solar por las continuas lluvias. Mientras que los meses de junio, julio, agosto y septiembre son etapas de sequías e intensificación en el potencial solar por lo que el algoritmo deberá ajustarse a estas condiciones y ejecutar la mejor planificación. Para la ejecución de los resultados del programa se uso software FICO XPRESS 8.8.0 (Fico expres, Feb.2021) en la misma que ingresan la formulación de las ecuaciones (3) – (22), en el ANEXO C y D se detalla la programación con las respectivas restricciones matemática en lenguaje morse ya que se declaran espacios de búsqueda de optimización, y el optimizador lo que hace es de acuerdo a las restricciones que se limitaron y al modelo SOP llega a una solución.

3.1.3 Consideraciones de costos para determinación del sistema de optimización.

Los recursos planificados en la micro red distribuida son el recurso solar (FV), hídrico (MH), baterías (BESS) y generación térmica (GT) que estarán consideradas dentro del portafolio de inversión económica el costo de implementación de cada una de estas fuentes de energía. El escenario se maneja consideraciones estocásticas ya que existe una variabilidad de los recursos como solar e hidráulica que también deben acoplarse a una necesidad estocástica de demanda que varía en horas del día y por meses, las consideraciones en las restricciones también son importantes ya

que al ser un parroquia que está en la reserva Los Ilinisas se debe minimizar las emisiones de CO₂, por estar alejado existe una restricción en el almacenamiento y transporte de combustible ya que se estima que ha producción máxima un tiempo de funcionamiento de hasta 8 horas. La restricción también se estima en el costo de inversión de implementación que no debe ser mayor a \$150.000, las características técnicas del generador térmico e hidráulico se encuentran en el ANEXO E y F respectivamente.

a) *Se considera un caso (i)* se estableció una formulación matemática de optimización de enteros mixtos óptimas de implementación tendiendo siempre al valor mínimo de implementación y operación.

Tabla 8 Costos del kWh de potencia máxima

| TECNOLOGÍA | COSTO (\$/KW) | REFERENCIA |
|------------------|---------------|--|
| PV SYSTEM | 1500 | Hybrid-Microgrid Planning, Sizing and Optimization for an Industrial Demand in Pakistan |
| HID SYSTEM | 12.800 | Optimal Planning for Electricity-Hydrogen Integrated Energy System Considering Power to Hydrogen and Heat and Seasonal Storage |
| BESS (ION LITIO) | 500 | Break-Even Points of Battery Energy Storage Systems for Peak Shaving Applications |
| FUEL SYSTEM | 38.000 | inducomec.com/?utm_term=generador%20para%20casa&utm_campaign=0SITIO%20WEB&utm_source |

Cost_PV=1.500 !CostoPV \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW.

Cost_MH=12.800 !Costo MH \$/KW.

Cost_BESS=500 !CostoBESS \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW.

Cost_GAS=38.000 !Costo GAS \$/KW.

b) *Se considera un caso (ii)* en la formulación del problema de optimización matemática de enteros, se consideró los costos por unidad de recursos de acuerdo a sus máximas potencias que deben apuntar a la función objetivo como es el costo de inversión y operación, en la tabla 9 se puede apreciar el valor de cada uno de los recursos energéticos y la capacidad que se espera aporte a la microred.

Tabla 9 Costo por análisis de equipos

| TECNOLOGÍA | COSTO POR EQUIPO (\$) | CAPACIDAD (W) |
|------------------|-----------------------|---------------|
| PV SYSTEM | 38.000 | 50.000 |
| HID SYSTEM | 12.800 | 20.000 |
| BESS (ION LITIO) | 1200 (\$/KW) | NA |
| FUEL SYSTEM | 38.000 | 250.000 |
| CONVERSOR | 15,000 | 100 KVA |

!Costos

Cost_PV= 38.000+10.000 *!CostoPV + COSTO INVERSOR.*

Cost_MH=12.800 *!Costo MH \$/KW.*

Cost_BESS=1200+4000 *!Costo BESS \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW.*

Cost_GAS=38.000 *!Costo GAS \$/KW.*

Se toma en consideración que los escenarios son equiprobables dentro de las consideraciones del perfil de carga que se ajusta a las consideraciones de los recursos energéticos que establecen la variabilidad de la disponibilidad solar e hidráulica que son los recursos estocásticos.

3.2 Resultados y análisis de los escenarios propuestos

3.2.1 Consideración de Resultados analizados mediante potencia máxima instalada

Se consideran dos escenarios de análisis para determinar la metodología más acertada para la planificación óptima en instalación y operación que se describen a continuación: i) Escenario I se considera un problema lineal PL considerando los recursos energéticos distribuidos (GH,PV,BESS y GT) con su respectiva restricción en la GT ya que su limitante es el almacenamiento de combustible y emanación de CO₂, también existe una restricción presupuestaria en limitante de una inversión de \$150.000 que la empresa puede invertir en un proyecto por sus fuentes de energía. ii) Escenario II el planteamiento de un problema lineal de enteros mixtos se consideran unidades generadoras (GH, PV, BESS y GT) con las mismas

restricciones anteriores del escenario I. Se plantea un problema lineal ya que reduce el tiempo del resultado hacia el valor real. Los resultados obtenidos del dimensionamiento de los recursos energéticos y costos de inversión se muestran en la tabla 10.

Tabla 10 Resultados de la planificación de los recursos energéticos distribuidos.

| Escenarios | PV [KW] | BESS [KW] | GH [KW] | GT [KW] | CI [usd] |
|------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|
| I | 9.08 | 18.16 | 100 | 206.1 | \$150.000 |
| II | 28.6 | 57.2 | 100 | 300 | \$149.320 |

En la tabla 11 muestra los resultados por costos de operación tomando en consideración el consumo de combustible y emanación de gases del GT.

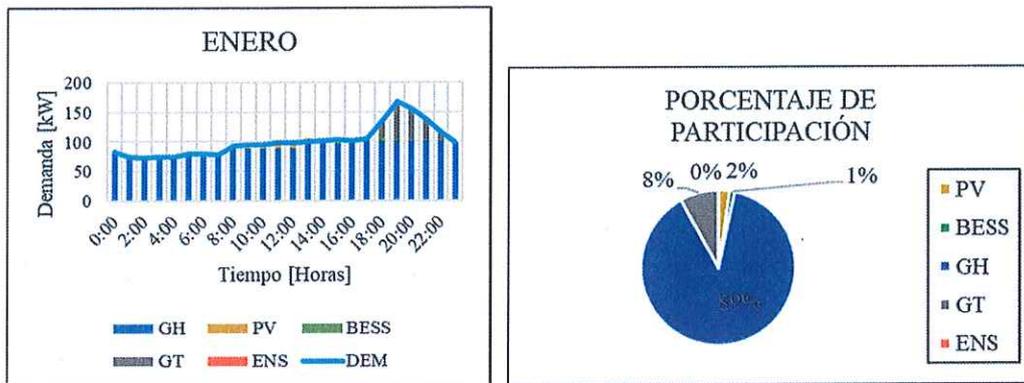
Tabla 11 Resultados de la operación

| Escenarios | Combustible [Ltrs] | CO2 [Tn] | Costo de O. [usd] |
|------------|-----------------------|-------------|----------------------|
| I | 337.86 | 1.35 | \$310.19 |
| II | 157.27 | 56.96 | \$214.23 |

3.2.2 Análisis con el mes de más alto recurso hídrico

De acuerdo con el análisis del Escenario I con el problema lineal en la figura 21 se puede observar que para el mes de enero donde de acuerdo a los datos históricos el río Quidigua posee sus más altos niveles de agua que oscila entre los 2 a 3 m/s la velocidad debido a la época invernal. Se observa que la mayor aportación de del recurso energético es GH con el 89% correspondiente al 2.146 KW, el 8% que corresponde al 0.196 KW de aporte energético de GT, 2% correspondiente al 0.055 KW de generación fotovoltaica y el 1% correspondiente al 0.025 KW de compensación por baterías BESS. Con esta planificación se garantiza que los recursos energéticos abastecerán la carga en su totalidad sin ningún porcentaje de energía no suministrada ENS 0%. Las energías de las baterías se mantienen en el 15KWh de carga para garantizar suministro emergente. Con una planificación de

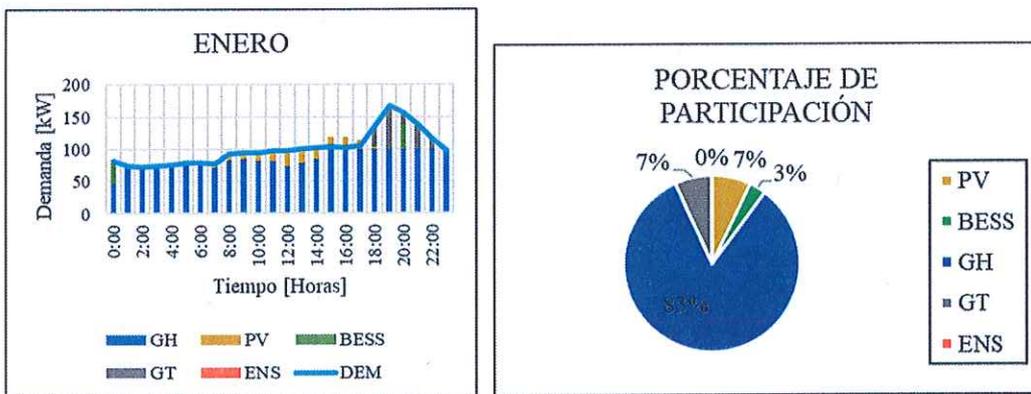
consumo de combustible de 48.98 litros de diésel y una emanación de 0.196 toneladas de CO₂



(a)

(b)

Figura 21. Escenario I de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso



(a)

(b)

Figura 22. Escenario II de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso.

En el Escenario II con la propuesta de un problema lineal de enteros mixtos para el mes con mayor cantidad de recurso hídrico que es en enero en la figura 22 se puede apreciar que el algoritmo plantea la optimización a un 83% de micro generación hidráulica que corresponde al 2.033KW, el 7% que corresponde a 0.168 KW de GT, el 7% que corresponde el 0.175KW de generación FV y el 3% que corresponde el 0.074 KW de inyección de BESS. Manteniendo de esta forma una planificación

mejorada con respecto al escenario I, de la misma firma garantiza el abastecimiento total de la demanda requería, manteniendo la energía no suministrada en un 0%, a más de ello se observa que de 16:00 a 18:00 existe vertimiento de energía que el sistema aprovechara para mantener la carga de baterías. Dentro de las condiciones de reserva de combustible se estima que se consuma 41.92 litros de diésel con una emanación de 0.16 toneladas de CO₂.

3.2.3 Análisis con el mes de más bajo recurso hídrico

Considerando el modelo PL en el escenario I la planificación de los recursos energéticos toma en consideración que para abastecer la carga del mes de junio que es la estación seca con un afluente hídrico aproximado de 1.2 m/s de velocidad del caudal del río. En la figura 23 (a) la planificación de los recursos distribuidos y en (b) el porcentaje los valores de energía que suministran al sistema. Se puede apreciar que el algoritmo de planificación considera que puede abastecer el 42% del recurso con GH que equivale a 1.180 KW, mientras que el 55% va a ser abastecido con recurso de GT que es 1.522 KW, el estocástico solar en esta estación climática puede prever el 2% de lo que necesita el sistema que corresponde el 0.064KW, mientras que el sistema BESS puede abastecer apenas el 1% del sistema eléctrico con una potencia de 0.024KW. La planificación no presenta vertimiento que pueda ser aprovechado para la carga de batería, pero el sistema de distribuido abastece la demanda necesaria sin que exista energía no suministrada. Con esta participación de GT se estima que tenga un consumo de 379.22 litros de diésel con una emanación de 1.5 toneladas de CO₂.

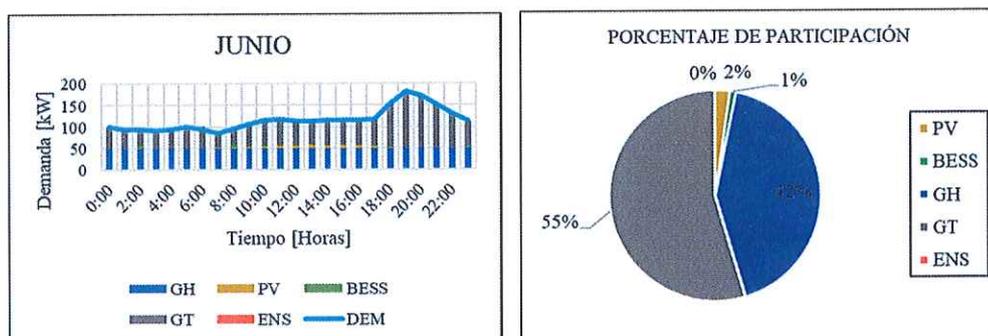


Figura 23. Escenario I de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso.

En el escenario II de acuerdo al problema lineal de enteros mixtos se puede apreciar en la figura 24 (a) la magnitud de energía eléctrica al sistema distribuido y (b) el porcentaje de los recursos energéticos. El optimizador aprovecha de mejor manera las fuentes de energía disponibles, tanto así que el 49% es de GH que corresponde a 1.417KW, el 10% es de generación FV que corresponde a 0.280 KW, el 7% es de generación BESS que corresponde a 0.197KW. Las planificaciones de los recursos distribuidos mantienen su función objetivo de aprovechar los recursos renovables hidráulicos - solares y minimizar el uso de generación térmica que se estima usar una cantidad de 279.49 litros de diésel que pueden generar 0.911 toneladas de CO₂. En todo momento la generación planificada cubre la demanda requerida y no existe inconvenientes de generación no suministrada ENS.

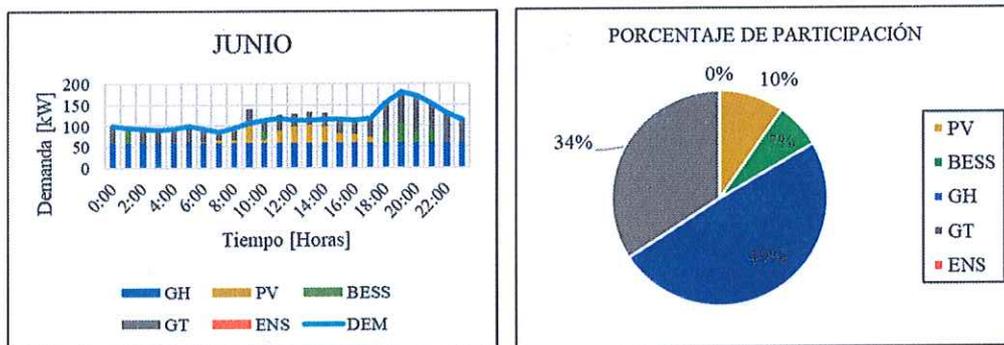


Figura 24. Escenario II de los recursos energéticos distribuidos (a) Comportamiento de los recursos energéticos de aporte en KW (b) Porcentaje de energía que aporta cada recurso.

Se estableció una metodología con dos optimizadores (I) problema lineal y (II) problema lineal de enteros mixtos y poder analizar los resultados óptimos, en ambos casos se garantiza que la energía no suministrada ENS está en el 0% es decir que los dos sistemas de optimización garantizan que los DER abastecen la demanda en todos los casos indistintamente que exista minimización en el potencial de algún recurso, la diferencia para seleccionar el problema de optimizaciones se ajusta la necesidad de basa en quien aprovecha las fuentes renovables y minimiza el uso de la GT por la emanación de gases y almacenamiento de combustible, siendo el MIOP más acertado a la necesidad local.

3.3 Resultados de la modelación con una inversión de cien mil dólares

Los resultados obtenidos mediante la modelación lineal de enteros mixtos MIOP se asemejan a las condiciones óptimas de operación e inversión se consideró también es necesario considerar un escenario con una posible inversión de \$100.000 (cien mil dólares americanos) esto con la idea de analizar una posible baja en el presupuesto de inversión inicial y analizar los resultados planificados por el optimizador.

3.3.1 Resultados obtenidos del mes de enero

Los resultados obtenidos por el optimizador de acuerdo a la planificación óptima se puede destacar en la tabla 12, se puede observar que planifica una generación FV de 11KW con una inversión de \$7.200 de acuerdo a los resultados no existe utilidad a la batería por ende el planificador no recomienda instalar un sistema de baterías, se estima instalar un sistema de microgeneración hidráulica de 100KW con una inversión de \$64.000 y un solo sistema de 150Kw de generación térmica con una inversión de \$28.500 cuyo presupuesto está dentro de las condiciones iniciales y como se puede observan en la figura 25 en el mes de enero se logra cubrir con estas condiciones de inversión la demanda requerida, así como también se observa que no existe energía de vertimiento que puede ser utilizada para carga de batería es por ello que el optimizador no considera almacenamiento BESS.

Tabla 12 Planificación de generación FV de 11 kW

| | Unidades | Potencia instalada [kW] | Costos [USD] | Costo total [USD] |
|--------------|----------|-------------------------|--------------|-------------------|
| PV | 20 | 11 | \$ 360,00 | \$ 7.200,00 |
| BESS | 0 | 0,3 | \$ 1.000,00 | \$ 300,00 |
| MH | 5 | 100 | \$ 12.800,00 | \$ 64.000,00 |
| GT | 1 | 148 | \$ 28.500,00 | \$ 28.500,00 |
| Total | | | - | \$ 100.000,00 |

En la tabla 13 se observa el aporte de potencia por equipo, donde la mayor cantidad de energía es recomendada la generación micro hidráulica con una potencia

mensual entregada de 2.144,18KW y no existe entrega de energía de baterías BESS ni energía no suministrada y se cubre la demanda de 2.420,15 KW.

Tabla 13 Aporte de potencia por equipo

| | |
|------|------------|
| PV | 67,4046 |
| BESS | 0,1995 |
| MH | 2.144,1812 |
| GT | 208,3692 |
| ENS | 0 |
| DEM | 2420,1546 |

En la figura 25 (a)(b) se puede observar los porcentajes de participación de cada una de las tecnologías siendo lo más óptimo el ingreso de la generación micro hidráulica con el 88% y un térmica del 9% una participación de la generación fotovoltaica del 3%.

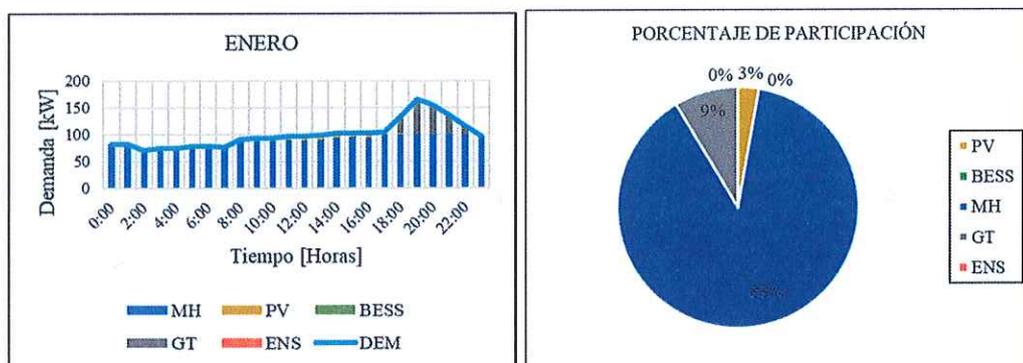


Figura 25. Participación de las diferentes tecnologías de generación.

3.3.2 Planificación de los recursos para el mes de diciembre.

En la figura 26 (a)(b) se puede observar que el planificador de acuerdo a los recursos instalados planifica que el 55% de la generación es microhidráulica MH, el 20% es de generación térmica GT y lo más crítico es que lo que se espera generar no va a cubrir la demanda que de acuerdo a los datos alcanza un máximo de 300KW siendo los meses más críticos los de noviembre, diciembre, enero y febrero en vista

que es la temporada invernal que de acuerdo con los reportes históricos son los meses de mayor índice de apagones por la condición climática.

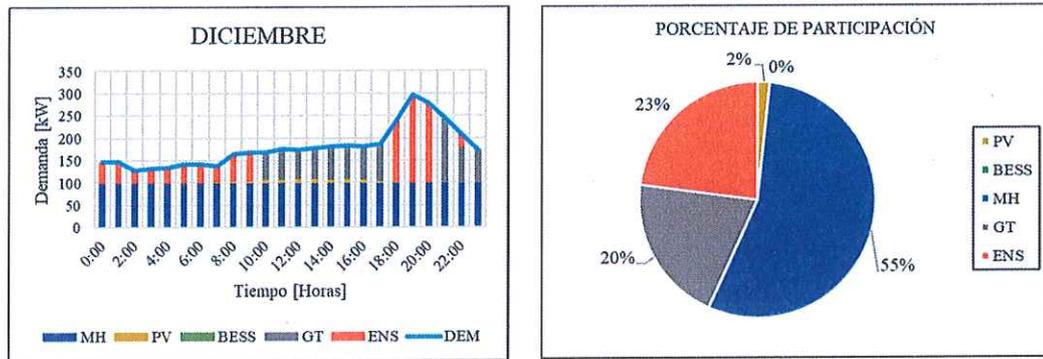


Figura 26. (a)(b) Porcentaje de participación por tecnología para suplir la demanda.

En la tabla 25 se puede apreciar la energía suministrada de cada uno de las tecnologías de generación siendo la de mayor aporte la generación micro-hidráulica MH con un aporte de 2.376,25KW y la térmica HT de 876,25KW que no cubre una demanda necesaria de 4.310,34KW existiendo un déficit de generación con una energía no suministrada ENS de 987,09KW que es el 23%.

Tabla 14 Distribución de potencia entregada por cada tecnología

| Tecnología | DICIEMBRE |
|------------|------------|
| PV | 70,7391 |
| BESS | 0 |
| MH | 2.376,2564 |
| GT | 876,2538 |
| ENS | 987,0909 |
| DEM | 4.310,3403 |

Estos mismos escenarios de falta de energía para solventar la demanda requerida se presentan en varios meses del año como son en febrero, marzo con un porcentaje que va desde el 10% hasta el 17% de energía no suministrada, es por ello que la planificación se basa en un aumento de un presupuesto controlado de \$150.000 que ya se analizó anteriormente cuyos resultados garantizan el cubrir la demanda.

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Si se analiza el potencial de los recursos energéticos se podrá aplicar un algoritmo de optimización para la planificación en la instalación y operación de una Microred Distribuida.

- De acuerdo con la planificación de los recursos energéticos disponibles en la parroquia de Pucayacu los potenciales convencionales y no convencionales son Hidráulico (MH), Solar (FV) y térmico (GT). Adicionalmente se incorpora un sistema de baterías para solventar autonomía al sistema. Considerando el mes de enero como máxima capacidad de generación hidráulica por ser época invernal, para una demanda entre 70 y 160 KW que de acuerdo con la ecuación de problema lineal (LP) planifica el 89% de generación hidroeléctrica y no planifica vertimiento por lo que las baterías (BESS) estarían sin funcionar. Con la ecuación lineal de enteros mixtos (MILP) planifica un ingreso hidráulico del 83% y planifica vertimiento que ayuda a mantener la carga de las baterías como elemento de respaldo con una participación del 3% de la demanda.
- En la evaluación del mes de junio, como más crítico por la disminución del caudal hidráulico, de acuerdo con la (LP) cubre la demanda que varía entre 100 y 200 KW con un ingreso de generación térmica del 55% de la demanda sin que exista participación de (BESS). Con la ecuación II (MILP) planifica una generación térmica del 34% con posibilidad de vertimiento que se usó para mantener la carga de los (BESS) que mantiene una participación al sistema del 7%.

Con estos análisis obtenidos de la planificación de los recursos se puede observar que con la ecuación del (MILP) se relacionan de mejor manera a la función objetivo que es minimizar el uso de (GT), Costos en la operación, Costo de inversión, emisión de CO₂. Por lo que el algoritmo de optimización cumple el objetivo de planificar los recursos en la inversión y operación que requiere la demanda.

4. CONCLUSIONES GENERALES

- De acuerdo a los estudios de campo se establecieron los potenciales de los recursos energéticos disponibles en la parroquia Pucayacu de los cuales se concluyeron que en los meses de diciembre hasta abril son los meses con mayor influencia hídrica por la estación invernal donde el río Quindigua obtiene velocidades hasta 2.5m/s aplicando el método de medición volumétrica. Con el uso del equipo PCE-SPM 1 se ejecutaron mediciones anuales y fueron validados con los datos de la NASA de los cuales se determinó un promedio de 4.5 horas pico de radiación con un promedio de 980 W/m². Mencionados recursos energéticos serán parte de la DER conjuntamente con un GT y la adición de BESS dimensionados de acuerdo al perfil de carga obtenido mediante un estudio anual de consumo del sistema eléctrico.

- Se estableció un marco metodológico de planificación óptima para redes aisladas en zonas rurales usando recursos energéticos distribuidos. Se propuso un portafolio de inversiones considerando sistemas fotovoltaicos (PV), sistemas micro hidroeléctricos (GH) de pasada, sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS), así como la implementación de un sistema de combustión (GT) cuyo sistema actuara cuando exista una interrupción en el sistema eléctrico del alimentador de Pucayacu y el sistema eléctrico abastezca entidades importantes como iluminación de emergencia, centro médico, albergue, comunicaciones con un perfil de carga que tenga un suministro mínimo de 150 KW y un máximo los 300Kw, cuyos sistemas distribuidos sean proyectados a unos 10 años.

-Para la planificación óptima se establecieron dos modelos matemáticos de optimizadores con la función objetivo de minimizar el costo de inversión y operación (1), para el escenario I aplicando un problema lineal PL nos estableció una inversión de \$150.000 cuyo costo de operación OC se estima sea de \$310,19. Para el escenario II se establece un problema de optimización lineal de enteros mixtos esto porque usamos valores binarios de la entrada de los recursos energéticos, cuyos resultados cumplen la función objetivo con una inversión de \$149.320 y el costo de operación encontrándose en \$214,23 demostrando que este es el problema más óptimo que cumple el marco práctico de un planificador al momento de tomar

decisiones, a más de ello que el sistema propuesto no posee en ningún caso energía no suministrada ENS garantizando en todo momento el suministro de energía.

- Se estableció que el algoritmo de optimización lineal mixta responde a la necesidad en la planificación de los recursos energéticos priorizando la limitación en las emisiones de CO₂ al ambiente. Tomando en consideración que para suplir la demanda el generador emanaría al ambiente 1.389 Kg de CO₂ al 100% de su potencia, mientras que el optimizador lineal en el mes de mayor estiaje se estima que enviaría 1.5 TN de CO₂ y con la optimización lineal de enteros mixtos se planifica enviar 0.91 TN de CO₂ al ambiente. De esta forma quedando validado los resultados obtenidos de los optimizadores siendo el MILP el que mejor responde a la necesidad.

RECOMENDACIONES

Se propone que de acuerdo con los datos obtenidos se puedan limitar las restricciones a las más importantes dentro de la planificación en la operación de los recursos energéticos y poder aplicar modelos de optimización moderna dentro de la inteligencia artificial y redes neuronales que permitan una solución en el tiempo más corto y valores globales que ayuden a la decisión en la implementación y análisis de costos viables.

Es importante profundizar la investigación con modelos estocásticos que permitan predecir una planificación futura del crecimiento eléctrico, así como también incorporar datos de entrada históricos.

Para que los datos a obtener sean óptimos es necesario que se incorporen mayor número variantes estocásticas por segundo a ser monitoreado los recursos energéticos por lo que es importante profundizar la investigación a la aplicación de BigData que incorpore la gran cantidad de valores numéricos por minuto esto con el objetivo de garantizar que en cualquier momento el sistema eléctrico alterno está en las condiciones de garantizar suministro eléctrico.

Es importante analizar la planificación del sistema eléctrico bajo condiciones dinámicas multinodales, para considerar una planificación de expansión de la microred distribuida. Así como también las condiciones óptimas de operación con la red convencional de suministro eléctrico

Bibliografía

- Á. P. Clavijo Reyes. (2015). *Despacho económico de una Red de Energía Eléctrica Trabajo de Profundización*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- A.Clavijo. (2015). *Desapacho Económico de una red de Energía Eléctricas Trabajo de Profundización*. Bogota.
- A.S.Carvalho, J. &. (2013). "Controllable hybrid power system based on renewable. *Energy sources for modern electrical grids*," *Renewable Energy*, vol. 53, , 271-279.
- Awinburn, F. I. (Julio de 2021). «*Sistemas de microrredes renovables*,» . Obtenido de <https://www.norvento.com/autoconsumo/microrredes/>
- D. Arango, R. U. (2017). "Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales". *Ingeniería y Ciencia*,, vol. 13, nº 25.
- D.Arango, R. y. (2017.). "Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales". *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, (pág. nº 25). Colombia.
- Energya-VM, G. V. (21 de Febrero de 2020). *Microrredes Distribuidas* . Obtenido de <https://www.energyavm.es/que-son-las-micro-redes-y-por-que-seran-importantes/>
- EPA. (2020). DATOS DEL FACTOR NACIONAL ANUAL DE EMISIONES DE LOS EE. UU DEL AÑO 2018. . *Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., Washington, D.C.*
- F. I. Ávila Swinburn. (2013). Diseño de un sistema de gestión de demanda para micro redes. En *Universidad de Chile*. Chile.
- Fico expres. (Feb.2021). *Fico expres, optimization suite avaliable*. <http://www.fico.com/en/products>.

- G.Arguello. (2018). Óptima respuesta a la demanda y despacho económico de energía eléctrica en micro redes basados en árboles de decisión estocástica. Quito.
- H. Rudnick Van De Wyngard. (2010). La Generación Eólica,. En *Energía Eolica* (págs. pp. 4-5).
- J.C. Díaz Guillen, M. J. (Septiembre 2014,). "MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES",. pág. doi:1013140/2.1.4192.8968.
- J.Jamaica. (2019). Estrategias de operación óptimas de Microrredes conectadas a la red. Santiago de Cali.
- J.Morejon. (2018). *LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN MICROREDES ELÉCTRICAS BASADO EN UN MODELO MARKOVIANO*. Quito.
- M. Vergara. (2022). Obtenido de Tecnología de baterías: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBaterias.pdf>. [Ultimo acceso: 16 01 2022]
- M.G. (2021). *ÓPTIMO CONTROL TERCARIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA*,. Quito: Universidad Politécnica salesiana. .
- M.Ruiz. (2022). *DISEÑO DE MICRO RED ELÉCTRICA PARA LABORATORIOS DE INVESTIGACION AGROPECUARIA BASADOS EN OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO*. Quito: Univerddad Politecnica Salesiana.
- Miguel S., D. A. (2022). Practical Framework for Optimal Planning of Isolated Rural Microgrids. *Energias, CENACE*, ISSN: 18761119 18761100.
- V.Alonzo&A.Aguila. (2018). *ÓPTIMA GESTIÓN Y REGULACIÓN DE VOLTAJE EN MICROREDES DE de distribucion con generacion distribuida y almacenamiento de energia*. Quito.

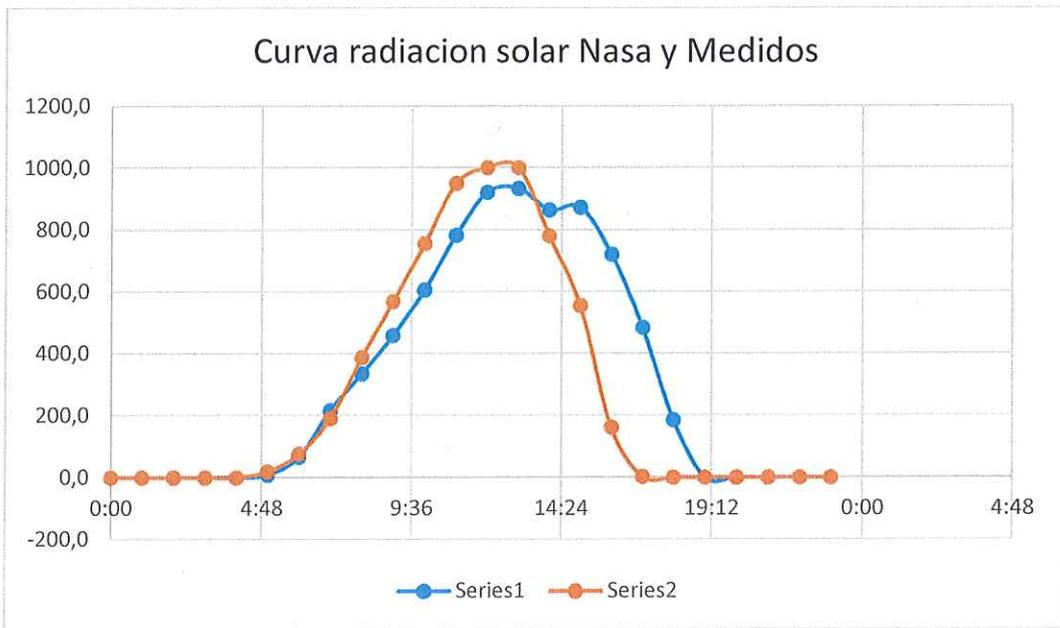
Vercelli. (17 de Octubre de 2012). *Energías como bienes comunes*. Obtenido de <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/17/que-es-la-microgeneracion-de-energias-renovables>.

W., R. (2007). *Modelos y Optimización I, 2007*. . Mexico.

Z. J. (2015). Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons. En *Aplication of Renewable Energy*,.

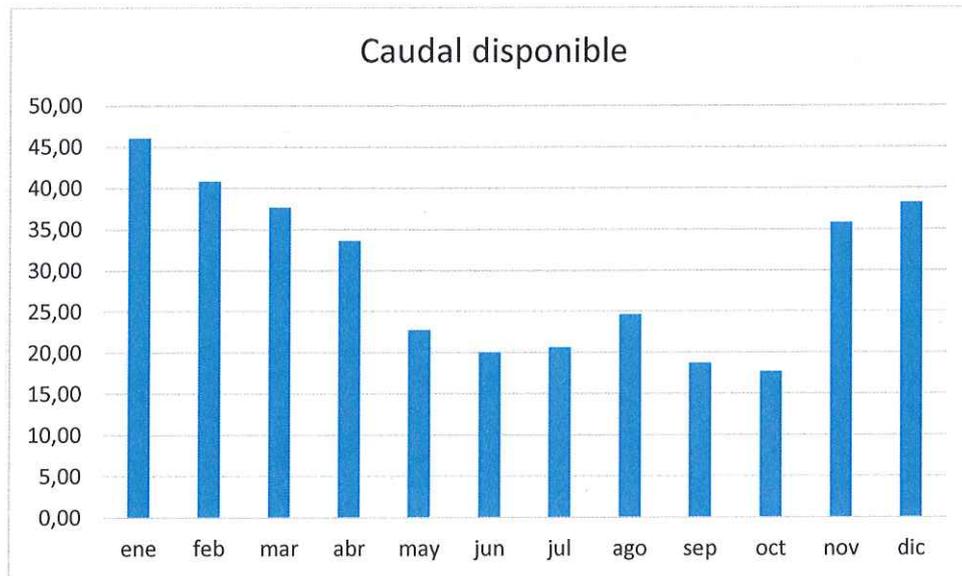
Z.Li & C.Zang, H. Y. (2016). «Agente-based distributed and economic automatic generation control for droop-controlled AC microgrids,», . *IET Generation, Transmission & Distribution* vol. 10, n° 14.

ANEXOS



| Hora | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPT | OCT | NOV | DIC | Promedio | NASA |
|----------|-------|---------|--------|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|
| 0:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 1:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 2:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 3:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 4:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 5:00 | 7,8 | 8,9 | 7,5 | 9,2 | 7,5 | 8,6 | 11 | 10,2 | 9,5 | 9,2 | 8,7 | 7,2 | 8,8 | 18,73 |
| 6:00 | 72,1 | 60,05 | 58,75 | 98,7 | 70,4 | 60,02 | 72,05 | 68,75 | 40,15 | 74,15 | 81,25 | 40,15 | 66,4 | 75,9 |
| 7:00 | 240 | 298,15 | 224,25 | 189,75 | 165 | 225 | 180 | 210 | 190 | 240 | 254 | 180 | 216,3 | 191,04 |
| 8:00 | 320 | 420 | 380 | 320 | 380 | 280 | 360 | 360 | 350 | 256 | 280 | 320 | 335,5 | 388,1 |
| 9:00 | 390 | 450 | 380 | 390 | 458 | 426 | 489 | 520 | 548 | 516 | 560 | 380 | 458,9 | 568,5 |
| 10:00 | 480 | 470 | 460 | 520 | 560 | 580 | 560 | 765 | 690 | 720 | 765 | 698 | 605,7 | 755,5 |
| 11:00 | 645 | 725 | 790 | 820 | 680 | 780 | 825 | 758 | 920 | 870 | 820 | 758 | 782,6 | 949,9 |
| 12:00 | 925 | 890 | 978 | 850 | 820 | 950 | 925 | 970 | 980 | 924 | 956 | 887 | 921,3 | 1000 |
| 13:00 | 845 | 920 | 895 | 890 | 920 | 985 | 965 | 974 | 948 | 989 | 978 | 893 | 933,5 | 1000 |
| 14:00 | 689 | 720 | 789 | 750 | 859 | 920 | 954 | 945 | 965 | 978 | 948 | 856 | 864,4 | 780,7 |
| 15:00 | 720 | 820 | 845 | 780 | 890 | 925 | 948 | 920 | 845 | 950 | 958 | 870 | 872,6 | 555,6 |
| 16:00 | 680 | 520 | 560 | 720 | 780 | 840 | 790 | 854 | 705 | 793 | 720 | 690 | 721,0 | 161,4 |
| 17:00 | 489 | 378 | 497 | 458 | 452 | 520 | 670 | 520 | 496 | 520 | 489 | 320 | 484,1 | 2,57 |
| 18:00 | 125 | 225 | 102 | 220 | 159 | 226 | 250 | 190 | 180 | 210 | 231 | 110 | 185,7 | 0 |
| 19:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 20:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 21:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 22:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| 23:00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 |
| Temp max | 24 | 23 | 24 | 23 | 23 | 30 | 28 | 29 | 30 | 29 | 30 | 26 | | |
| Temp | 20 | 19 | 20 | 18 | 18 | 23 | 21 | 24 | 24 | 23 | 24 | 20 | | |
| Temp min | 15 | 16 | 16 | 14 | 14 | 16 | 16 | 18 | 17 | 18 | 18 | 15 | | |

| | | |
|----------------|---|------------|
| ANEXO B | Datos del afluente de caudal y velocidad del rio Quindigua | 1-1 |
|----------------|---|------------|



| Horas | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|-------|--------|--------|---------|---------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 0:00 | 47,04 | 42,32 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 1:00 | 43,01 | 39,56 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 2:00 | 45,12 | 39,56 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 3:00 | 43,20 | 39,56 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 4:00 | 43,20 | 39,56 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 5:00 | 43,20 | 39,56 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 6:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 7:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 8:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 9:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 10:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 11:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 12:00 | 43,20 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 13:00 | 48,96 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 14:00 | 48,96 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 15:00 | 48,96 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 16:00 | 48,96 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 17:00 | 48,96 | 39,56 | 36,55 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 18:00 | 48,96 | 43,24 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 19:00 | 48,96 | 43,24 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 20:00 | 48,96 | 43,24 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 21:00 | 48,96 | 45,08 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 22:00 | 48,96 | 45,08 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| 23:00 | 48,96 | 45,08 | 38,77 | 33,61 | 22,80 | 20,06 | 20,67 | 24,68 | 18,77 | 17,71 | 35,81 | 38,26 |
| | 46,072 | 40,825 | 37,6594 | 33,6088 | 22,8 | 20,064 | 20,672 | 24,6848 | 18,772 | 17,708 | 35,808 | 38,256 |

PROGRAMACIÓN LP

```

model "Microred"
  uses "mmxprs","mmsheet"
  parameters
    Data = 'Data.xlsx'
  end-parameters

  declarations
    !PV
    Irradiancia: array(1..24,1..12) of real
    TempC: array(1..24,1..12) of real
    Dem: array(1..24,1..12) of real
    !MH
    v: array(1..24,1..12) of real
  end-declarations

  initialisations from 'mmsheet.excel:'+Data
    Irradiancia as "skiph;noindex;Irrad"
    TempC as "skiph;noindex;TempC"
    v as "skiph;noindex;v"
    Dem as "skiph;noindex;Dem"
  end-initialisations

  declarations
    T= 24
    M= 12
    !PV System
    NT=0.0036 !Rendimiento termico del panel
    PVmax= 0.55 !Pmáx panel 550w
    Npv= 888 !Cantidad de paneles fotovoltaicos !existe un área disponible de 2800 lo que da
    aproximadamente capacidad para 888 paneles

    !Micro Hydro System
    g=9.8 !m/s2
    h=20 ! metros
    densidad=997 !kg/m3
    Area=0.071 !Area de agua turbinado en m2
    n_turbina= 0.7 !Eficiencia turbina
    n_genMH=0.97 ! Eficiencia de generador electrico
    MHmax= 20 !20 kW

    !BESS
    BM=10000000000

    !COMBUSTIBLE
    k=0.001 !Emisión TON/kwh
    PTmax= 300 !148 kW
    CapacidadDiesel=1000 !Capacidad de almacenamiento de 1000 ltr

    !Inversor eficiencia
    n_inv=0.95 !Eficiencia inversor

```

```

!COSTOS de inversion
Cost_PV= 360 !Costo panel
Cost_MH= 12800 !Costo turbina
Cost_BESS= 500 !Costo baterias $/KW
Cost_T= 38000 !Costo generador a diesel

!Costos de operacion
Cost_PD_BESS= 0!0.00114 !Costo de descarga bess
Cost_curt_PV= 0.05
Cost_OP_PDiesel= 0.674 !Costo combustible $/litr
Cost_CO2= 60.78 !Costo emision CO2 USD/TON
C_ENS= 100
FRC= 0.298315552
BUDGET=150000

```

```

x,y,z: mpvar
balance: array(1..T,1..M) of linctr
ENS:array(1..T,1..M) of mpvar
PV,PV_curt:array(1..T,1..M) of mpvar
MH,MH_curt:array(1..T,1..M) of mpvar
PT_MH:array(1..T,1..M) of real
PT:array(1..T,1..M) of mpvar
E0, BESS_installed: mpvar
E,PC_BESS,PD_BESS,B: array(1..T,1..M) of mpvar
Eco2,f,f_d: array(1..T,1..M) of mpvar
PV_sol,PV_curt_sol:array(1..T,1..M) of real
MH_sol,MH_curt_sol:array(1..T,1..M) of real
PT_sol:array(1..T,1..M) of real
ENS_sol: array(1..T,1..M) of real
CO_sol,CI_sol,E0_sol: real
PD_sol,PC_sol: array(1..T,1..M) of real
U: array(1..4) of real
PI: array(1..4) of real
end-declarations

```

```

forall (m in 1..M) do
  forall (t in 1..T) do

```

```

    BESS_installed<=2*PVmax*x
    !FOTOVOLTAICO
    x is integer
    PV(t,m)=x*PVmax*((Irradiancia(t,m)/1000)*(1-NT*(TempC(t,m)-25))*n_inv)-
    PV_curt(t,m)
    PV(t,m)<=PVmax*x
    PV(t,m)>=0

```

```

!MICROHIRO
  y is integer
  y<=5
  PT_MH(t,m):=g*densidad*h*v(t,m)*Area*n_turbina*n_genMH/1000
  MH(t,m)<=PT_MH(t,m)*y
  MH(t,m)<=MHmax*y

```

!COMBUSTIBLE

```
z is_binary
if (t>=2) then
  f(t,m)=f(t-1,m)-f_d(t,m)
else
  f(t,m)=CapacidadDiesel-f_d(t,m)
end-if
f(t,m)<=CapacidadDiesel
f(t,m)>=0
f_d(t,m)=PT(t,m)*0.249
Eco2(t,m)=(k*PT(t,m))
PT(t,m)<=PTmax*z
PT(t,m)>=0
```

!BESS

```
E0=0.9*BESS_installed
if (t>=2) then
  E(t,m)=E(t-1,m)-PD_BESS(t,m)/n_inv+PC_BESS(t,m)*n_inv
else
  E(t,m)=E0-PD_BESS(t,m)/n_inv+PC_BESS(t,m)*n_inv
end-if
```

B(t,m) is_binary

```
E(t,m)<=0.9*BESS_installed
E(t,m)>=0.2*BESS_installed
PD_BESS(t,m)<=(1-B(t,m))*BM
PD_BESS(t,m)>=0
PC_BESS(t,m)<=B(t,m)*BM
PC_BESS(t,m)>=0
```

!ENS

```
ENS(t,m)<=Dem(t,m)
ENS(t,m)>=0
```

!Balance

```
balance(t,m):= PV(t,m)+MH(t,m)+PT(t,m)+PD_BESS(t,m)- Dem(t,m)-
ENS(t,m)+PC_BESS(t,m)
```

!Budget

```
x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS<=BUDGET
x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS>=0
```

end-do

end-do

!Objetive funcion

```
CI:=(T*FRC/8760)*(x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS)
CO:= sum(s in 1..M)(sum(i in 1..T)(ENS(i,s)*C_ENS+PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV+PD_BESS(i,s)*Cost_PD_BESS+f_d
(i,s)*Cost_OP_PDiesel+Eco2(i,s)*Cost_CO2))*(1/M)
```

```

setparam("XPRS_MIPRELSTOP",0.001)
minimise(CI+CO)

function getmipgap: real
    bestsol:=getparam("XPRS_MIPBESTOBJVAL")
    bestbd:=getparam("XPRS_BESTBOUND")
    returned:=if(bestbd<0,      abs((bestsol-bestbd)/bestbd),if(bestsol-bestbd<0,
INFINITY,0))
end-function

Gap:=getmipgap*100
T_S:=getparam("XPRS_TIME")

CI_sol:=getsol(CI*8760/(T*FRC))
CO_sol:=getsol(CO)
ENS1_sol:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s))/M)
ENS2_sol:=getsol(100*(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s))/M)/(sum(i in 1..T,s in
1..M)(Dem(i,s))/M))
PV_installed_sol:=getsol(x)
PV_installed_sol2:=getsol(x*PVmax)
E0_sol:=getsol(BESS_installed)
MH_installed_sol:=getsol(y)
MH_installed_sol2:=getsol(y*MHmax)
PT_installed_sol:=getsol(z)
PT_installed_sol2:=getsol(z*PTmax)

writeln("Results:")
writeln("Objective value is: ", getobjval)
writeln("GAP value is: ", Gap)
writeln("Investment cost: $", CI_sol)
writeln("Expected operating costs: $", CO_sol)
writeln("Expected daily ENS: ", ENS1_sol," kW - ", ENS2_sol," %")
writeln("1) Number of PV panel installed: ", PV_installed_sol," - Total capacity of PV
installed: ", PV_installed_sol2,"kW")
writeln("2) Total capacity of BESS installed: ", E0_sol," kW")
writeln("3) Number of MH installed: ", MH_installed_sol," - Total capacity of MH installed:
", MH_installed_sol2,"kW")
writeln("4) Number of GT installed: ", PT_installed_sol," - Total capacity of MH installed:
", PT_installed_sol2,"kW")

forall (m in 1..M) do
    forall (t in 1..T) do
        PV_sol(t,m):=getsol(PV(t,m))
        PD_sol(t,m):=getsol(PD_BESS(t,m))
        PC_sol(t,m):=getsol(PC_BESS(t,m))
        E_sol(t,m):=getsol(E(t,m))
        MH_sol(t,m):=getsol(MH(t,m))
        PT_sol(t,m):=getsol(PT(t,m))
        ENS_sol(t,m):=getsol(ENS(t,m))
    end-do
end-do

```

```
U(1):=getsol(x)
U(2):=0
U(3):=getsol(y)
U(4):=getsol(z)
```

```
PI(1):=PV_installed_sol2
PI(2):=E0_sol
PI(3):=MH_installed_sol2
PI(4):=PT_installed_sol2
```

```
initialisations to 'mmsheet.excel:'+Data
```

```
PV_sol      as "skiph;grow;noindex;PV_sol"
PC_sol      as "skiph;grow;noindex;PC_sol"
PD_sol      as "skiph;grow;noindex;PD_sol"
E_sol       as "skiph;grow;noindex;BESS"
MH_sol      as "skiph;grow;noindex;HYD_sol"
PT_sol      as "skiph;grow;noindex;PT_sol"
ENS_sol     as "skiph;grow;noindex;ENS"
U           as "skiph;grow;noindex;U"
PI          as "skiph;grow;noindex;PI"
```

```
end-initialisations
end-model
```

| | | |
|---------|-------------------------------------|-----|
| ANEXO D | MODELACION LINEAL DE ENTEROS MIXTOS | 1-1 |
|---------|-------------------------------------|-----|

```

model "Microred"
uses "mmxprs","mmsheet"
parameters
  Data = 'Data.xlsx'
end-parameters

declarations
!PV
Irradiancia: array(1..24,1..12) of real
TempC: array(1..24,1..12) of real
Dem: array(1..24,1..12) of real
!MH
v: array(1..24,1..12) of real

end-declarations

initialisations from 'mmsheet.excel:'+Data
Irradiancia as "skiph;noindex;Irrad"
TempC as "skiph;noindex;TempC"
v as "skiph;noindex;v"
Dem as "skiph;noindex;Dem"
end-initialisations

declarations
T= 24
M= 12

!PV System
NT=0.0036 !Rendimiento termico del panel
PVmax= 0.55 !Pmáx panel 550w
Npv= 888 !Cantidad de paneles fotovoltaicos !existe un area disponible de 2800 lo que
da aproximadamente capacidad para 888 paneles

!Micro Hydro System
g=9.8 !m/s2
h=20 ! metros
densidad=997 !kg/m3
Area=0.071 !Area de agua turbinado en m2
n_turbina= 0.7 !Eficiencia turbina
n_genMH=0.97 ! Eficiencia de generador electrico
MHmax= 20 !20 kW

!BESS
BM=10000000000

!COMBUSTIBLE
k=0.001 !Emisión TON/kwh
PTmax= 300 !148 kW
CapacidadDiesel=1000 !Capacidad de almacenamiento de 1000 ltr

!Inversor eficiencia
n_inv=0.95 !Eficiencia inversor

```

```

!COSTOS de inversion
Cost_PV= 360 !Costo panel
Cost_MH= 12800 !Costo turbina
Cost_BESS= 500 !Costo baterias $/KW
Cost_T= 38000 !Costo generador a diesel

!Costos de operacion
Cost_PD_BESS= 0!0.00114 !Costo de descarga bess
Cost_curt_PV= 0.05
Cost_OP_PDiesel= 0.674 !Costo combustible $/ltr
Cost_CO2= 60.78 !Costo emisión CO2 USD/TON
C_ENS= 100
FRC= 0.298315552
BUDGET=150000

x,y,z: mpvar
balance: array(1..T,1..M) of linctr
ENS:array(1..T,1..M) of mpvar
PV,PV_curt:array(1..T,1..M) of mpvar
MH,MH_curt:array(1..T,1..M) of mpvar
PT_MH:array(1..T,1..M) of real
PT:array(1..T,1..M) of mpvar
E0, BESS_installed: mpvar
E,PC_BESS,PD_BESS,B: array(1..T,1..M) of mpvar
Eco2,f,f_d: array(1..T,1..M) of mpvar
PV_sol,PV_curt_sol:array(1..T,1..M) of real
MH_sol,MH_curt_sol,fd_sol2,Eco2_sol2:array(1..T,1..M) of real
PO: array(1..2) of real
CPO: array(1..2) of real
PT_sol:array(1..T,1..M) of real
ENS_sol: array(1..T,1..M) of real
CO_sol,CI_sol,E0_sol: real
PD_sol,PC_sol: array(1..T,1..M) of real
U: array(1..4) of real
PI: array(1..4) of real
end-declarations

forall (m in 1..M) do
  forall (t in 1..T) do

    BESS_installed>=2*PVmax*x
!FOTOVOLTAICO
    x is_integer
    PV(t,m)=x*PVmax*((Irradiancia(t,m)/1000)*(1-NT*(TempC(t,m)-25)))n_inv-
    PV_curt(t,m)
    PV(t,m)<=PVmax*x
    PV(t,m)>=0

!MICROHIRO
    y is_integer
    y<=5

```

```

PT_MH(t,m):=g*densidad*h*v(t,m)*Area*n_turbina*n_genMH/1000
MH(t,m)<=PT_MH(t,m)*y
MH(t,m)<=MHmax*y

!COMBUSTIBLE
z is_binary
if (t>=2) then
  f(t,m)=f(t-1,m)-f_d(t,m)
else
  f(t,m)=CapacidadDiesel-f_d(t,m)
end-if
f(t,m)<=CapacidadDiesel
f(t,m)>=0
f_d(t,m)=PT(t,m)*0.249
Eco2(t,m)=(k*PT(t,m))
PT(t,m)<=PTmax*z
PT(t,m)>=0

!BESS
E0=0.9*BESS_installed
if (t>=2) then
  E(t,m)=E(t-1,m)-PD_BESS(t,m)/n_inv+PC_BESS(t,m)*n_inv
else
  E(t,m)=E0-PD_BESS(t,m)/n_inv+PC_BESS(t,m)*n_inv
end-if

B(t,m) is_binary

E(t,m)<=0.9*BESS_installed
E(t,m)>=0.2*BESS_installed
PD_BESS(t,m)<=(1-B(t,m))*BM
PD_BESS(t,m)>=0
PC_BESS(t,m)<=B(t,m)*BM
PC_BESS(t,m)>=0

!ENS
ENS(t,m)<=Dem(t,m)
ENS(t,m)>=0

!Balance
balance(t,m):=          PV(t,m)+MH(t,m)+PT(t,m)+PD_BESS(t,m)=          Dem(t,m)-
ENS(t,m)+PC_BESS(t,m)

!Budget
x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS<=BUDGET
x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS>=0

end-do
end-do

!Objetivo funcion
CI:=(T*FRC/8760)*(x*Cost_PV+y*Cost_MH+z*Cost_T+BESS_installed*Cost_BESS)

```

```
CO:=sum(s in 1..M)(sum(i in 1..T)(ENS(i,s)*C_ENS+PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV+PD_BESS(i,s)*Cost_PD_BESS+f_d(i,s)*Cost_OP_PDiesel+Eco2(i,s)*Cost_CO2))*(1/M)
```

```
setparam("XPRS_MIPRELSTOP",0.001)
minimise(CI+CO)
```

```
function getmipgap: real
    bestsol:=getparam("XPRS_MIPBESTOBJVAL")
    bestbd:=getparam("XPRS_BESTBOUND")
    returned:=if(bestbd<>0, abs((bestsol-bestbd)/bestbd),if(bestsol-bestbd<>0,
INFINITY,0))
end-function
```

```
Gap:=getmipgap*100
T_S:=getparam("XPRS_TIME")
```

```
CI_sol:=getsol(CI*8760/(T*FRC))
CO_sol:=getsol(CO)
ENS1_sol:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s))/M)
ENS2_sol:=getsol(100*(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s))/M)/(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Dem(i,s))/M))
PV_installed_sol:=getsol(x)
PV_installed_sol2:=getsol(x*PVmax)
E0_sol:=getsol(BESS_installed)
MH_installed_sol:=getsol(y)
MH_installed_sol2:=getsol(y*MHmax)
PT_installed_sol:=getsol(z)
PT_installed_sol2:=getsol(z*PTmax)
fd_sol:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(f_d(i,s))/M)
Eco2_sol:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Eco2(i,s))/M)
fd_sol1:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Cost_OP_PDiesel*f_d(i,s))/M)
Eco2_sol1:=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Cost_CO2*Eco2(i,s))/M)
```

```
writeln("Results:")
writeln("Objective value is: ", getobjval)
writeln("GAP value is: ", Gap)
writeln("Investment cost: $", CI_sol)
writeln("Expected operating costs: $", CO_sol)
writeln("Expected daily ENS: ", ENS1_sol," kW - ", ENS2_sol," %")
writeln("1) Number of PV panel installed: ", PV_installed_sol," - Total capacity of PV installed: ", PV_installed_sol2,"kW")
writeln("2) Total capacity of BESS installed: ", E0_sol," kW")
writeln("3) Number of MH installed: ", MH_installed_sol," - Total capacity of MH installed: ", MH_installed_sol2,"kW")
writeln("4) Number of GT installed: ", PT_installed_sol," - Total capacity of MH installed: ", PT_installed_sol2,"kW")
```

```
forall (m in 1..M) do
    forall (t in 1..T) do
        PV_sol(t,m):=getsol(PV(t,m))
```

```

        PD_sol(t,m):=getsol(PD_BESS(t,m))
        PC_sol(t,m):=getsol(PC_BESS(t,m))
        E_sol(t,m):=getsol(E(t,m))
        MH_sol(t,m):=getsol(MH(t,m))
        PT_sol(t,m):=getsol(PT(t,m))
        ENS_sol(t,m):=getsol(ENS(t,m))
        fd_sol2(t,m):=getsol(f_d(t,m))
        Eco2_sol2(t,m):=getsol(Eco2(t,m))
    end-do
end-do

U(1):=getsol(x)
U(2):=0
U(3):=getsol(y)
U(4):=getsol(z)

PI(1):=PV_installed_sol2
PI(2):=E0_sol
PI(3):=MH_installed_sol2
PI(4):=PT_installed_sol2

PO(1):=fd_sol
PO(2):=Eco2_sol
CPO(1):=fd_sol1
CPO(2):=Eco2_sol1

initialisations to 'mmsheet.excel:'+Data
    PV_sol      as "skiph;grow;noindex;PV_sol"
    PC_sol      as "skiph;grow;noindex;PC_sol"
    PD_sol      as "skiph;grow;noindex;PD_sol"
    E_sol       as "skiph;grow;noindex;BESS"
    MH_sol      as "skiph;grow;noindex;HYD_sol"
    PT_sol     as "skiph;grow;noindex;PT_sol"
    ENS_sol     as "skiph;grow;noindex;ENS"
    U           as "skiph;grow;noindex;U"
    PI         as "skiph;grow;noindex;PI"
    PO         as "skiph;grow;noindex;PO"
    CPO        as "skiph;grow;noindex;CPO"
    fd_sol2    as "skiph;grow;noindex;FD"
    Eco2_sol2  as "skiph;grow;noindex;ECO"
end-initialisations
end-model

```

MEGA POWER

Diesel Generating Set

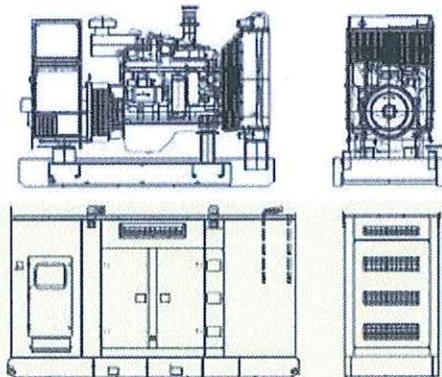
Powered by  Perkins**MP-185P-60****General Features**

- Engine (PERKINS 1106A-70TAG2), Radiator 50°C max, belt driven fans, with safety guard
- 24V charge alternator
- Alternator (Stamford, Leroy Somer & Mecc Alte for option), single bearing alternator IP23, insulation class H/H
- Skid and vibration isolators
- Dry type air filter, fuel filter, oil filter
- Main line circuit breaker
- Standard control panel
- Two 12V batteries, rack and cable
- Ripple flex exhaust pipe, exhaust siphon, flange, industrial muffler

PHOTO FOR REFERENCE ONLY

**Technical Data**

| | |
|----------------------------|--------------|
| Output Frequency | 60 Hz |
| Rated Speed | 1800RPM |
| Prime Power | 168KVA/134KW |
| Standby Power | 185KVA/148KW |
| Rated Voltage | 440/254V |
| Phase | 3 |
| Power Factor | 0.8 |
| Fuel Consumption 100% Load | 38.2L/Hr |
| Fuel Consumption 75% Load | 29.1L/Hr |
| Fuel Consumption 50% Load | 19.1L/Hr |
| Operation Altitude | <1000m |
| Ambient Temperature | <50°C |

**Dimension and Weight**

| Genset Type | Open Frame | Soundproof |
|-------------------|------------|------------|
| Length(L) (mm) | 2420 | 3300 |
| Width(W) (mm) | 990 | 1150 |
| Height(H) (mm) | 1650 | 1900 |
| Gross Weight (kg) | 1652 | 2402 |

| | | |
|---------|--|-----|
| ANEXO F | CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL GENERADOR HIDRÁULICO | 1-1 |
|---------|--|-----|

20KW DOBLE BOQUILLA



| Water Turbine | | Parámetros Principales | | Doble Boquilla |
|---------------|--------------------------|------------------------|----------|---|
| No. | Artículos | Parámetros | | Observaciones |
| 1 | Modelo | FHJ30-20SCTF4/6-Z | | |
| 2 | Caída | 30 a 45 | (Metros) | |
| 3 | Velocidad de circulación | 60 hasta 100 | (L / s) | |
| 4 | Salida | 20000 | (W) | |
| 5 | Eficiencia | 70 | (%) | |
| 6 | Diámetro de tubería | 250-300 | (Mm) | |
| Generador | | | | |
| No. | Artículos | Parámetros | | Observaciones |
| 1 | Modelo | SF20-4 | | Rear Tierra generador de imanes permanentes |
| 2 | Estilo | PMG | | |
| 3 | Salida | 20000 | (W) | |
| 4 | Voltaje | 400 | (V) | |
| 5 | Corriente | 50 | (A) | |
| 6 | Frecuencia | 50-60 | (HZ) | |
| 7 | Velocidad de rotación | 1500 | (RPM) | |
| 8 | Fase | Hay | (Fase) | |
| 9 | Factor de Potencia | 1,0 | | |
| 10 | Altitud | ≤ 3000 | (Metros) | |
| 11 | Grado de aislamiento | B / B | | |
| 12 | Grado de protección | IP44 | | |
| 13 | Temperatura | -25 ~ +50 | °C | |
| 14 | Humedad Relativa | ≤ 90 | % | |

| | | |
|---------|--|-----|
| ANEXO G | CAUDALES DEL RECURSO HIDRICO, RIO QUINDIGUA | 1-1 |
|---------|--|-----|



Época de bajo caudal junio, Julio, agosto, septiembre



Época de bajo caudal diciembre, enero , febrero, marzo.