



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

Algoritmo de Optimización para el despacho económico de una micro red distribuida.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autora:
Amores Moreno Ana Gabriela

Tutor:
Mullo Quevedo Álvaro Santiago Msc.

LATACUNGA –ECUADOR

2022

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “**Algoritmo de Optimización para el despacho económico de una micro red distribuida.**” presentado por Amores Moreno Ana Gabriela, 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, Mayo, 13, 2022



Alvaro Mullo Quevedo Msc.
CC. 0502768542

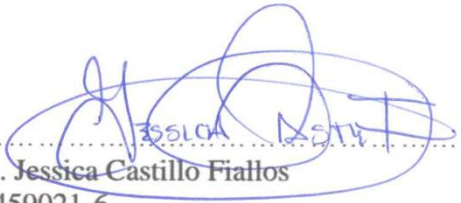
AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “**Algoritmo de Optimización para el despacho económico de una micro red distribuida.**”, 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.

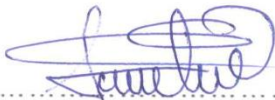
Latacunga, Mayo, 13, 2022



.....
Msc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez
050349370-2
Presidente del tribunal



.....
Msc. Jessica Castillo Fiallos
060459021-6
Lector 2



.....
Msc. Carlos Iván Quinatoa Caiza
050328786-4
Lector 3

DEDICATORIA

Este escalón va dedicado a mi pequeña Victoria y a Fernando mi esposo, quienes aportaron con su amor y comprensión, impulsándome a levantarme cada día siendo perseverante en los objetivos planteados, gracias amores míos por siempre creer en mí, son mi motivación para luchar por llegar tan lejos cada día de mi vida.

Ana Gabriela

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitir levantarme cada día, a Miguel y Lidia mis padres por brindarme siempre su apoyo incondicional sin importar lo que pase, a mi hermano Miguel por su ayuda y paciencia, a mi amado esposo Fernando por ser el mejor compañero de vida, a mi muñequita Victoria , a ustedes mi familia quienes han sido motor y motivo para la culminación de esta importante parte de vida y por estar allí siempre que los he necesitado, a mi tutor con quien pude sacar a flote este proyecto para el desarrollo de mi ser como persona y como profesional.

Ana Gabriela Amores Moreno

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

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

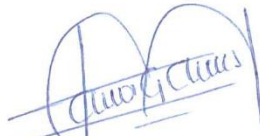


Latacunga, Mayo, 13, 2022

.....
Ana Gabriela Amores Moreno
CC: 050324961-7

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, Mayo, 13, 2022

.....
Ana Gabriela Amores Moreno
CC: 050324961-7

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “**Algoritmo de Optimización para el despacho económico de una micro red distribuida.**” contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, Mayo, 13, 2022



Msc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez
050349370-2

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

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

Título: Algoritmo de Optimización para el despacho económico de una micro red distribuida.

Autor: Amores Moreno Ana Gabriela

Tutor: Mullo Quevedo Álvaro Msc.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación establece la aplicación de un algoritmo de optimización para generación distribuida considerando de manera inicial paneles fotovoltaicos (FV), baterías (BESS), generador eólico (WT) y generador térmico (DGS), el mismo permite realizar una planificación óptima tanto en la implementación como en el despacho de energía considerando que el costo máximo de implantación es \$6.000, costos por emanación de CO₂ y combustible, la programación se lo realizó mediante el software FICO XPRES, el caso de estudio es la carga de una Hostería en sector de Mulaló. Se toman en consideración las medidas adquiridas en el lapso de un año de los recursos renovables. Se consideran dos ecuaciones: La primera consiste en una ecuación basada en la sumatoria de máximas potencias, los resultados obtenidos muestran que el mes más crítico es en agosto ya que el (DGS) aporta con 382,56 KWh al mes, es decir 48% de la energía suministrada generando 177,14 Kg de CO₂. La segunda ecuación consiste en aplicar un algoritmo de enteros mixtos que planifica un aporte de (DGS) de 63KWh al mes, generando 27,7 Kg de CO₂, existiendo una reducción del 83%. En el mes de febrero el optimizador planifica el recurso exclusivo de energía renovable, los costos de penalización por emanación de gases y uso de combustibles bajan de \$5,81 a \$0,34 por día, en los dos casos de simulación no considera generación FV.

PALABRAS CLAVE: Micro red distribuida; planificación óptima; optimización estocástica; red aislada.

**UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO**

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

Topic: "Optimization algorithm for a distributed micro network economic dispatch".

Author: Amores Moreno Ana Gabriela

Tutor: Álvaro Mullo Quevedo Msc.

ABSTRACT

The actual research work establishes an optimization algorithm application for distributed generation, by considering initial way, photovoltaic panels (FV), batteries (BESS), wind generator (WT) and thermal generator (DGS), the same allows making an optimal planning, both into implementation as in the energy dispatch, considering, what the implementation maximum cost is \$6,000, costs for CO2 emission and combustible, the programming was performed, through the FICO XPRES software, the study case is the a Hostel charge into Mulaló sector. It was taken into consideration the measures acquired within a renewable resources year. It is considered two equations: The first consists an equation based about the maximum powers add, the got results show, what the most critical month is in August, since the (DGS) contributes with 382.56 KWh to month, that is, the 48% from supplied energy, generating 177.14 Kg of CO2. The second equation consists of applying a mixed integer algorithm, which plans 63KWh (DGS) contribution to month, generating 27.7 Kg of CO2, with a 83% reduction. Into February month, the optimizer plans the renewable energy exclusive resource, the penalty costs for gas emission and combustible use fall from \$5.81 to \$0.34 by day, into two simulation cases do not consider PV generation.

KEYWORDS: Distributed micro network, optimal planning, stochastic optimization, isolated red.

Yo, Marco Paul Beltrán Semblantes con cédula de identidad número:0502666514 Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "**Algoritmo de optimización para el despacho económico de una micro red distribuida**" de: Amores Moreno Ana Gabriela, aspirante a Magister en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



Mg. Marco Paul Beltrán Semblantes
0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

Latacunga, mayo, 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema.....	2
Objetivo General.....	2
Objetivos Específicos.....	2
Justificación.....	4
Hipótesis.....	5
CAPÍTULO I.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEORICA- METODOLOGICA	6
1.1 Antecedentes de la investigación	6
1.2 Fundamentación Teórica.....	9
1.2.1 Microgeneración Distribuida.....	9
1.2.2 Características micro generación distribuida	9
a) Mejorar la fiabilidad y sustentabilidad del sistema eléctrico	9
b) Reducir las pérdidas en la red eléctrica.....	9
c) Potencias reducidas	10
1.2.3 Esquema general de la microgeneración distribuida.....	10
a) Microgeneración distribuida de un sistema aislado	11
b) Microgeneración distribuida de un sistema conectado a red	12
1.3 Micro redes eléctricas	13
1.3.1 Cómo funcionan las micro redes.....	14
1.3.2 Estructura y elementos de una Micro red.....	14
1.4 Micro red conectada a la red	15
1.4.1 Ventajas de las micro redes.....	16
1.5 Energía Fotovoltaica	17
1.5.1 Energía Eólica	17
1.5.2 Sistemas de almacenamiento de energía.....	18
1.5.2 Demanda Eléctrica en micro redes.....	18
CAPITULO II	25
2.1 Título del proyecto:	25
2.2 Objetivo del Proyecto.....	25

2.3 Justificación.....	25
2.4 Descripción de la propuesta.	27
2.4.1 Estudio de la potencia requerida.	29
.....	30
2.4.2 Análisis del potencial energético solar.....	31
2.2.3 Panel Fotovoltaico considerado para el estudio.....	32
2.2.3.1 Modelado del funcionamiento del panel fotovoltaico.....	33
2.4.3 Análisis del potencial energético eólico.....	35
2.4.4 Datos adquiridos de velocidad del viento.	35
2.4.4.1 Proyección de la velocidad el viento a 15 metros de instalación.	36
2.4.5 Aerogenerador seleccionado para la implementación y modelación.....	38
2.4.6. Implementación de la batería de almacenamiento de energía.....	40
2.6.7 Incorporación de un generador térmico	41
2.7 Metodología de optimización propuesta	42
2.7.1 Modelo considerando el dimensionamiento de las tecnologías para una implementación técnicamente económica.....	42
2.7.1.2. Modelos el portafolio de inversión (BESS)[31].	44
2.7.1.3. Modelos del portafolio de inversión (Turbina eólica)[31].	45
2.7.1.4. Modelos del portafolio de inversión (Generador térmico)[31].	46
2.7.1.4. Función objetivo del costo de inversión [31].....	47
2.7.2. Función objetivo de la gestión del recurso energético mediante modelo estocástico [31].....	49
CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO II.....	51
CAPITULO 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 Programación del problema de optimización estocástica.	52
3.1.3 Costos considerados para las variables de ingreso al SOP	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 de optimización en la gestión de recursos en el año considerando meses de máximo y mínimo consumo.	56
a) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de febrero. -	56
b) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de agosto.	57
c) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de diciembre.	58
3.2.3 Análisis de despacho económico de los recursos energéticos	59
3.3 Aplicación del algoritmo estocástico de probabilidades	60
3.3.1 Consideración de Resultados analizados mediante algoritmo estocástico en condiciones de costo por unidades.	60
3.3.2 Análisis de resultados obtenidos de acuerdo a meses de estudio.	61
a) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de febrero.	61
b) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de agosto.	62
c) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de diciembre.	63
3.3.3 Análisis de despacho económico de los recursos energéticos	65
3.4 Análisis del recurso energético considerando eliminar el generador térmico.	65
3.4.1 Consideraciones técnicas que establece el optimizador	66
3.4.2 Análisis económico del sistema sin considerar GGS	67
3.5 Validación de resultados	70
3.5.1 Validación de resultados de impacto ambiental	70
3.5.2 Análisis técnico – económico.	71
3.6 Conclusiones el capítulo	73
4. CONCLUSIONES GENERALES	74
5. RECOMENDACIONES.	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de la microgeneración distribuida	11
Figura 2. Esquema general de microgeneración distribuida asilada	12
Figura 3. Esquema general de microgeneración distribuida conectada a red	13
Figura 4. Ejemplo de micro red [12].....	14
Figura 5. Unidades de una Micro red [13].	15
Figura 6. Diagrama de una Micro red con base ERNC [15].....	16
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso	23
Figura 8. Cabañas de descanso "Relax"	27
Figura 9. Diagrama esquemático de la Micro generación Distribuida.....	28
Figura 10. Esquema de variación de la potencia instada por horas en el día	29
Figura 11. Esquema de carga en el año.....	30
Figura 12. Análisis de las curvas medidas y adquiridas en la página de la NASA.	32
Figura 13. (a) Panel fotovoltaico monocromático (b) Medición de la radiación solar, voltaje generado y corriente.	32
Figura 14. Modelo de circuito equivalente de una celda fotovoltaica.	34
Figura 15. Curva de I-V y V-W de una celda solar [21].....	34
Figura 16. (a) Incorporación de la estación (b) Medición de variables.	35
Figura 17. Perfiles de variación de la velocidad del viento (m/s).....	37
Figura 18. Rosa de los vientos (m/s).....	38
Figura 19. Curva característica del aerogenerador.....	40
Figura 20. Batería de Litio 100Ah.	40
Figura 21. Generador de gasolina 4000Wts.....	41
Figura 22 Marco metodológico.....	52
Figura 23. Energía aportada por cada equipo en Febrero	56
Figura 24. Gráfico en porcentajes de participación de las fuentes de energía	57
Figura 25. Energía aportada por cada equipo agosto	57
Figura 26. Gráfico en porcentajes de aporte energético de agosto.	58
Figura 27. Energía aportada por cada equipo diciembre.....	58
Figura 28. Gráfico en porcentajes de aporte energético de diciembre.....	59
Figura 29. Energía aportada por cada equipo febrero.....	61

Figura 30. Gráfico en porcentajes de aporte energético de febrero	62
Figura 31. Energía aportada por cada equipo agosto.	63
Figura 32. Gráfico en porcentajes de aporte energético de agosto.	63
Figura 33. Energía aportada por cada equipo diciembre.....	64
Figura 34. Gráfico en porcentajes de aporte energético de diciembre.	64
Figura 35. Curva de optimización de los recursos energéticos.....	66
Figura 36. Resultados óptimos que se obtiene sin generador térmico.	67
Figura 37 Curva de ingreso de las cuatro fuentes de energía.....	68
Figura 38 Porcentaje de entrega de energía por cada uno de los equipos.....	68
Figura 39. Programación considerando las variables de restricción.	69
Figura 40 . Variación en los costos por despacho de energía.	73

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica.....	17
TABLA 3. CONSUMOS ELÉCTRICOS DE LAS CABAÑAS RELAX – MULALÓ...	26
TABLA 4. VALORES DE RADIACIÓN SOLAR MEDIDOR POR EL EQUIPO SOLAR POWER METER SM206	31
TABLA 5. DATOS DE PLACA DEL PANEL FOTOVOLTAICO	33
TABLA 6. DATOS ADQUIRIDOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO	36
TABLA 7. TABLA DE RANGOS DE RUGOSIDAD DE ACUERDO AL TERRENO [29]	37
TABLA 8. DATOS CARÁCTERÍSTICOS DEL AEROGENERADOR A IMPLEMETAR	39
TABLA 9.DATOS TÉCNICOS DEL GENERADOR	41
TABLA 10. COSTOS DEL KWH DE POTENCIA MÁXIMA.....	53
TABLA 11 . COSTO POR ANÁLISIS DE EQUIPOS.	54
TABLA 12 . RESULTADOS DE MODELO (I) PARA LA INSTALACIÓN OPTIMA EN CANTIDAD DE EQUIPOS	55
TABLA 13 .COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA.....	59
TABLA 14 . COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA.....	60
TABLA 15 . RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO DE ENTEROS MIXTOS DE LA ECUACIÓN [21][22]	60
TABLA 16 . COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA.....	65
TABLA 17 . COSTOS DE OPERACIÓN DIARIOS.....	65
TABLA 18 . COSTO POR POTENCIA INSTALADA.....	67
TABLA 19 . ANÁLISIS DE COSTOS POR OPERACIÓN E INVERSIÓN.....	67
TABLA 20. COSTO TOTAL POR POTENCIA INSTALADA.....	69
TABLA 21 . COSTO DE LA ENERGÍA POR EQUIPOS	70
TABLA 22. TABLA COMPARATIVA DE EMANACIÓN DE CO2 AL AMBIENTE	70
TABLA 23 . COSTO DE OPERACIÓN DE DESPACHO DEL RECURSO ENERGÉTICO	71
TABLA 24 . COSTO DE OPERACIÓN DE DESPACHO DEL RECURSO ENERGÉTICO POR MES	72

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años los sistemas eléctricos de potencia (SEP) han tenido un rol significativo, en el desarrollo social, económico y productivo de los países, dicho crecimiento se puede ver reflejado en aumento de la demanda; por ello las empresas encargadas de abastecer la carga deben proporcionar la energía necesaria, cumpliendo los criterios de confiabilidad y seguridad establecidos en el marco regulatorio.

En la actualidad, los sistemas de potencia se encuentran originando el uso de energías renovables como la eólica y la solar con la finalidad de reducir las emisiones que surgen al generar energía con plantas a base de hidrocarburos. La principal desventaja de este tipo de energía es la aleatoriedad de la velocidad del viento y la radiación solar que hace que no sea certero programar con antelación un despacho económico. Es entonces necesario utilizar algoritmos rápidos que programen un despacho económico óptimo cuando hay una alta incertidumbre de las inyecciones de energía por parte de los paneles solares y los aerogeneradores eólicos, y así se permitan simular una alta cantidad de posibles escenarios.

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.

Con el paso del tiempo satisfacer la demanda de electricidad con un costo aceptable se volvió todo un reto, pues la red se enfrenta a problemas aún mayores como el consumo excesivo de combustibles fósiles, y restricciones para la expansión y repotenciación de las líneas de transmisión existentes.

Existen poblaciones que se encuentran lejanas a las redes de suministro de energía, donde los habitantes no cuentan con energía eléctrica y hacen uso excesivo de combustibles fósiles, lo que ha dado como resultado la aparición del efecto invernadero, que se genera por el aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera como producto de la emanación de los gases que expulsan estos derivados.

El uso al 100 % de energía fósil al día, repercute en la contaminación ambiental y sobre todo en la economía, imposibilitando a las personas de estos sectores contar con el acceso equitativo a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.

Formulación del problema.

¿Es posible optimizar un despacho económico de una microred distribuida mediante un algoritmo?

Objetivo General.

Analizar las fuentes de energía renovable en el sector de Mulaló mediante la utilización de equipos tecnológicos para aplicar la optimización de despacho económico.

Objetivos Específicos.

1. Recopilar información técnica, utilizando fuentes bibliográficas, publicaciones, Libros, etc., especializados en temas de micro redes distribuidas, su despacho económico y optimización.

2. Analizar un algoritmo de optimización que permita resolver el despacho económico de una microred distribuida.
3. Simular y evaluar los resultados del algoritmo de optimización, con referencia a datos reales tomados en los diferentes meses del año.
4. Interpretar los resultados obtenidos de la simulación del algoritmo de optimización.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

TABLA 1. SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Recopilar información técnica, utilizando fuentes bibliográficas, publicaciones, Libros, etc., especializados en temas de micro redes distribuidas, su despacho económico y optimización.	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión bibliográfica. - Determinación de los parámetros en las unidades. - Realización de una investigación de campo, utilizando instrumentos que permitan registrar datos e información técnica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información, definición, antecedentes referentes a algoritmos de optimización para despacho económico. - Datos técnicos de una microred distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Observación sistemática. - Análisis de contenido.
Analizar un algoritmo de optimización que permita resolver el despacho económico de una microred distribuida.	<ul style="list-style-type: none"> - Procesamiento de los datos obtenidos de la investigación bibliográfica y de campo. - Análisis del algoritmo de optimización para el despacho 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis del Algoritmo de optimización para el despacho económico de una microred distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Material bibliográfico - Selección de un Software para programación.

	<p>económico de una microred distribuida, tomando en cuenta las variables de acuerdo a la necesidad.</p>		
<p>Simular los resultados del algoritmo de optimización, con referencia a datos reales tomados en los diferentes meses del año.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizar un Software para programación del algoritmo de optimización para el despacho económico de la microred distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulación del algoritmo de optimización para el despacho económico. - Obtención de datos de radiación solar, velocidad del viento y carga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Procesar la información empleando el Programa FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.
<p>Interpretar los resultados obtenidos de la simulación del algoritmo de optimización.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Validación de los resultados obtenidos del algoritmo de optimización en base a datos reales del estudio de caso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener el punto óptimo de despacho económico. - Mejorar el despacho económico en el sector de Mulaló. 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de resultados con criterio de expertos para validar la propuesta.

Elaborado por: Autor

Justificación.

Una vida moderna altamente dependiente de la energía eléctrica necesita un sistema sostenible que brinde continuidad y calidad en el suministro eléctrico. La solución más viable pretende incorporar micro-redes dentro de los sistemas de distribución existentes.

Para evitar la contaminación ambiental, los sistemas de energías renovables como la solar y fotovoltaica repercute en las emisiones de CO2 y por tanto la reducción de la contaminación atmosférica, del efecto invernadero y del cambio climático que de él se deriva.

El incremento de la demanda de energía eléctrica es sinónimo de desarrollo de un país, es por ello que se buscan nuevas estrategias para establecer el incremento de demanda mediante la investigación de: nuevas fuentes, ahorro y uso eficiente de energía. El Ecuador al ser un país en desarrollo necesita de energía eléctrica, por lo tanto, la Micro Generación Distribuida debe ser un tema a tratarse ante el inminente crecimiento de la demanda de electricidad.

La solución a varios de los problemas que afronta el modelo eléctrico tradicional, pretende ser la incorporación de micro-redes. Las micro-redes buscan crear un sistema eléctrico competitivo, eficiente y reducir la huella medioambiental mediante la incorporación de energías renovables, logrando minimizar el impacto ambiental.

Los sistemas de energía solar y fotovoltaico en el lugar permitirán obtener parámetros para el desarrollo del algoritmo de optimización para el despacho económico de la micro-red distribuida

Hipótesis

Analizar un algoritmo de optimización que permita resolver un problema de despacho económico mediante el estudio de potencial solar y eólico en el sector de Mulaló, para de esta manera implementar un sistema de micro red distribuida.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA

De acuerdo con los datos que se muestran en las secciones anteriores se ha visto la necesidad de proponer un proyecto en el que se utilice un algoritmo de optimización para el despacho económico de una micro red distribuida, que abarque los distintos saberes, softwares, teorías, conceptos, obtenidos y recopilados en la investigación que se plantea realizar.

1.1 Antecedentes de la investigación

Según la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARC) en su informe de Balance Nacional de Energía Eléctrica, difunde que la generación eléctrica del país corresponde al 58,45% de centrales hidráulicas, 39,25% de centrales térmicas y un 2,3% de generación a base de energías renovables, las cuales suministran de energía eléctrica a las distintas cargas, Por lo que es necesario promover la generación de energías renovables o energías limpias, con la finalidad de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero producido por las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles.

En los últimos años las energías renovables han sido una solución para abastecer electricidad a zonas de difícil acceso que no pueden conectarse a una red de distribución eléctrica, siendo la energía eólica y solar las más utilizadas en las micro redes, disponer de un algoritmo de optimización para el despacho económico es de suma importancia para analizar las restricciones de la micro red y la particularidad de costos de generación eólica, fotovoltaica, entre otros.

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. [1]

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. [2]

En el trabajo de investigación “Despacho económico en micro redes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales” se muestran los resultados de diversas simulaciones de posibles despachos económicos para un sistema con penetración de energías renovables, tomando en cuenta las variaciones que puedan generarse de la velocidad del viento y de radiación solar en diferentes horas del día. En el artículo se realiza una prueba y se valida una metodología que ayude a minimizar el costo total de un sistema eléctrico a partir del uso del método de punto interior, donde se utiliza la función `fmincon` de MatLab. La cual ayuda a determinar diversos resultados tomando en cuenta las restricciones del sistema de potencia con una sintaxis de función lineal. [3]

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” el cual enfoca el estudio de las micro redes aisladas, que se conforman específicamente por fuentes de generación eólica, solar, hidráulica con sistemas de almacenamiento de energía como son las baterías y por un grupo electrógeno (generador a diésel) como soporte. Donde se desarrolla una metodología basada en programación dinámica probabilística (PDP), permitiendo así el estudio estocástico de los recursos renovables, la respuesta a la demanda (RD) y el impacto económico que una micro red. Diseña un modelo de programación la cual tiene como función objetivo minimizar los costos de energía sujeta a sus restricciones de disponibilidad de las energías renovables como son la eólica y fotovoltaica, que permitan satisfacer una demanda diaria. Habiendo mencionado lo anterior en dicho trabajo de investigación se presenta el árbol de escenario que es el encargado de optimizar costos, basados en los datos de entrada que corresponden a la aleatoriedad del recurso a utilizarse [4]

Los investigadores Diego Jiménez; Diego Ortiz Villalba; Aramis Pérez & Marcos E. Orchard en su trabajo de investigación declaran que el sistema de almacenamiento de energía de batería basado en iones de litio (BESS) determina un papel importante en la resolución de problemas de suministro de energía en micro redes debido a las características de rendimiento, como alta potencia, alta eficiencia, baja auto descarga y larga vida útil. En consecuencia, presentan una metodología capaz de analizar el proceso de degradación de las baterías de iones de litio BESS cuando se utilizan en una microrred. Para evaluar la degradación de BESS, es necesario realizar un despacho económico, que incorpore el uso de un BESS en las micro redes. Entendiéndose que el despacho económico es formulado como un problema de optimización (MILP) que permite al BESS abastecer la demanda eléctrica durante un período de ocho horas de autonomía energética por día. [5]

En el trabajo de investigación realizado por Jacqueline Llanos Proaño, Diego Ortiz Villalba, Doris Saez & Daniel Olivares Quero, presentan un modelado y simulación

de despacho económico realizado en una micro red. En donde desarrollan un algoritmo flexible para obtener el funcionamiento óptimo de una micro red. Las simulaciones realizadas consideran dos tipos de topologías: una micro red de un nodo y una micro red radial de múltiples nodos. El despacho económico se formula como un problema de optimización de programación lineal de enteros mixtos. [6]

1.2 Fundamentación Teórica

1.2.1 Microgeneración Distribuida.

Se puede definir a la microgeneración distribuida a partir del concepto de generación distribuida que se basa en la utilización de pequeñas unidades instaladas, cercanas a la carga y conectadas directamente al sistema de distribución eléctrico. La microgeneración distribuida puede ser empleada en sistemas de media y baja tensión [7].

En un modelo básico de la microgeneración distribuida se tiene al cliente o carga como el eslabón final en el sistema energético, debido a que está en la capacidad de ser autónomo y muy rara vez requiere energía de la red eléctrica y toda la energía generada es consumida en el mismo lugar. De acuerdo al tamaño de la instalación y la cantidad de energía generada, puede aportar la energía excedente a la red [8].

En países con más avance tecnológico el uso de microgeneración distribuida se está elevando considerablemente, ya que gobiernos promueven su uso mediante programas de inversión y subsidios [8].

1.2.2 Características micro generación distribuida

a) Mejorar la fiabilidad y sustentabilidad del sistema eléctrico

Al existir varias fuentes de microgeneración, distribuidas por el territorio, cuando una de estas llega a fallar, no influye un grave problema para el sistema eléctrico.

b) Reducir las pérdidas en la red eléctrica.

Estar más cerca del consumidor supone que las redes de transporte sean más cortas. Por lo tanto, la microgeneración distribuida supone menos pérdidas de energía en

el transporte de la electricidad desde la generación hasta el consumidor y esto influye en el ahorro.

c) Potencias reducidas

En la microgeneración distribuida por lo general se trabaja con potencias inferiores a 3 KW, aunque en general se suele decir que no sobrepasan 10 KW de potencia instalada. A estas corresponden generaciones tipo isla unitaria ya que no se encuentra conectada a ninguna otra red eléctrica.

d) Energías renovables

En la micro generación distribuida están muy presentes las energías renovables, ya que al estar tan cerca del consumo, se puede verificar su estado de funcionamiento constantemente, estas pueden ser con celdas fotovoltaicas, turbinas eólicas, biomasa, etc. Las fuentes de energía renovable por sí solos la generación eléctrica es generación híbrida no es distribuida. Las fuentes de energía renovable necesitan un elemento que les permita optimizar sus recursos de generación y que administre la planificación de los recursos energéticos

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 [9]. De acuerdo a la demanda energética se puede tener tipos de respaldos en la generación para tener energía eléctrica de una manera más eficaz [9] un esquema general de microgeneración distribuida donde se encuentra los distintos tipos de microgeneración (fotovoltaico, eólico, entre otros.), como se muestra en la figura 1

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.

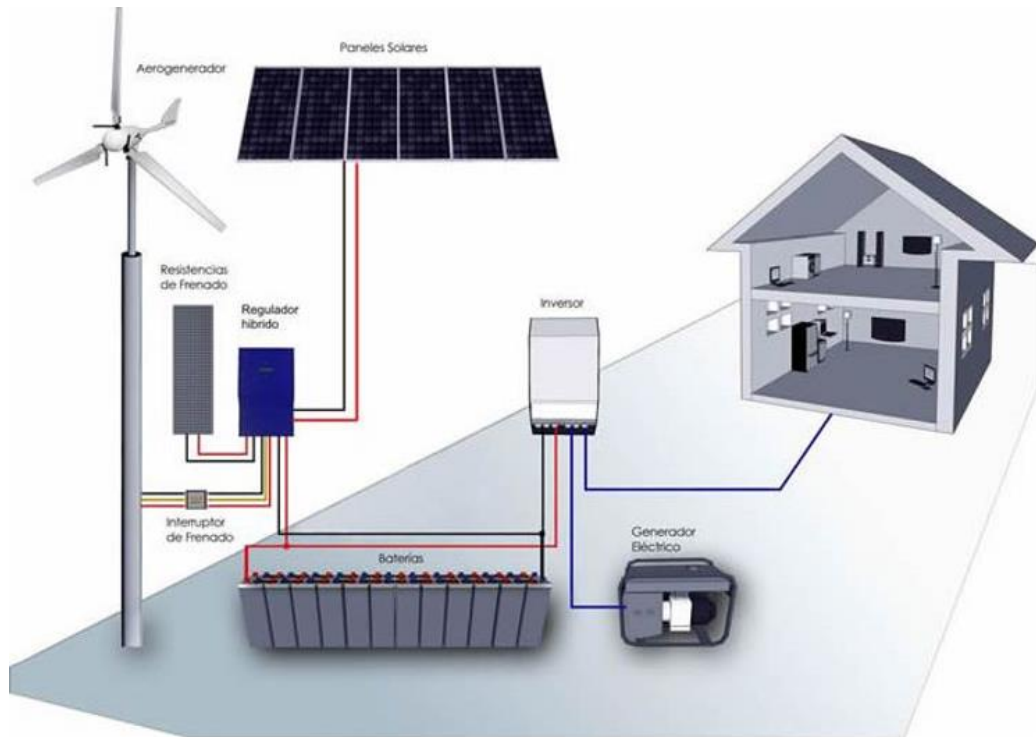


Figura 1. Esquema general de la microgeneración distribuida

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 [9].

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 [9]. Un esquema básico de microgeneración distribuida aislada puede tener las siguientes: Ver figura2.

1. Controlador de carga
2. Banco de baterías
3. Inversor de corriente

4. Punto de consumo (electrodomésticos, entre otros)

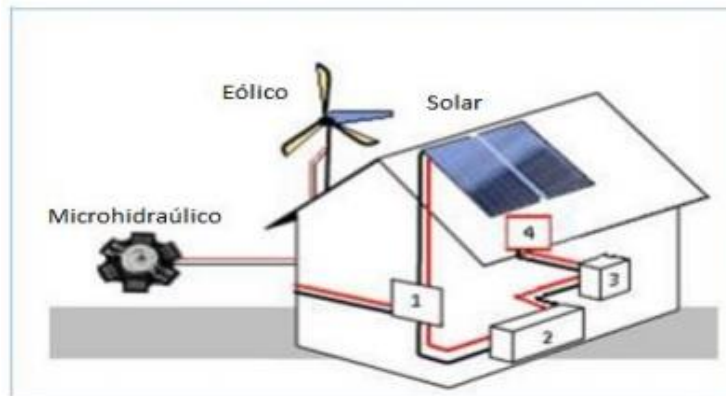


Figura 2. Esquema general de microgeneración distribuida asilada

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 [9].

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 [9].

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

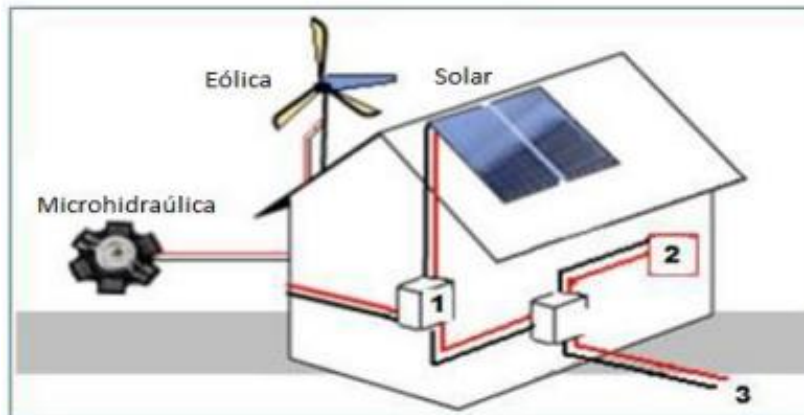


Figura 3. Esquema general de microgeneración distribuida conectada a red

1.3 Micro redes eléctricas

Son pequeñas redes, o circuitos capaces de generar energía y que, además, también pueden funcionar de manera autónoma. Actualmente, están teniendo un gran desarrollo y las micro redes están llamadas a jugar un papel importantísimo en un futuro cercano. No solo sirven para optimizar esa generación de energía o llevarla a lugares de difícil acceso, sino que también son una pieza importante de un futuro más sostenible [10].

La micro red permite una coordinación exitosa entre los Sistemas de Generación Distribuida, al incluir de forma integrada generación distribuida, cargas locales y sistemas de almacenamiento. Las micro redes pueden garantizar calidad de suministro para cargas locales tales como hospitales, centros comerciales, urbanizaciones, campus universitarios o polígonos industriales. El concepto de micro red, con su propio control y calidad de suministro, facilita una integración escalable de generación local y de cargas en las redes eléctricas existentes, permitiendo una mejor penetración de la generación distribuida [11].

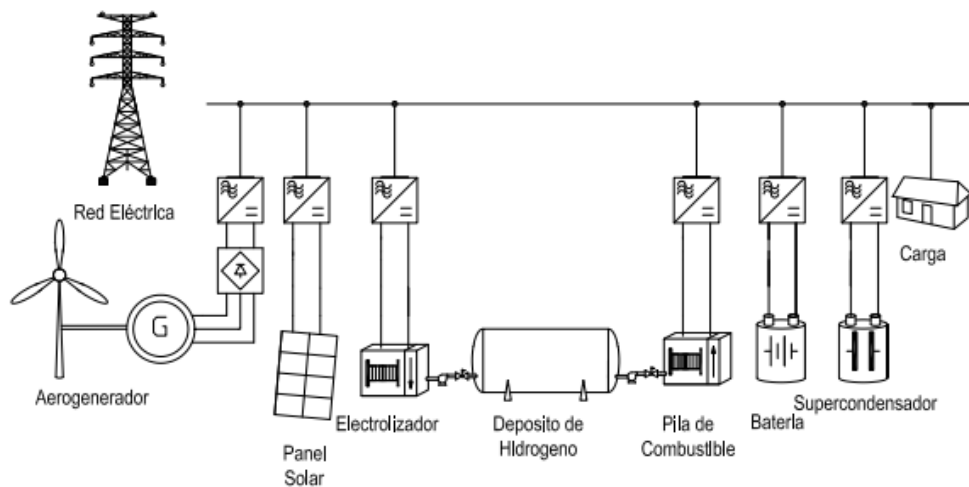


Figura 4. Ejemplo de micro red [12]

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. Gracias a esa red, la electricidad llega desde donde se produce hasta donde la necesitamos, y al encender nuestros aparatos, estos funcionan. Las micro redes, en muchas ocasiones, también están conectadas a la red eléctrica, pero lo importante es aquí: pueden funcionar por sí solas, aisladas de la red general. ¿Qué significa eso? Principalmente, que si la red general falla, hay un corte en el servicio o una avería de cualquier tipo, la micro red puede seguir generando electricidad. Se conectan a la red general por un punto que mantiene el voltaje al mismo nivel. Pero si detecta problemas, se puede desconectar y no verse afectada [10].

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 [10].

1.3.2 Estructura y elementos de una Micro red

La estructura de las micro redes puede cambiar, generalmente incorporan fuentes de energía renovable, fuentes de energía controlables y sistemas de almacenamiento

de energía. Las micro redes pueden estar conectadas a la red principal de suministro u operar de modo aislado.

Los diferentes elementos que se pueden localizar en la micro red dependen de la carga demandada, las características de los equipos y el emplazamiento del sistema.

La estructura de la micro red que se va a analizar en esta propuesta está compuesta por turbina eólica, una planta fotovoltaica, y un sistema de almacenamiento de energía.

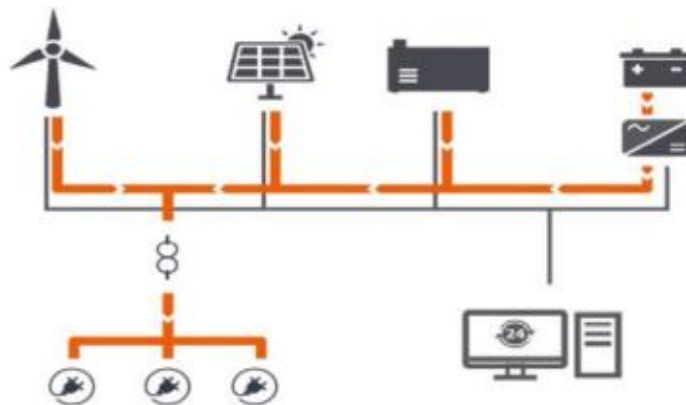


Figura 5. Unidades de una Micro red [13].

1.4 Micro red conectada a la red

En una microrred conectada a la red se puede sacar beneficio de la compra y venta de energía con la red principal. Una de las principales ventajas de una micro red es cuando aparece una perturbación en la red principal. En este caso, la micro red es capaz de pasar a modo isla para proteger los elementos de ésta. La micro red tiene la capacidad de alimentar las cargas críticas gracias a la optimización del despacho económico, esto se alcanza mediante algoritmos de programación [14].

a) Micro red aislada

Una microrred aislada es un sistema de micro energía que consta de varias fuentes de energía renovable no convencional (ERNC), un sistema de almacenamiento (Baterías), y generación convencional como generadores diésel los cuales pueden actuar como generación principal o auxiliar, para alimentar a las cargas locales [14].

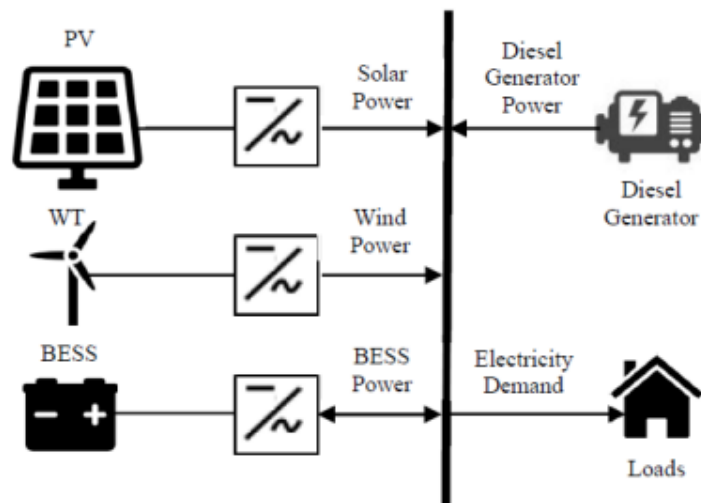


Figura 6. Diagrama de una Micro red con base ERNC [15].

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 [10].

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 [16].

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

1.5.1 Energía Eólica

La energía eólica se convierte en una de las tecnologías más hechas y de mejor relación costo beneficio que pueden ser utilizadas en el concepto de la generación distribuida.

La energía eólica se origina del movimiento de las masas de aire, es decir, el viento. Al igual que la mayoría de las fuentes de energía renovables, proviene del sol, ya que son las diferencias de temperatura entre las distintas zonas geográficas de la tierra las que producen la circulación de aire [17].

Desde el punto de vista de la energía eólica, la característica más importante del viento es su variabilidad, tanto desde el punto de vista geográfico como temporal. A gran escala, la variabilidad espacial describe el hecho de que en el mundo existen diferentes zonas climáticas, algunas con mayor disponibilidad de recursos que otras, determinadas fundamentalmente por su latitud [17].

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 [18].

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 [19].

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 [20].

1.1.1. 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 [21].

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 [22].

1.1.2. Modelos de optimización

Para optimizar el despacho económico de una micro red distribuida , es necesario plantear un algoritmo de solución.

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 [23].

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 [23].

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 [23].

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 [23].

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 [23].

1.1.3. 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 [24].

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.

- **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 [24].

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 [24].

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 [24].

- **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 [24].

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” [24].

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 [24].

1.2. Fundamentación metodológica

- Enfoque

La investigación tiene enfoque cuantitativo con la descripción del despacho económico de una micro red distribuida en un sector de Mulaló, con el registro de las variables climáticas de la radiación solar, velocidad del viento y capacidad de almacenamiento de batería, con intervalos de medición de minuto todos los días durante los meses de febrero, noviembre y diciembre del año 2021.

Tipo de Investigación.

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.

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.

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

- Técnica de recolección de datos.

En el presente trabajo de investigación la información proviene tanto de fuentes primarias como es la generación de datos, proporcionados por la estación

meteorológica instalada en el sector de Mulaló, la que brindará las mediciones de diferentes parámetros y de fuentes secundarias (información de libros y artículos que interpretan sobre la optimización de despacho económico de micro redes).

Para el presente análisis se seguirá la siguiente metodología:

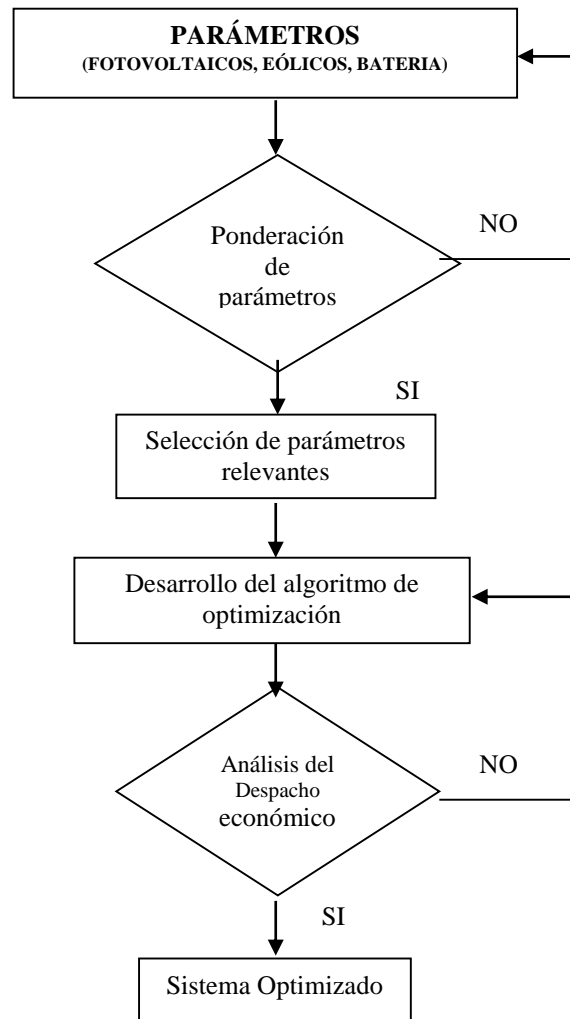


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso

1.3 Conclusiones Capítulo I:

Con el desarrollo del marco teórico del capítulo 1, ayuda a aclarar los temas teóricos procedentes de la información obtenida de las fuentes bibliográficas confiables, que giran alrededor del planteamiento del problema y que sirven de base,

fundamentación y análisis para proponer soluciones del proyecto de investigación planteado.

En este capítulo se ha realizado la revisión sistemática de contextos de los diferentes algoritmos de optimización para el despacho económico de una micro red distribuida como también los detalles a contemplar para el estudio. Orientando a tener una mejor perspectiva de la importancia que tiene optimizar los sistemas de micro redes distribuidas.

CAPITULO II. PROPUESTA

2.1 Título del proyecto:

Analizar un modelo matemático de optimización que permita evaluar las condiciones económicas tanto de instalación como de operación, caso de estudio en el las “**Cabañas Relax**” Mulaló, Cotopaxi.

2.2 Objetivo del Proyecto

- Ejecutar un estudio de campo de los recursos naturales para analizar la energía solar y eólica que servirán como fuente principal de uso de las Cabañas.
- Establecer una metodología matemática de optimización considerando las variables de entrada los recursos energéticos disponibles, paneles fotovoltaicos, generador eólico, batería y generador térmico para obtener un análisis de instalación y operación económica.

2.3 Justificación

Las Cabañas Relax están ubicadas a nor-este de la parroquia Mulaló en la provincia de Cotopaxi, posee como servicio principal el descanso en compañía de la naturaleza y el cuidado del medio ambiente. Al mantenerse en una zona alejada el consumo energético principal es el del generador de combustión interna con una potencia instalada de 5KV 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, [25] de acuerdo a esta publicación la cantidad de un galón de gasolina para generación eléctrica envía al ambiente 8,887 gramos de CO₂/. Si las cabañas estuvieran al 100% de su uso energético se estima consumir un máximo de 7 galones diarios lo cual la cantidad de CO₂ al ambiente estaría fuera

limitado por lo que se ve la necesidad del uso de fuentes de energía renovable de manera óptima en su despacho.

2.4 Descripción de la propuesta.

En las "Cabañas Relax" cómo se observa en la figura 8 es un lugar de descanso en contacto con la naturaleza del sector de Mulaló, actualmente consta con un limitante de energía eléctrica mediante red pública, por lo que se utiliza un motor de combustión que abastece en consumo diario. Al no tener la disponibilidad de energía eléctrica las 24 horas del día y todos los días, su servicio al público se ve limitado, así como también el desarrollo del turismo local.



Figura 8. Cabañas de descanso "Relax"

Tomando en consideración que la energía eléctrica es un recurso que permite el desarrollo económico, social y turístico de los sectores, se propone ejecutar un sistema de micro generación distribuida el mismo que permita de manera optimizada realizar el despacho de energía eléctrica, que como función objetivo se verá encaminada a que el recurso energético sea el más económico. El sistema de micro generación distribuida propuesto será mediante generación fotovoltaica, generación eólica, batería y generación térmica como se puede observar en la figura 9, 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.

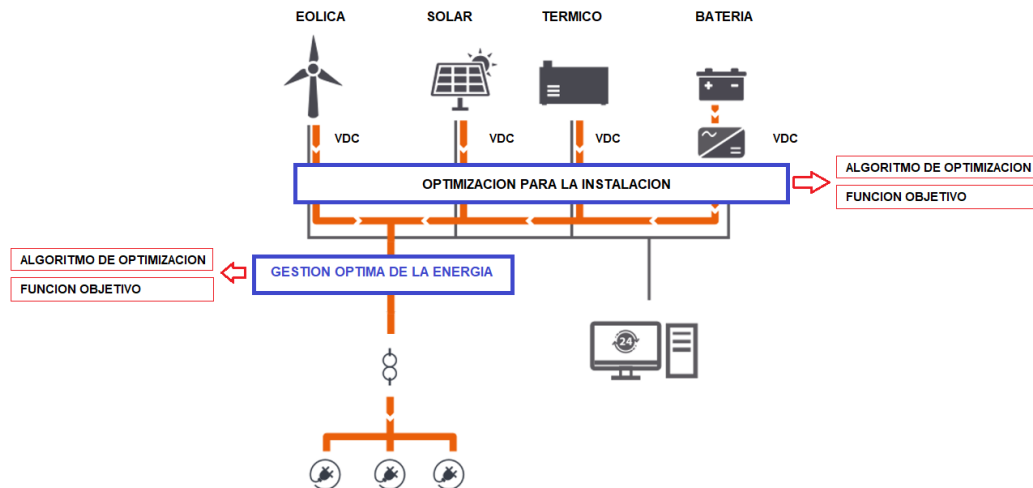


Figura 9. Diagrama esquemático de la Micro generación Distribuida.

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.** - Para el estudio se consideró la sumatoria de potencias individuales instaladas y la Instalación de un analizador de Calidad de Energía para determinar el consumo actual y así poder realizar una proyección anual. En la figura 10 se puede observar el consumo diario y el promedio semanal que se está consumiendo, considerando a más de ello que las Cabañas están en un funcionamiento del 20 % de su capacidad de lo que se espera obtener la curva 1 representada de color azul, en la misma se puede destacar que existen horas en la cuales las cabañas no poseen energía eléctrica disponible dese las 20:00 hasta las 6:00 am (aproximadamente diez horas sin electricidad) esto es lo que conlleva a obtener una limitación al momento que se planifique eventos en la noche en vista del costo de combustible para el generador de gasolina y la cantidad de CO2 que se generarían en ese tiempo.

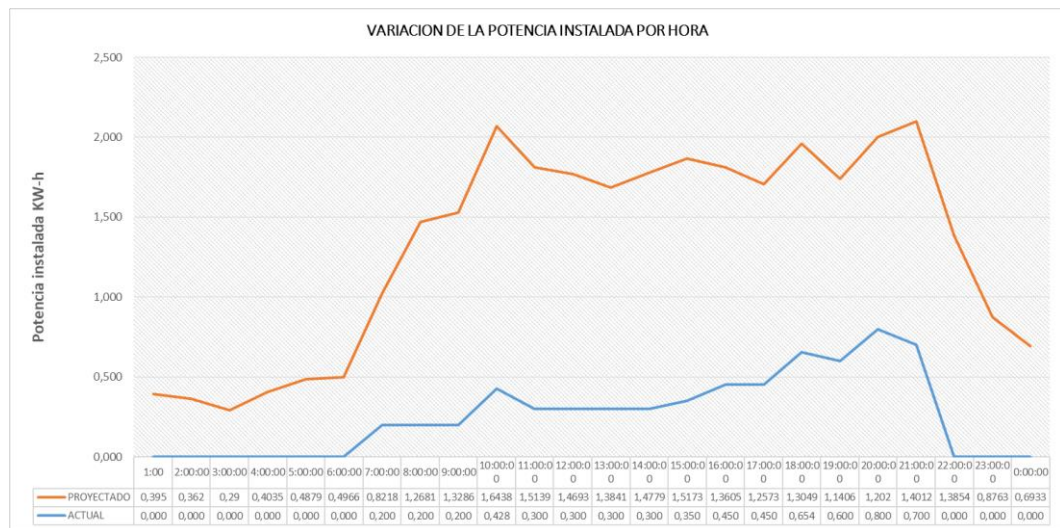


Figura 10. Esquema de variación de la potencia instada por horas en el día.

b) **Potencia máxima proyectada a instalar.** - En la figura 10 se observa la curva proyectada (anaranjada) para una condición de carga máxima, tomando como

referencia la máxima cantidad de equipos, iluminación y servicios, una potencia de equipos proyectados a instalar y teniendo una disponibilidad de energía las 24 horas del día sin interrupción. Para el estudio se proyectó de acuerdo a un lugar con iguales condiciones, de lo cual se puede destacar que en mínima carga el sistema deberá abastecer con una potencia de 0.4KWh y en condiciones máximas carga puede llegar hasta 2.2KWh, con esto se espera que las instalaciones aumenten su tiempo de servicio y disponibilidad.

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

En la figura 11 se puede apreciar la variación de carga de acuerdo a los meses del año, esto influencia en la gestión de energía generada ya que cada mes los valores promedio tanto solares y eólicos cambian, por ello la importancia de conocer un estudio anual. Se puede observar una variación del menor consumo de 756 KWh-mensual (1,05Kw-h) y el mayor consumo entre los meses de noviembre y diciembre con un valor máximo de 1.462 KWh - mensual (2,031Kw-h) esto se debe a que en estas fechas existen festividades y se incrementa la carga.

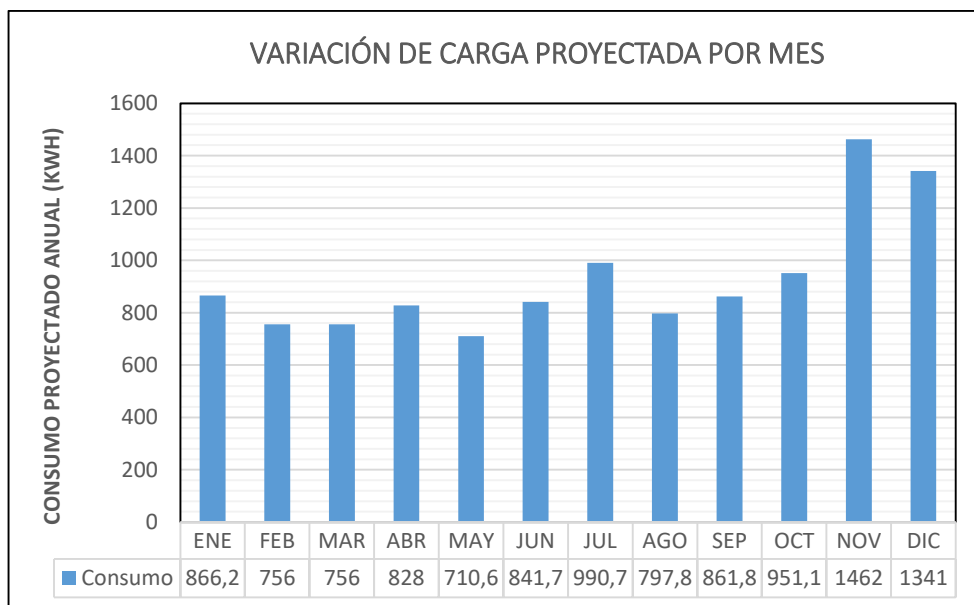


Figura 11. Esquema de carga en el año.

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 4 se puede apreciar las mediciones adquiridas por el equipo en el lapso de un año en donde se destaca las mismas características mensuales desde las 11:00 hasta las 15:00 como radiación máxima 768W/m² por un lapso de 5 horas que se considerara como valor solar pico. Dentro de las características de funcionamiento del panel fotovoltaico es importante considerar los valores reales de temperatura ambiente ya que esto define una variación en la eficiencia de generación fotovoltaica, ya que un panel fotovoltaico entrega su mejor eficiencia a los 1000w/m² y a una temperatura de 25°C.

TABLA 4. VALORES DE RADIACIÓN SOLAR MEDIDOR POR EL EQUIPO SOLAR POWER METER SM206

HORARIOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO	TEMPERATURA °C
1:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	7
2:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	8
3:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	7
4:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11
5:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	12
6:00:00	11,9	9,8	19,5	28	12	16	14,6	21	18	13	12,5	11	15,6	14
7:00:00	60,3	58,8	61,9	115	58	52	60	54	56	64	61	58	63,3	15
8:00:00	227,6	320	162,8	88	150	107	97	106	98	131	153	270	159,2	14
9:00:00	292	400	394	285	350	310	371	377	344	148	320	290	323,4	14,8
10:00:00	459	447	409	485	470	460	520	486	458	401	520	570	473,8	16,2
11:00:00	462	449	415	576	580	420	570	813	752	817	815	886	629,6	16,8
12:00:00	667	779	875	761	520	620	761	946	860	910	870	930	791,6	16,1
13:00:00	981	972	975	845	820	846	845	813	960	870	910	887	893,7	16,8
14:00:00	827	920	930	890	920	860	850	980	820	760	920	850	877,3	17,1
15:00:00	564	621	665	700	680	670	680	620	640	630	657	680	650,6	16,2
16:00:00	405	520	131	680	530	560	408	493	520	408	400	501	463,0	14,7
17:00:00	112	130	150	174	65	150	117	162	140	138	129	147	134,5	14,6
18:00:00	0,5	2,6	1,7	1,9	2,5	2,5	6	0,9	1,6	2,1	0,8	2,6	2,1	13,2
19:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11,9
20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11
21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	11
22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	9
23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	8
0:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	7

En el ANEXO B se consideran los valores obtenidos de la página de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/>), si se realiza un análisis comparativo entre los datos medidos y los datos promedios de la nasa se puede apreciar una curva muy similar pero con los valores picos con un promedio aproximado de 14% como de margen de error, por lo que se considera para presente estudio los valores medidos por el equipo en el lapso de un año, ya que existe una ligera variación de radiación en los

meses al igual que también existe una variación en la potencia entregada al sistema que tiene que ser abastecida.

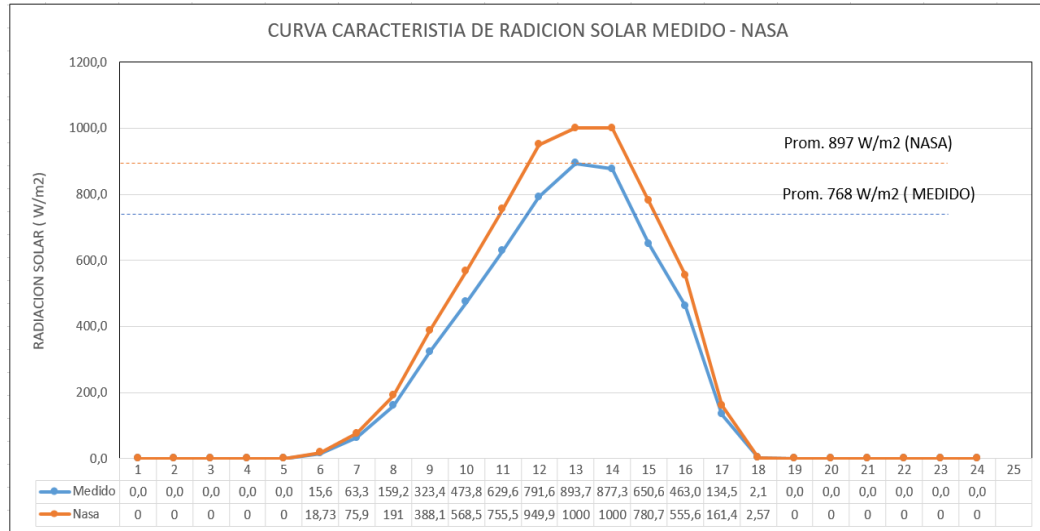


Figura 12. Análisis de las curvas medidas y adquiridas en la página de la NASA.

2.2.3 Panel Fotovoltaico considerado para el estudio

De acuerdo al diseño propuesto se considera instalar paneles fotovoltaicos mono cristalinos ATLAS como se muestra en la figura 13 de la cual se analizó una experimentación de campo la eficiencia del panel de acuerdo a la radiación solar estos datos ayudan a la validación de los resultados del modelo de funcionamiento del panel.

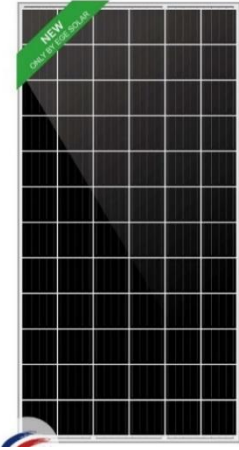


Figura 13. (a) Panel fotovoltaico monocromático (b) Medición de la radiación solar, voltaje generado y corriente.

Datos obtenidos de importancia para la validación del modelo está el voltaje de circuito abierto de acuerdo a la radiación (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{cc}).

En la tabla 5 muestra el DataSheet del panel fotovoltaico a considerar en la MicroGrid.

TABLA 5. DATOS DE PLACA DEL PANEL FOTOVOLTAICO

MARCA: ATLAS Eco Green Energy, Monocristalino 500W	
	
Potencia de Salida (Pmax)	530 W
Tolerancia de potencia	5 +/- W
Voltaje de circuito abierto Voc	49 V
Corriente de Cortocircuito Icc	13,76 A
Voltaje máximo (Vmp)	40,80 V
Corriente máxima (Imp)	13.00 A
Eficiencia	20,7 %

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 13 se muestra el modelo circuital del panel fotovoltaico considerando el análisis I – V [28] en la misma que se consideran condiciones ideales de parámetros constantes.

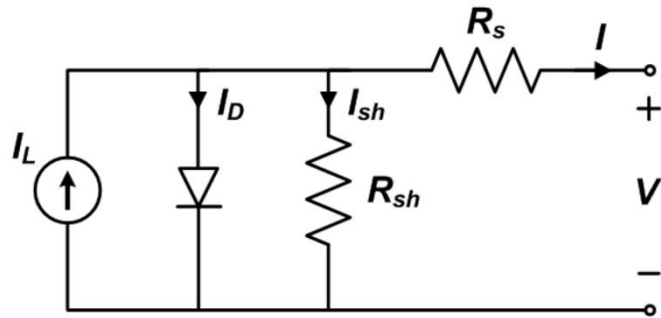


Figura 14. Modelo de circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

En la figura 15 [28] 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.

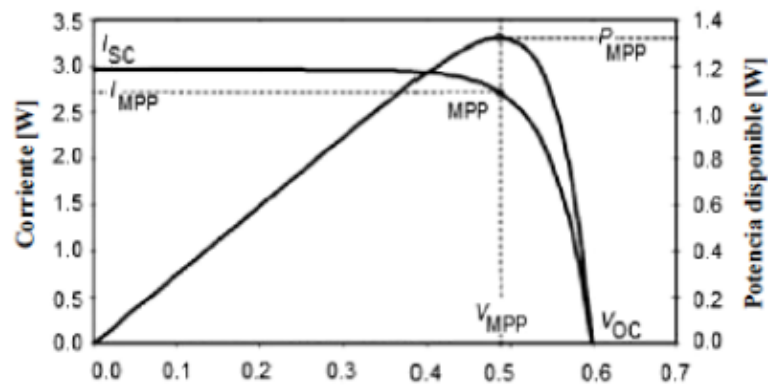


Figura 15. Curva de I-V y V-W de una celda solar [21].

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

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

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 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

$a = a = kTcA.$

$k =$ Constante de boltzman ($1.28 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)

$Tc =$ Temperatura de celda.

$A =$ Factor de identidad.

De acuerdo a las consideraciones del modelo se considerarán para la inversión las restricciones de costo y la radiación.

2.4.3 Análisis del potencial energético eólico.

Para la toma de datos del potencial energético eólico se procedió a incorporar una estación meteorológica semi-profesional PCE-FWS-20 que permite obtener las variables de Velocidad del viento, dirección del viento que permitirá realizar el posicionamiento de la turbina, la humedad relativa, temperatura ambiental, etc., que son las variables que ayudan a realizar la modelación para establecer el costo óptimo de implementación y de gestión de la red. En la figura 16 (a) se puede observar la colocación de la estación meteorológica y en la (b) la adquisición de las variables.



Figura 16. (a) Incorporación de la estación (b) Medición de variables.

2.4.4 Datos adquiridos de velocidad del viento.

Esta considerado para la toma de datos dentro del equipo el promedio de cada 15 minutos, así como también el valor promedio por las 24 horas del día de acuerdo al

horario a una altura de 3 metros, esto con la finalidad de analizar conjuntamente con la radiación solar y la variación de carga para que el optimizador considere la gestión óptima de los recursos energéticos. En la tabla 6 se observa cómo se comporta la variación del viento en un horario en cada uno de los meses del año, este análisis por meses es importante ya que la carga de acuerdo a los meses puede sufrir cambios sustanciales dentro de sus picos de consumo en la figura 10 se pudo analizar los meses de mayor demanda. La proyección de la velocidad del viento mensual también ayuda a tener una idea para poder predecir cómo se comportará el viento y cual recurso consideraría óptimo de operar.

TABLA 6. DATOS ADQUIRIDOS DE VELOCIDAD DEL VIENTO

HORA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	Velocidad del viento											
1:00	4,8	6,1	5,28	4,7	4,4	4,4	4,2	5,83	4,4	4,4	6,4	5,8
2:00	4,7	5,4	6,39	5,3	3,9	4,7	4,4	4,72	4,2	3,9	5,3	5,3
3:00	4,4	7,5	4,44	4,4	4,4	4,2	5,0	4,72	5,0	4,7	5,8	5,8
4:00	4,3	3,4	5,21	5,0	4,2	4,7	4,7	5,28	4,4	5,0	4,7	5,3
5:00	4,5	4,1	4,7	4,7	4,7	4,2	4,2	4,44	3,9	4,4	7,5	4,4
6:00	4,4	4,4	4,17	5,0	3,9	4,4	4,4	3,89	4,2	4,7	5,8	5,3
7:00	4,2	4,1	5,28	4,2	4,2	4,7	5,0	3,89	4,4	5,3	5,8	4,7
8:00	4,8	7,5	5,28	3,9	4,4	5,0	4,7	3,89	3,9	6,4	4,7	6,1
9:00	4,7	9,5	6,39	4,7	5,0	4,7	5,3	4,72	3,9	8,3	6,4	8,1
10:00	4,9	7,8	5,83	8,1	4,4	4,7	6,9	4,72	3,9	8,9	8,9	8,1
11:00	5,3	4,8	8,06	8,3	4,2	4,4	8,9	5,83	8,1	6,9	11,4	11,1
12:00	6,4	7,8	11,9	8,9	8,1	4,7	10,6	4,72	8,9	10,0	9,4	8,1
13:00	6,3	4,8	11,1	11,1	8,9	5,0	10,0	6,94	9,4	5,3	11,9	11,9
14:00	6,2	6,1	11,7	9,4	6,9	5,3	10,0	4,44	10,0	5,8	12,5	13,1
15:00	6,5	5,1	8,06	11,1	8,9	4,7	11,1	4,72	10,0	8,1	11,9	13,3
16:00	5,0	6,5	11,4	5,8	10,0	4,4	14,7	5,00	8,9	5,8	13,1	11,9
17:00	4,2	5,8	8,89	7,2	8,3	4,7	10,0	4,44	8,9	6,4	5,3	13,1
18:00	5,3	9,2	10	8,1	6,4	6,9	9,4	3,89	8,9	5,8	5,3	11,9
19:00	4,2	4,8	8,89	7,2	6,4	8,9	6,9	5,00	9,4	6,9	11,1	8,1
20:00	6,7	6,8	8,06	4,7	6,5	6,9	7,5	5,83	9,4	8,1	11,9	11,1
21:00	4,2	5,4	6,39	5,8	4,7	5,8	6,4	4,44	6,4	4,4	8,1	10,0
22:00	9,2	6,5	7,8	5,8	4,4	5,6	8,3	4,72	5,3	4,7	8,9	10,0
23:00	7,2	4,4	5,28	4,7	4,7	4,7	5,0	4,17	5,8	4,2	5,4	8,9
0:00	6,8	6,8	6,4	5,28	4,2	5,3	7,0	5,00	4,7	5,7	4,9	8,1

2.4.4.1 Proyección de la velocidad el viento a 15 metros de instalación.

Una vez que los datos se han adquirido a una altura de 3 metros, se procede a realizar una proyección a 15 metros que recomienda el Datasheet del aerogenerador

seleccionado. Para realizar la proyección se procede a aplicar la ecuación (2) en la que se considera como datos de entrada el valor de la velocidad del viento (m/s) la altura a la cual se realizó la toma de los datos y la altura proyectada. En la figura 17 se observa que el perfil de variación en el día es un valor promedio de 11,5 m/s en 14 horas y en la noche existe una estabilidad de 7,7m/s en 10 horas con sus respectivas variaciones mínimas y de rafagabilidad que dentro de la ecuación de funcionamiento se tendrá de corregir con un factor de variación.

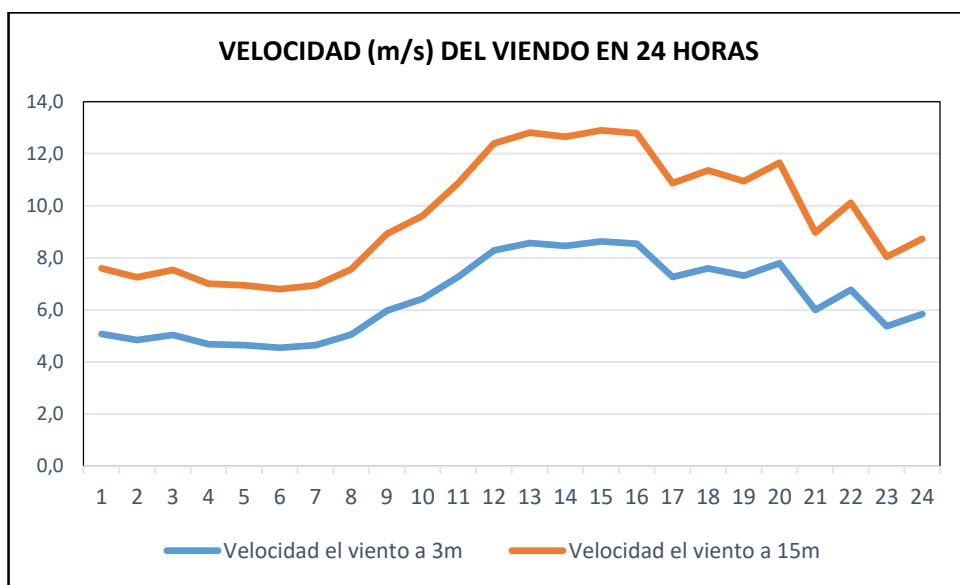


Figura 17. Perfiles de variación de la velocidad del viento (m/s).

La ecuación 2 ayuda a realizar una proyección de la velocidad del viento a diferentes alturas [16].

$$\frac{V}{V_r} = \left(\frac{H}{H_r}\right)^\beta \quad \text{Ecu. [2]}$$

Donde V es la velocidad a estimar a la altura H , V_r es la velocidad del viento a la altura H_r del sensor y β es el coeficiente de rugosidad, el cual depende de la característica del suelo sobre la cual discurre el viento. Para el coeficiente de rugosidad se puede usar los índices de la tabla 7.

TABLA 7. TABLA DE RANGOS DE RUGOSIDAD DE ACUERDO AL TERRENO [29]

Clases	Rugosidad Zo. m	Rasgos del paisaje
Sup. acuáticas	0.0002	Aguas abiertas (mar, lago, embalse, nieve sobre terreno plano, desiertos, concreto. Varios km sin obstáculos desde el sitio de medición del viento
Suave	0.005	Superficie sin obstáculo notable y sin vegetación: plavas, hielo, pantanos
Abierto	0.03	Terreno llano con gramíneas o muy poca vegetación. Obstáculos aislados con separación de al menos 50 veces la altura, h
Aprox. abierto	0.10	Área cultivada o natural con cobertura vegetal baja. Obstáculos ocasionales (edificaciones o árboles) con distancia de al menos 20 h el obstáculo
Rugoso	0.25	Área natural o cultivada con cultivos altos, obstáculos porosos escasos separados por 12h o 15 h, o con objetos sólidos, (edificaciones) distancia de 8 h a 12 h
Muy rugoso	0.5	Zona de cultivos intensos con obstáculos en grupos (granjas, bosque) etc., separados por 8 h: Plantaciones, frutales, bosques jóvenes, zonas urbanas de baja altura con separación de 3 a 4 edificaciones y sin árboles altos
Skimming	1.0	Zonas con obstáculos altos de altura similar y separación de igual distancia que la altura, como bosques adultos y zonas urbanas densas
Caótico	= 2.0	Centros de las ciudades con mezcla de edificaciones de alturas diversas, bosques de altura irregular con zonas deforestadas

En la figura 18 muestra la rosa de los vientos que determina la dirección del viento para poder orientar al aerogenerador para este caso el viento se encuentra con mayor velocidad en la orientación SUR y SURESTE con velocidades de 8,6 y 9,7 m/s respectivamente.

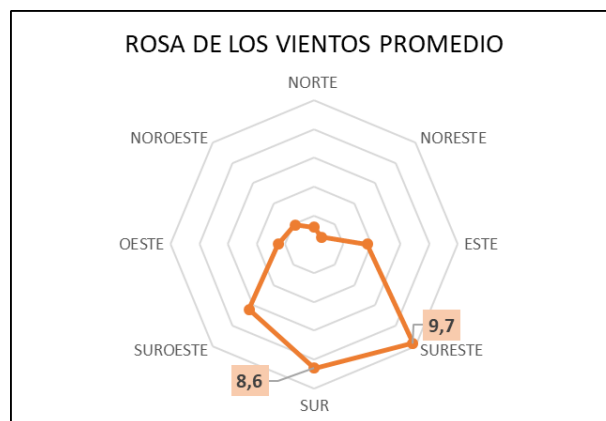


Figura 18. Rosa de los vientos (m/s).


2.4.5 Aerogenerador seleccionado para la implementación y modelación.

De acuerdo a un análisis para la implementación se considerará un aerogenerador ZONHAN ZH 2.0 de 1.8 KW considerando el perfil de velocidad y las

características del lugar con una potencia instalada de 1.8 KW. El aerogenerador debe instalarse alto y lejos de obstáculos, de tal motivo que la velocidad del viento sea relativamente alta. Mientras tanto la calidad del suelo debe tenerse en cuenta el lugar de instalación arenas sueltas, irregulares, vegetación de árboles, edificios, etc. de tal forma que el factor de rugosidad debe estar seleccionado de acuerdo a las características del área de instalación.

En la tabla 8 se muestra los datos característicos del aerogenerador donde se destaca la velocidad del viento al instante del arranque de generación, la velocidad del viento máxima antes que la potencia de generación caiga.

TABLA 8. DATOS CARÁCTERÍSTICOS DEL AEROGENERADOR A IMPLEMENTAR

ZONHAN ZH 2.0 de 1.8 KW	
	
Diámetro del rotor	3,2mts
Potencia nominal	1,5 – 1,8 KW
Velocidad de viento nominal	9 m/s
Velocidad de trabajo	3 – 25 m/s
Torre recomendada	15 mtrs

De acuerdo a la figura 19 se muestra la curva característica de operación el generador a los 3m/s puede empezar a generar, pero con una potencia baja aproximadamente unos 100W y en condiciones de velocidad entre 9 a 10 m/s estaría trabajando al límite máximo de potencia de generación.

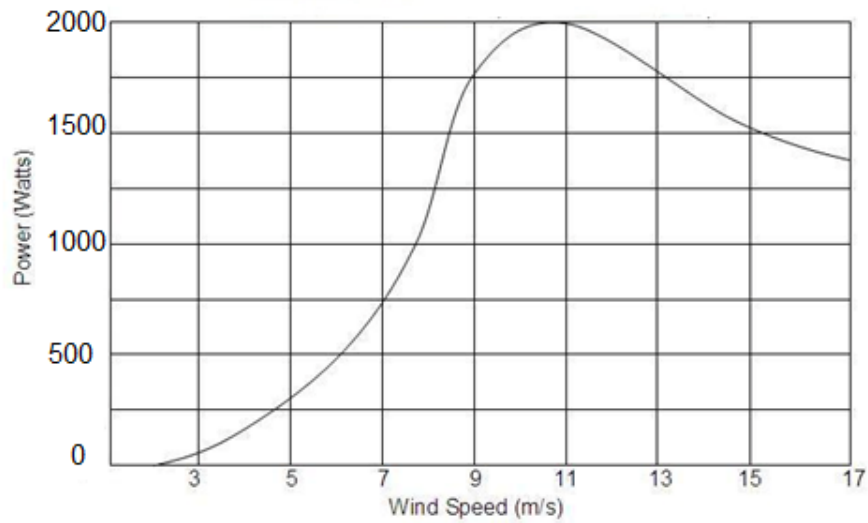


Figura 19. Curva característica del aerogenerador.

2.4.6. Implementación de la batería de almacenamiento de energía.

Para el funcionamiento del sistema cuando exista un exceso de generación en sus fuentes de energía se procede a que el sistema empiece a almacenar energía por vertedero. Las baterías conocidas por sus siglas BESS (Battery Energy Storage Systems) son conocidas como de ciclo profundo en vista de la capacidad de almacenar energía y permitir una descarga entre los 60 a 80%, esto permite que el sistema posea una buena autonomía. El número de baterías depende del porcentaje de autonomía que requiera, en la figura 20 se puede apreciar la batería seleccionada para cuando exista un exceso de carga pueda almacenar energía.



Figura 20. Batería de Litio 100Ah.

2.6.7 Incorporación de un generador térmico

Para suplir la falta de generación de recursos renovables se implementa un sistema de generación térmica de marca YAMAHA a gasolina de 4000 Wts como se muestra en la figura 21, dentro de las restricciones que se considera es minimizar el uso del generador térmico por el costo de la gasolina y por minimizar la emanación de CO₂. Generador de corriente alterna monofásico de 4000 VA de potencia máxima de salida y 3,500 VA de potencia nominal, con 11 hrs. de operación continua de funcionamiento, sincrónico, enfriado por aire forzado, voltímetro, alerta de aceite, arranque manual. En la tabla 9 muestra las características técnicas del generador.



Figura 21. Generador de gasolina 4000Wts.

TABLA 9.DATOS TÉCNICOS DEL GENERADOR

Voltaje	120/240 V
Frecuencia	60 HZ
Potencia Máxima	4.0 KVA
Potencia Nominal	3.5 KVA
Capacidad del combustible	23ltrs (10 galones)
Consumo de combustible	2.45 hrs

De acuerdo a las condiciones de funcionamiento el generador puede expulsar hasta 26 lbs de CO₂, consume 10 galones de gasolina en un tiempo aproximado de 3 horas a carga máxima, si consideramos costos adicionales por mantenimiento, costos indirectos por transporte de combustibles, sanción por parte de Medio Ambiente y otros que se deriven de la generación, es por ello que el algoritmo de gestión energética permitiría una restricción exclusiva de esta fuente de energía.

2.7 Metodología de optimización propuesta

El presente estudio consta de etapas de optimización:

- i) Modelo considerando el dimensionamiento de las tecnologías tomando en cuenta el portafolio de inversión. (Programación lineal)

- ii) Modelo considerando la cantidad de equipos a instalar de las diferentes tecnologías consideradas en el portafolio de inversión (Problema de enteros Mixtos.)

2.7.1 Modelo considerando el dimensionamiento de las tecnologías para una implementación técnicamente económica.

Tomando en consideración que el proyecto debe demostrar una selección óptima de los equipos tecnológicos como solar, eólico, baterías y generador térmico. Como se analizó anteriormente tanto la radiación solar y como el viento varían de manera continua durante el día por lo que existe la incertidumbre si abastecerá a la variación de la carga, o existirá vertedero de energía para considerar las baterías y en el caso que el sistema de energía incorporados en la Micro red no abastezca ingresa el generador térmico por un limitado tiempo de funcionamiento. Para el análisis de la implementación se consideró los valores de restricción del costo, no se podrá implementar un sistema con un valor superior a \$6.000 que es la función objetivo, la aplicación de la Programación Lineal (PL) permite varias versatilidades como la facilidad en la aplicación de métodos de solución, es considerado como un método

matemático para la asignación óptima de recursos, brinda una excelente oportunidad para presentar la idea del análisis de hipótesis ya que se han desarrollado herramientas de análisis de post optimalidad para el modelo de PL, que es considerado el portafolio de inversiones.

2.7.1.1. Modelos del portafolio de inversión (PV) [31].

Se toma en cuenta los valores de operación real en la implementación de acuerdo a las mediciones realizadas en campo. Con el objetivo de analizar la viabilidad de conectar los paneles fotovoltaicos se utilizó ecuación (3) que considera la radiación óptima para que el panel fotovoltaico a $1000\text{W}/\text{m}^2$, la eficiencia del panel, la temperatura óptima para entregar la potencia máxima del panel. En la ecuación (4) se describe la limitación en la disponibilidad de acuerdo al tiempo máximo de radiación de tal forma que al año tendría unas 800 horas de disponibilidad máxima. En la Ecuación [5] se considera la restricción que la potencia máxima instalada no puede ser mayor a la potencia máxima del sistema hasta un límite inferior de 0 generación.

$$P_{sti}^{PV} = \frac{Iss}{1000} P_i^{PV\ inst} [1 - n^T (T_{st}^{PV} - 25)] n^{PV\ inv} - P_{sti}^{pv\ vert.} \quad \text{Ecu. [3]}$$

$$T_{st}^{PV} = T_{st}^a \frac{Iss}{800} [NOCT - 20] \quad \text{Ecu. [4]}$$

$$0 \leq P_{sti}^{PV\ inst} \leq P_i^{PV\ max} \quad \text{Ecu. [5]}$$

La inyección de potencia activa esperada de un sistema PV (P_{sti}^{PV}) se expresa mediante la ecuación (3). La inyección de potencia es la función de la potencia instalada ($P_i^{PV\ inst}$) irradiación solar (Iss), la temperatura de las celdas solares (T_{st}^{PV}), la reducción de la eficiencia del sistema PV debido a la temperatura (n^T), la eficiencia del inversor ($n^{PV\ inv}$) y por ultimo considerando el vertimiento del sistema ($P_{sti}^{pv\ vert.}$) en caso que exista un excedente de energía solar pueda ser

almacenada. Las temperaturas de los sistemas solares también se ven afectados al momento de dar su máxima potencia por ello la ecuación [4] esta depende de la irradiación solar ambiente (T_{st}^{PV}) y la temperatura del sistema PV en condiciones normales NOCT (Normal Operating Cel Tempetrature) que se considera las curvas de temperatura que afecta la eficiencia. El sistema fotovoltaico rige la capacidad de potencia instalada del sistema PV y habilitada únicamente a cada nodo vulnerable del sistema de distribución para que los datos sean óptimos a instalar.

2.7.1.2. Modelos el portafolio de inversión (BESS) [31].

La consideración de que el sistema posea un sistema de almacenamiento de energía es muy importante ya que el mismo estará presto y disponible para brindar servicio complementario de servicio de energía para el cual se considera un banco de baterías de ION-LITIO conocido por las siglas BESS (Battery Energy Storage Systems). Una vez que se mantienen cargadas las baterías las mismas deben tener la capacidad de inyectar la potencia activa requerida por el sistema se expresa mediante las ecuaciones [8] y [9]. La ecuación [6] y [7] define la cantidad de energía disponible en los BESS la restricción representada [6] analiza la cantidad de energía inicial en los BESS ($E_{s,t=0,i}$) en el que el SOCo (estado inicial de la carga). La Ecuación [7] define la cantidad de energía disponible ($E_{s,t,i}$) para un horizonte de evaluación considerando la carga ($P_{s,t,i}^{B,c}$) y la descarga ($P_{s,t,i}^{B,d}$) de los BESS a más de ello la eficiencia del inversor $\eta^{B,inv}$. La ecuación [8] restringe la energía de la batería que es limitado por la potencia instalada del BESS ($P_i^{B,inst}$) a más de ello habilita los nodos no vulnerables al evento exógeno para instalar las unidades BESS. Las restricciones [9] y [11] muestra que los BESS únicamente pueden operar en estado de carga o descarga en cada hora del horizonte de simulación, representado las variables binarias ($x_{s,t,i}^c$) y ($x_{s,t,i}^d$), respectivamente donde M es la constante positiva suficiente grande que habilita las variables ($P_{s,t,i}^{B;s}$) y ($P_{s,t,i}^{B,d}$) obtengan valores distintos a cero en función del estado de funcionamiento de los BESS.

$$E_{s,t=0,i} = SOCo . P_i^{B,inst} \quad i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [6]}$$

$$E_{s,t,i} = E_{s,t-1,i} - \frac{P_{s,t,i}^{B,d}}{n^{B,inv}} + P_{s,t,i}^{B,c} . n^{B,inv} \quad t \geq 1, i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [7]}$$

$$0 \leq E_{s,t,i} \leq P_i^{B,int} \quad t \geq 1, i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [8]}$$

$$0 \leq P_{s,t,i}^{B,c} \leq x_{s,t,i}^c . M \quad t \geq 1, i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [9]}$$

$$0 \leq P_{s,t,i}^{B,d} \leq x_{s,t,i}^d . M \quad t \geq 1, i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [10]}$$

$$x_{s,t,i}^c + x_{s,t,i}^d \leq 1 \quad t \geq 1, i \in \Omega_B \quad \text{ecu. [11]}$$

2.7.1.3. Modelos del portafolio de inversión (Turbina eólica) [31].

Para considerar un modelo de inversión de la turbina se toma en consideración la ecuación [12] se toma en consideración la eficiencia de la misma de acuerdo al factor de planta, la relación entre la potencia de salida y la velocidad del viento obtenido la siguiente ecuación [13], donde la consideración es que la potencia del sistema se encuentre entre 0 y el valor de potencia máxima.

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \quad \text{or} \quad v \geq v_{co} \\ \frac{P_{rated-W}(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{rated-W} & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad \text{ecu. [12]}$$

$$0 \leq P_w \leq P_{rated-W}^{max} \quad \text{ecu. [13]}$$

Donde:

- V_{ci} = Velocidad de corte inicial
- V_{co} = Velocidad de corte final
- V_r = Velocidad nominal del viento
- $P_{rate} W$ = Potencia nominal de salida

2.7.1.4. Modelos del portafolio de inversión (Generador térmico) [31].

El sistema de combustión gas natural es una de las principales fuentes de energía para micro redes rurales aisladas. Los GGS funcionan quemando gas natural: este tipo de generadores suele ser el preferido para cumplir con las cargas máximas, ya que las turbinas pueden alcanzar rápidamente la capacidad de generación completa. El propósito del modelo del GGS está considerada en la ecuación [16] este es el modelo entre la ecuación [14] y [15]. La ecuación [14] corresponde al consumo de combustible de GGS ($f_{s,t}^{gas}$), donde ($P_{s,t}^{GGS}$) es la potencia de salida del GGS, u^{GGS} en la densidad de energía del gas natural consumido por GGS en Kwh/Kg y η^{GGS} es la eficiencia energética del GGS. La ecuación [15] representa la emisión de CO2 por combustible. ($E_{s,t}^{CO2}$) y depende de la cantidad de ppm de CO2 al ambiente de acuerdo a la energía producida (K^{CO2}) y la finalidad de la restricción [16] se representa los límites de la generación por combustión.

$$f_{s,t}^{gas} : \frac{P_{s,t}^{GGS}}{u^{GGS} \eta^{GGS}} \quad \text{ecu.} \quad [14]$$

$$E_{s,t}^{CO2} = K^{CO2} u^{GGS} f_{s,t}^{gas} \quad \text{ecu.} \quad [15]$$

$$0 \leq P_{s,t}^{GGS} \leq P^{GGS,inst} \quad \text{ecu.} \quad [16]$$

Dentro de la restricción de emisión de gases se considera que el factor $k = 0,00258$, $u = 9,12$ (poder calorífico KW/ltr), η_{gen} eficiencia del generador $0,37$.

2.7.1.4. Función objetivo del costo de inversión [31]

Dentro del diseño del sistema para ejecutar un plan de inversión del proyecto el mismo debe tender a que el costo de inversión sea lo más mínimo con las características técnicas que cumplan el requerimiento de la función objetivo en la ecuación [17] considerando de esta forma la optimización matemática para representar los costos de implementación y operación la tendencia es a la mínima inversión y en implementación de la microred. De acuerdo a la ecuación [18] establece las características para determinar el costo de inversión mínima considerando que el sistema va a estar disponible las 24 horas del día por ende el tiempo de funcionamiento va a ser 8.760 horas al año y se consideran las sumas de costo de inversión de cada uno de los equipos considerando sus características técnicas y el potencial de sus fuentes primarias.

- FUNCIÓN OBJETIVO

$$Min\{IC + OC\} \quad \text{ecu [17]}$$

- MODELO i)

$$IC = \frac{CRF}{8760} T [c^{PV} P^{PV,inst} + c^{WT} P^{WT,inst} + c^{BESS} P^{BESS,inst} + c^{GGS} P^{GGS,inst}] \quad \text{ecu.[18]}$$

$$OC = \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^T \pi S [c^{ENS} ENS_{s,t} + c^{PV,curt} P_{s,t}^{PV,curt} + c^{WT,curt} P_{s,t}^{WT,curt} + c^{BESS,op} P_{s,t}^{BESS,dis} + c^{gas} f_{s,t}^{gas} + c^{CO2} E_{s,t}^{CO2}] \quad \text{ecu.[19]}$$

PARÁMETROS:

CRF : Factor de recuperación de Capital en un año de trabajo (8.760 horas)

T : Tiempo de evaluación

c^{PV} : Costo por KW instalado del sistema fotovoltaico (\$/KW)

c^{WT} : Costo por KW instalado del sistema eólico (\$/KW)

c^{BESS} : Costo por KW instalado del sistema baterías (\$/KW)

c^{GGS} : Costo por KW instalado del sistema de generación térmica (\$/KW)

c^{ENS} : Costo de Energía No Suministrada (\$/KW)

$c^{PV,curt}$: Coste de reducción de potencia activa del sistema fotovoltaico (\$/KW)

$c^{WT,curt}$: Coste de reducción de potencia activa del sistema eólico (\$/KW)

$c^{BESS,op}$: Costo operativo de BESS (\$/KW)

c^{gas} : Costo del combustible

c^{CO_2} : Costo de emisiones de CO₂

N : Número de escenarios

VARIABLES:

$p^{PV,inst}$: Capacidad instalada del sistema fotovoltaico [kW]

$p^{WT,inst}$: Capacidad instalada del sistema eólico [kW]

$p^{BESS,inst}$: Capacidad instalada del sistema de almacenamiento de energía de la batería [kW]

$p^{GGS,inst}$: Capacidad instalada del generador [kW]

$P_{s,t}^{PV,curt}$: Reducción de energía por sistema fotovoltaico [kWh]

$P_{s,t}^{WT,curt}$: Reducción de energía por sistema eólico [kWh]

$P_{s,t}^{BESS,dis}$: Descarga de energía a BESS [kWh]

$f_{s,t}^{gas}$: Consumo de combustible

$E_{s,t}^{CO2}$: Emisiones de CO₂ [Ton]

En la ecuación [19] se establece el sumatorio costo por inversión que suministran cada uno de los equipos considerando a más de ello el costo que podría obtener por emisión de CO₂, la ecuación analiza las variables de potencia de entrada y de acuerdo a la carga analiza cual sería el mejor costo de operación, minimizando el uso del sistema de combustión.

2.7.2. Función objetivo de la gestión del recurso energético [31].

Al igual que en la ecuación (17) la optimización debe tender al costo mínimo en la gestión del recurso energético que abastezca a la carga. La ecuación (21) establece un análisis de sumatorio de combinaciones de potencia de las fuentes de energía dependiendo como se encuentre en su operación pueden existir combinaciones panel fotovoltaico y turbina eólica o turbina eólica y generador térmico; etc. En la ecuación (22) se encuentran las variables para la gestión energética en el respectivo análisis también se consideró un incremento en el valor de la carga considerado como un factor de seguridad esto debido a la intermitencia de los recursos. Cabe destacar que la comparación es entre los costos de inversión y operación en un día es por ello que se ejecuta una sumatoria de tiempo y también se hace una sumatoria de escenarios multiplicado por la probabilidad de cada uno del escenario que son equiprobables en vista que se está ejecutando una optimización de enteros mixtos.

$Min\{IC + OC\}$ ecu. [20]

- **MODELO ii)**

$$IC = \frac{CRF}{8760} T [c^{PV} \sum x_j^{PV} + c^{WT} \sum x_j^{WT} + c^{GT} \sum x_j^{GT} + c^{BESS} \sum x_j^{BESS}]$$

ecu. [21]

$$OC = \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^T \pi_s [c^{ENS} ENS_{s,t} + \sum c^{PV,curt} P_{j,s,t}^{PV,curt} + \sum c^{WT,curt} P_{j,s,t}^{WT,curt} + \sum c^{diesel,curt} f_{j,s,t}^{diesel,curt} + \sum c^{CO2} E_{j,s,t}^{CO2}]$$

ecu. [22]

PARÁMETROS:

CRF : Factor de recuperación de Capital en un año de trabajo (8.760 horas)

T : Tiempo de evaluación

c^{PV} : Costo por KW instalado del sistema fotovoltaico (\$/KW)

c^{WT} : Costo por KW instalado del sistema eólico (\$/KW)

c^{BESS} : Costo por KW instalado del sistema baterías (\$/KW)

c^{GT} : Costo por KW instalado del sistema de generación térmica (\$/KW)

c^{ENS} : Costo de Energía No Suministrada (\$/KW)

$c^{PV,curt}$: Coste de reducción de potencia activa del sistema fotovoltaico (\$/KW)

$c^{WT,curt}$: Coste de reducción de potencia activa del sistema eólico (\$/KW)

$c^{diesel,curt}$: Coste de reducción de potencia activa del sistema diesel (\$/KW)

c^{CO2} : Costo de emisiones de CO₂

N : Número de escenarios

VARIABLES:

$P_{j,s,t}^{PV,curt}$: Reducción de energía por sistema fotovoltaico [kWh]

$P_{j,s,t}^{WT,curt}$: Reducción de energía por sistema eólico [kWh]

$P_{j,s,t}^{BESS,dis}$: Descarga de energía a BESS [kWh]

$f_{j,s,t}^{diesel,curt}$: Consumo de combustible

$E_{j,s,t}^{CO2}$: Emisiones de CO₂ [Ton]

CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II.

- Se desarrolló la descripción de la propuesta planteada mediante una metodología de investigación de campo con la incorporación de equipos tecnológicos a través de métodos informáticos consolidando valores promedio por hora, esto permitió obtener como se encuentra la disponibilidad de recursos por día. También ejecutar un análisis del comportamiento de la curva de carga.
- Se planteó los modelos matemáticos de cada uno de los equipos que intervienen en la Microred distribuida con sus respectivas restricciones y estableciendo parámetros dentro de la optimización en la implementación y en la operación, estableciendo un modelo optimizador.
- Se estableció las ecuaciones de la función objetivo que permita obtener un costo de inversión económico de acuerdo a las condiciones técnicas y un sistema óptimo en la gestión de los recursos energéticos que puedan satisfacer el perfil de carga.

CAPITULO III. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1 Análisis de resultados

3.1.1 Marco metodológico para analizar los resultados a obtener

En la metodología aplicada para la obtención de resultados de la planificación óptima de la Micro red aislada se puede observar en la figura 22, y se detalla tres etapas para obtener los resultados óptimos en instalación y operación.

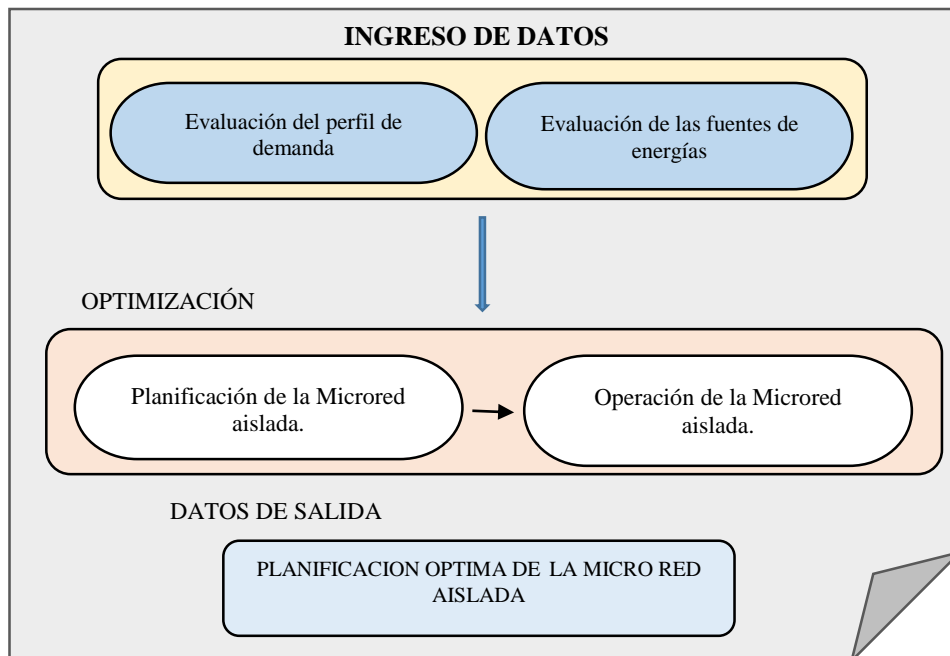


Figura 22 Marco metodológico

3.1.2 Programación del problema de optimización.

Para analizar las condiciones óptimas tanto en la implementación como en la operación se estableció un problema de optimización analizando dos escenarios i) sumatoria considerando máximas potencias ii) enteros mixtos, con el objetivo que la energía eléctrica no sea interrumpida de acuerdo a las variables de entrada de los recursos energéticos eólico y solar con sus respectivas intermitencias, garantice el suministro de energía eléctrica las 24 horas del día todo el año. La función objetivo

a considerarse esta en las condiciones de minimizar los costos de inversión en el sistema y el costo de operación, durante todo el día existiendo una evaluación continua durante todo el día de la variación de carga y la intermitencia de las fuentes renovables, así como también la evaluación se lo realizo durante un año, considerando escenarios en meses de alta demanda como noviembre o diciembre. Para ejecución de la programación optima se resuelve utilizando el software FICO XPRESS 8.8.0 [30] en la misma que ingresan la formulación de las ecuaciones (3) – (22), en el **ANEXO H y E** 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 llega a una solución.

3.1.3 Costos considerados para las variables de ingreso al programa de optimización.

Para la planificación optima de recursos energéticos distribuidos se considera un sistema fotovoltaico, eólico, baterías y un grupo electrógeno a diésel dentro del portafolio de inversión como tecnologías candidatas. El problema se propone la aplicación de un algoritmo de optimización, en el cual se consideran dos enfoques los cuales se describen a continuación. Adicionalmente para los dos modelos se considera el costo del combustible del generador diésel a nivel nacional y del costo de emisiones de CO2 según el mercado de carbono. Para que la implementación sea económicamente de acuerdo al usuario se considera una restricción económica de \$6.000 dólares, en el ANEXO D se muestra los costos considerados en el algoritmo.

- a) Se considera un caso (i)* al escenario se considera por potencia máxima instalada de formulación matemática dentro de los costos de inversión y los costos de operación de la microrred. En la tabla 10 se puede observar los datos de entrada a ser evaluados por el algoritmo considerando el costo económico por KWh generado estos datos ayudan a la gestión energética.

TABLA 10. COSTOS DEL KWH DE POTENCIA MÁXIMA.

TECNOLOGÍA	COSTO (\$/KWh)	REFERENCIA
PV SYSTEM	1.500	Hybrid-Microgrid Planning, Sizing and Optimization for an Industrial Demand in Pakistan
WT SYSTEM	2.375	Optimal Planning for Electricity-Hydrogen Integrated Energy System Considering Power to Hydrogen and Heat and Seasonal Storage
BESS (ION LITIO)	1.200	Break-Even Points of Battery Energy Storage Systems for Peak Shaving Applications
FUEL SYSTEM	550	Hybrid-Microgrid Planning, Sizing and Optimization for an Industrial Demand in Pakistan

```

Cost_PV= 1500 !Costo PV $/KW + COSTO INVERSOR $/KW
Cost_WT= 2375 !Costo WT $/KW + COSTO INVERSOR $/KW
Cost_BESS= 300 !Costo BESS $/KW + COSTO INVERSOR $/KW
Cost_GAS= 550 !Costo GAS $/KW

```

b) *Se considera un caso (ii)* se considera un escenario por costos de unidades por equipos como el desglose la función objetivo considerando las variables de tiempo, y la variable de factor de recuperación de capital que para ser un proyecto de micro red para una Hostería se considera un tiempo de 5 años. En la tabla 11 se detalla el tipo de tecnología a implementarse el costo por equipo y la capacidad de potencia que va a suministrar a la Micro red.

TABLA 11 . COSTO POR ANÁLISIS DE EQUIPOS.

TECNOLOGÍA	COSTO POR EQUIPO (\$)	CAPACIDAD (W)	REFERENCIA
PV SYSTEM	360	550	https://autosolar.pe/paneles-solares-24v/panel-solar-550w-24v-monocristalino-perc-ecogreen
WT SYSTEM	2160	1800	https://www.proviento.com.pe/aerogeneradores.html
BESS (ION LITIO)	1.200	NA	Break-Even Points of Battery Energy Storage Systems for Peak Shaving Applications
FUEL SYSTEM	460	1000	https://listado.mercadolibre.com.ec/generador-yamaha-4000#D[A:generador%20yamaha%204000]
CONVERSOR	350	800 VA	https://autosolar.es/inversores-24v/inversor-victron-phoenix-24v-800va

```

!COSTOS
Cost_FV= 360+350 !Costo panel + inversor
Cost_WT= 2160 !Costo turbina + inversor
Cost_BESS= 1210 !Costo baterias $/KW + costo inversor $/KW
!Cost_GAS= 2200 !Costo generador 4KW
Cost_GAS= 460 !Costo generador 1KW

```

Por otro lado, se establecen curvas diarias representativas de cada mes de irradiación solar, velocidad de viento y demanda, los cuales se establecen como escenarios equiprobables de ocurrencia dentro del problema de optimización.

3.2 Resultados y análisis de los escenarios propuestos

3.2.1 Consideración de Resultados analizados mediante potencia máxima instalada

Mediante la consideración del modelo (i) cuya programación se encuentra en el ANEXO E de potencias máximas de los equipos el algoritmo determina un análisis económico que se muestra en la tabla 12 se muestra los resultados obtenidos de la optimización tomando en consideración sus potencias y entrega un valor económico de participación concentrándose de manera especial en el recurso eólico que propone una inversión de \$4.368,90 esto debido a que es el recurso energético natural que es alto en el lugar, la optimización del sistema propone que no se instale equipos para generación fotovoltaica esto debido a que existe un bajo nivel de radiación solar y la temperatura que afecta la eficiencia en la generación fotovoltaica en la tabla 4 se puede apreciar la incidencia promedio de radiación, donde se destaca un pico máximo de radiación de 3 a 4 horas en las 24 horas del día considerando un 16% de disponibilidad para satisfacer la carga o vertimiento.

TABLA 12 . RESULTADOS DE MODELO (I) PARA LA INSTALACIÓN OPTIMA EN CANTIDAD DE EQUIPOS

	Potencia instalada [kW]	CI [USD]
Sistema eólico	1,84	\$4.368,90
Baterías	2,21	\$663,24
Generación diésel	1,76	\$967,86
Total	5,81	\$6.000,00

3.2.2 Análisis de optimización en la gestión de recursos en el año considerando meses de máximo y mínimo consumo.

Dentro de los resultados de salida se consideran un análisis de los meses febrero, agosto y diciembre.

a) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de febrero. - Se toma como referencia este mes ya que de acuerdo al análisis de carga con respecto a otros meses posee el menor consumo. En el grafico 23 se puede observar que la carga está siendo suplida por la generación eólica en su gran cantidad existe vertimiento en la generación eléctrica durante la media noche de 23:00 a 24:00 esto ayuda a mantener cargadas las baterías y puedan ayudar a suplir en las horas pico que se observa de 16:00 a 17:00 y una parte en la noche, también se puede observar que existe entrada de generación térmica por alrededor de 15 horas. Dentro de la consideración de instalación de equipos la optimización no considera a la energía fotovoltaica óptima para operar en vista que el costo de instalación u operación no está dentro de las consideraciones eficientes.

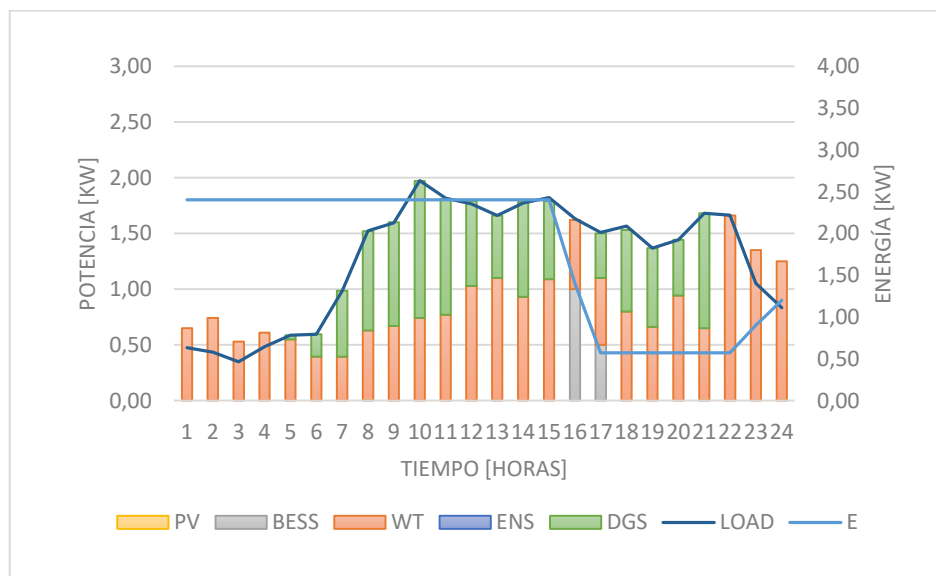


Figura 23. Energía aportada por cada equipo en Febrero

En la figura 24 se observa de manera clara el porcentaje de participación de cada una de las fuentes de energía teniendo mayor incidencia con un 65% fuentes de energía renovable y con 35% la energía por combustión interna para poder suplir la demanda del mes de febrero como se analizó en la figura 24, para un perfil de carga aproximada de 756KWh, es decir 265KWh al mes está siendo suplida por energía térmica.

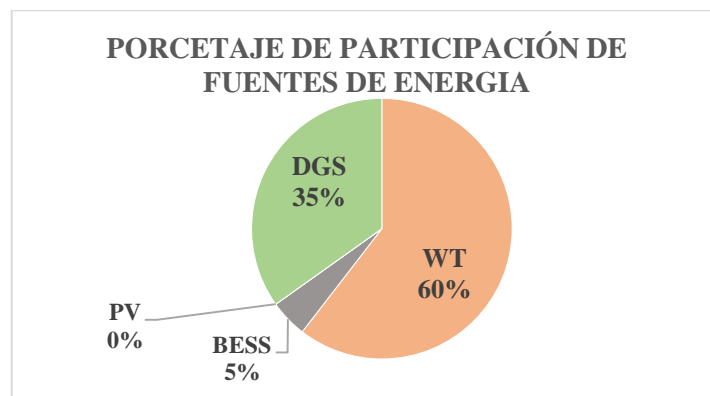


Figura 24. Gráfico en porcentajes de participación de las fuentes de energía

b) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de agosto.

Dentro de los análisis se consideró el mes de agosto que posee una carga mensual en vista que se espera tener un ligero incremento en la potencia requerida, bajo características diferentes de recursos renovables que varían de acuerdo a la fecha. En la figura 25 se puede apreciar que para suplir una carga mensual de 1,05 KWh con una variación notable de los equipos de generador térmico que alcanza 14.72 KWh mientras que el aporte de la energía eólica y de BESS es 15.86 KWh.

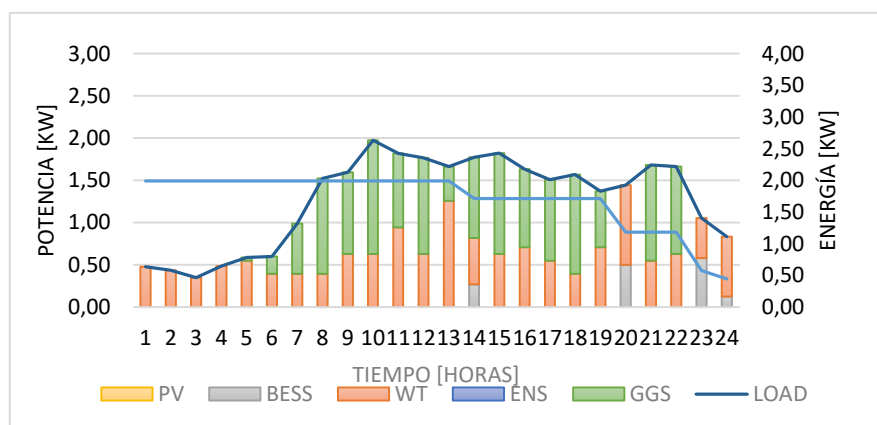


Figura 25. Energía aportada por cada equipo agosto

En el gráfico 26 se observa en porcentaje del aporte energético de cada uno de los elementos al existir una variación de los recursos energéticos primarios, existe un incremento al 48% de aporte por parte del generador térmico.

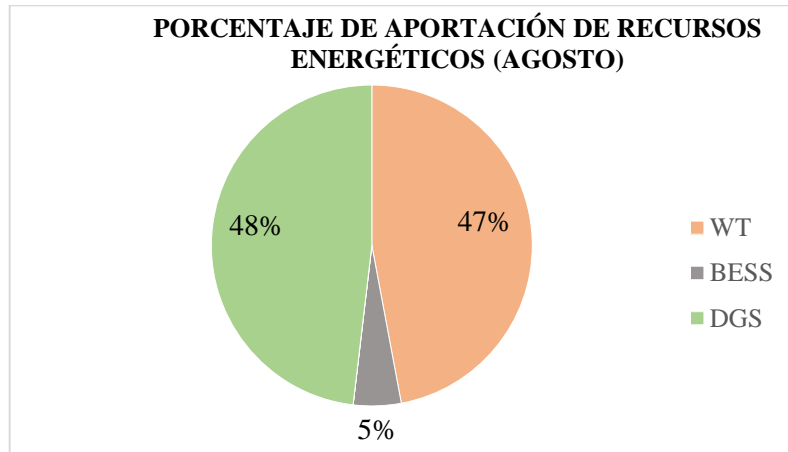


Figura 26. Gráfico en porcentajes de aporte energético de agosto.

c) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de diciembre.

En el mes de diciembre se espera tener un máximo consumo de energía que llega hasta los 3,6KW de acuerdo a la gestión energética del optimizador permite un aporte 2.39 KWh de energía renovable y el 0,95 KWh de generación térmica.

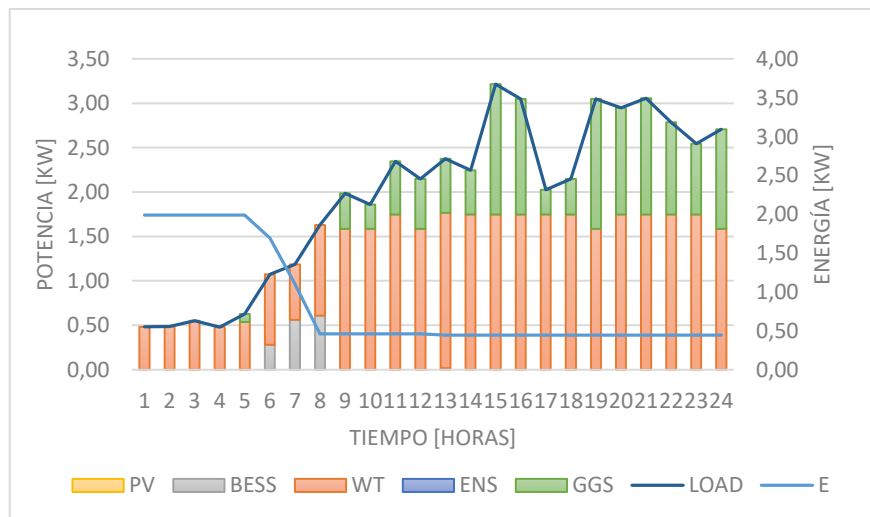


Figura 27. Energía aportada por cada equipo diciembre.

De acuerdo al análisis energético del mes de diciembre se puede determinar que el 71% de la carga es abastecida por el sistema de energía renovables y el 27% es abastecida por el generador térmico.

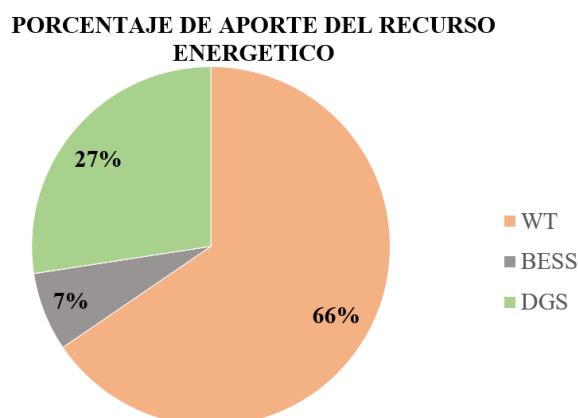


Figura 28. Gráfico en porcentajes de aporte energético de diciembre.

3.2.3 Análisis de despacho económico de los recursos energéticos

El algoritmo de optimización posee la condición de restringir de manera económica el recurso energético de tal forma que la función objetivo analice el costo del KWh que genera. En la tabla 13 se realiza el resultado del costo de KWh del sistema instalado en cada uno de los meses.

TABLA 13 .COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA

MESES DE ESTUDIO	POTENCIA TOTAL GENERADA	COSTO DE KWH
FEBRERO	32,78 KW	0,52 \$ / KWh
AGOSTO	30,58 KW	0,47 \$ /KWh
DICIEMBRE	46,9 KW	0,46 \$/KWh

También para el análisis económico se consideró el costo por consumo de diésel por día, así como también la minimización de algún costo por penalización en el caso de impacto ambiental como se muestra en la tabla 14.

TABLA 14 . COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA

	Modelo i
Consumo diésel	\$1,86
Emisiones de_co2	\$3,95
Total de Costo	\$ 5,81

3.3 Aplicación del algoritmo entero mixto

3.3.1 Consideración de Resultados analizados mediante algoritmo entero mixto en condiciones de costo por unidades.

El modelo matemático (ii) considerado como un modelo entero mixto en vista que se tendrá una decisión de aceptar o no una decisión en el funcionamiento de los equipos considerado en la ecuación [21] y [22] que considera índice y tiempos de escenarios probables (s, ζ) dentro de los mismos se establecerán cual será la gestión energética óptima considerando que la implementación está restringida a un costo de inversión de \$6.000, la programación está considerada en el ANEXO H , el funcionamiento del generador debe ser el mínimo para no exista impacto ambiental.

De acuerdo a las variables y las consideraciones establecidas en la función objetivo en la programación óptima, los resultados se encuentran en la tabla 15 se puede analizar que el algoritmo establece una inversión de \$5.989,60, en condiciones máximas podría llegar a 9,4KW que satisface totalmente la carga, así como también las intermitencias de los recursos renovables.

TABLA 15 . RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO DE ENTEROS MIXTOS DE LA ECUACIÓN [21][22]

	Número de equipos	Potencia instalada [kW]	CI [USD]
Sistema eólico	2	3,6	\$4.320,00
Baterías	4	4,8	\$1.209,60
Generación diésel	1	1	\$460,00
Total	7	9,4	\$5.989,60

3.3.2 Análisis de resultados obtenidos de acuerdo a meses de estudio.

Dentro de los resultados de salida, se considera como se vio anteriormente un análisis de los meses febrero, agosto y diciembre.

a) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de febrero.

De acuerdo a la figura 29 se observa que el modelo de optimización de enteros mixtos permite realizar una mejor gestión del recurso energético de acuerdo a la tabla 15 el sistema propone la instalación de 2 aerogeneradores de 1.800W esto permite que el sistema prevalezca como elemento energético principal que podría abastecer en condiciones máximas hasta 3.6KW, se observa que existe un incremento de etapas de vertimiento en la madrugada de 3:00 a 6:00 am en las horas pico de 12:00 a 3:00 y posteriormente en la noche de manera especial de 11:00 a 12:00 pm esto permite que exista almacenamiento de energía en las baterías que están en todo momento cargadas para servir como respaldo es así que entrega energía al sistema en distintas horas teniendo un máximo respaldo en horas pico de la noche de 9:00 a 10:00 pm. De acuerdo a este resultado se puede verificar con respecto a la ecuación de máxima potencia [18] de la figura 29 existe una reducción total del uso de un generador de combustión.

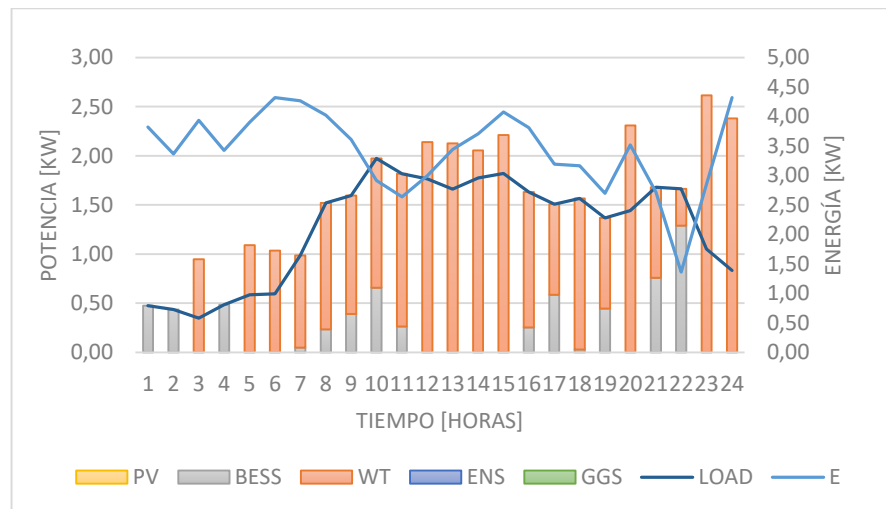


Figura 29. Energía aportada por cada equipo febrero.

En la figura 30 se aprecia de forma clara que existe un aporte del 100% de energía renovable, prioriza la generación eólica, en este primer análisis de resultados el algoritmo está funcionando de acuerdo a la función objetivo. La cantidad de baterías propuestas aportan a suplir las calidades de viento en las horas pico de la noche.

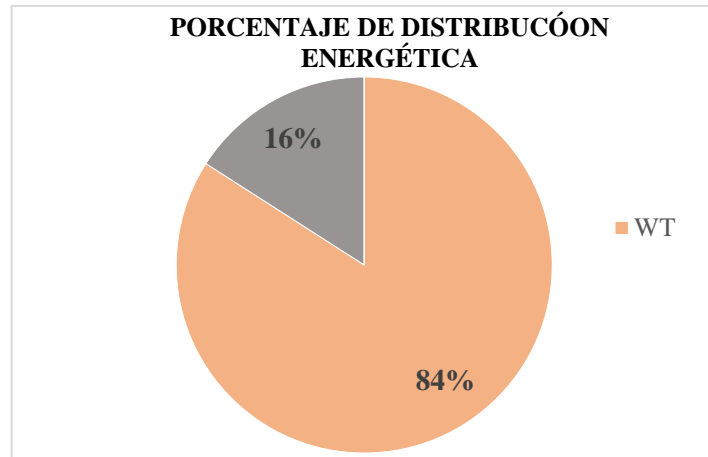


Figura 30. Gráfico en porcentajes de aporte energético de febrero

b) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de agosto.

El mes de agosto se consideró como análisis en vista que existe una notoria variación en los recursos naturales y la carga se mantiene similar al mes de febrero. De acuerdo a los datos analizados en la figura 29 y al compararla con la figura 31 los recursos energéticos están siendo distribuidos con el objetivo de usar en lo mínimo el generador de combustión el algoritmo permite tiempos de vertimiento para mantener carga en la batería, de acuerdo a la fecha que existe disminución en el potencial eólico, por lo que existe una ligera inyección de generación térmica en las horas pico de manera especial a las 9:00am, 12:00, 17:00 y 21:00, existiendo un consumo de 4,5 KW.

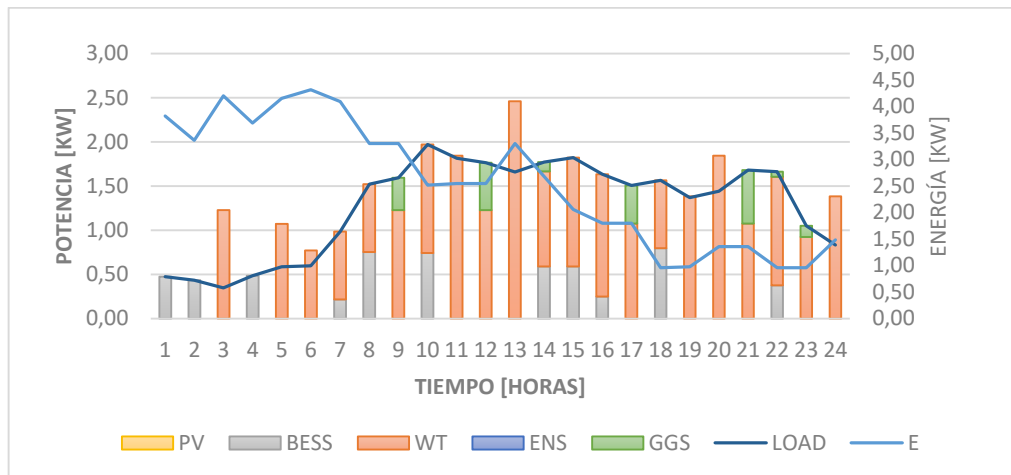


Figura 31. Energía aportada por cada equipo agosto.

En la figura 32 se aprecia que el porcentaje de aporte de energía limpia es del 92% frente a un 8% de intervención de energía de combustión de manera muy esporádica, con ello se establece que la gestión la energía mantiene su objetivo,

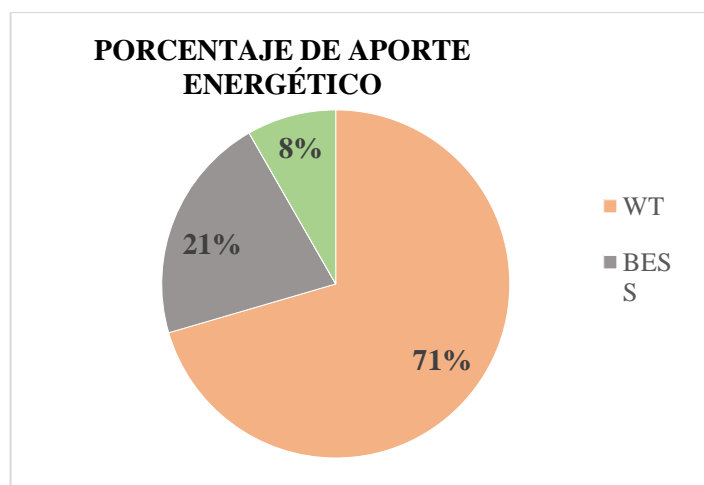


Figura 32. Gráfico en porcentajes de aporte energético de agosto.

c) Análisis en la gestión de recursos energéticos del mes de diciembre.

En el mes de diciembre existe un incremento de la carga y de igual manera una variación de los recursos naturales es así que se observa en la figura 33 la generación eólica prevalece como fuente de energía principal los dos generadores eólicos que ha propuesto el optimizador es suficiente para abastecer la carga considerando las intermitencias, existe también en varias horas del día el respaldo de las BESS e incluso la combinación de batería energía - eólica en las horas pico

de medio día y en la noche una inyección pequeña de generación térmica de 5,405 KW

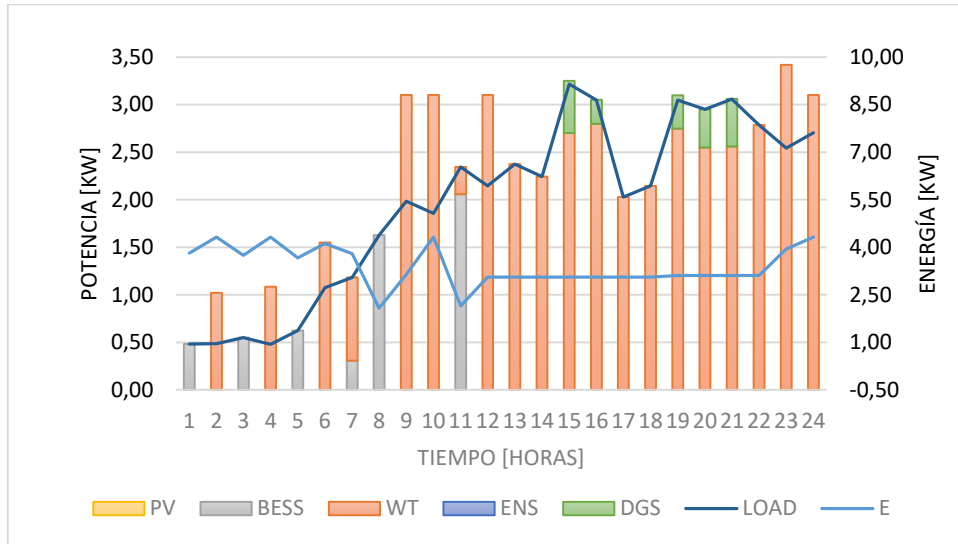


Figura 33. Energía aportada por cada equipo diciembre.

En la figura 34 se observa el porcentaje de aporte energético de cada equipo de generación es así que el 95,72% de la energía suministrada es renovable y apenas el 4.36% del recurso es térmica cumpliendo el objetivo que era minimizar el impacto ambiental por la emanación de CO₂ al ambiente, uso de combustible que para la distancia encarece su costo.

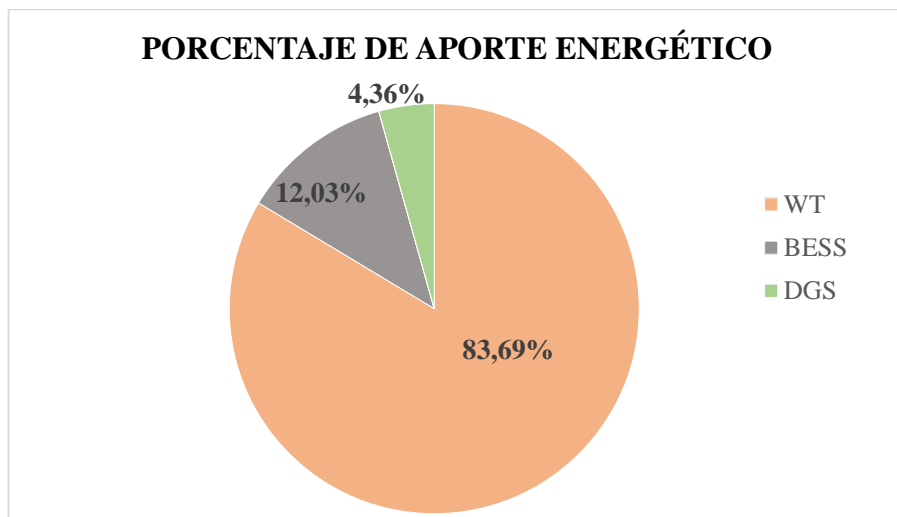


Figura 34. Gráfico en porcentajes de aporte energético de diciembre.

3.3.3 Análisis de despacho económico de los recursos energéticos

El algoritmo de optimización de enteros mixtos ofrece una mejor gestión en la administración de los recursos existiendo una reducción del 80% del generador de combustión y los dos generadores eólicos propuestos se consideran como fuente de energía principal para poder hacer gestión con las otras fuentes, en la tabla 16 se puede determinar un costo por KWh en el mes de consumo.

TABLA 16 . COSTO DE LA ENERGÍA SUMINISTRADA

MESES DE ESTUDIO	POTENCIA TOTAL GENERADA	COSTO DE KWH
FEBRERO	32,78 KW	0,27 \$ / KWh
AGOSTO	30,58 KW	0,35 \$ /KWh
DICIEMBRE	46,9 KW	0,31 \$/KWh

Como se puede observar los resultados del modelo (ii) muestran un menor costo de operación como se muestra en la tabla 17. Cabe mencionar que el costo operacional asociado a las fuentes de energías no convencionales es cero.

TABLA 17 . COSTOS DE OPERACIÓN DIARIOS

	Modelo de enteros mixtos ii
CONSUMO DIÉSEL [USD/DÍA]	\$0,11
EMISIONES DE_CO₂ [USD/DÍA]	\$0,23
TOTAL	\$0,34

3.4 Análisis del recurso energético considerando eliminar el generador térmico como caso de estudio el mes de agosto.

De acuerdo a los análisis realizados en el mes de agosto que con el modelo de máximas potencias el algoritmo considera un gran porcentaje de consumo energético de energía térmica. Se analiza un nuevo escenario en el mes de agosto

considerando que el generador térmico sale de servicio o se lo instala, para la cual el algoritmo planifica la gestión energética el ingreso de generación fotovoltaica únicamente en las horas pico de 11:00 a 15:00, tal como se ilustra en la figura 35. Se aprecia que con el ingreso del panel fotovoltaico el sistema se mantendría con un 0% de ingreso de energía térmica con ello la eliminación de emanación de CO₂ al ambiente que en las mejores condiciones de operación envía 27Kg de CO₂ al mes, en las horas pico ingresan a aportar a carga las tres fuentes de energía desde las 12:00 hasta las 14:00, la gráfica también se aprecia que existe horas de vertimiento para mantener la carga en la batería.

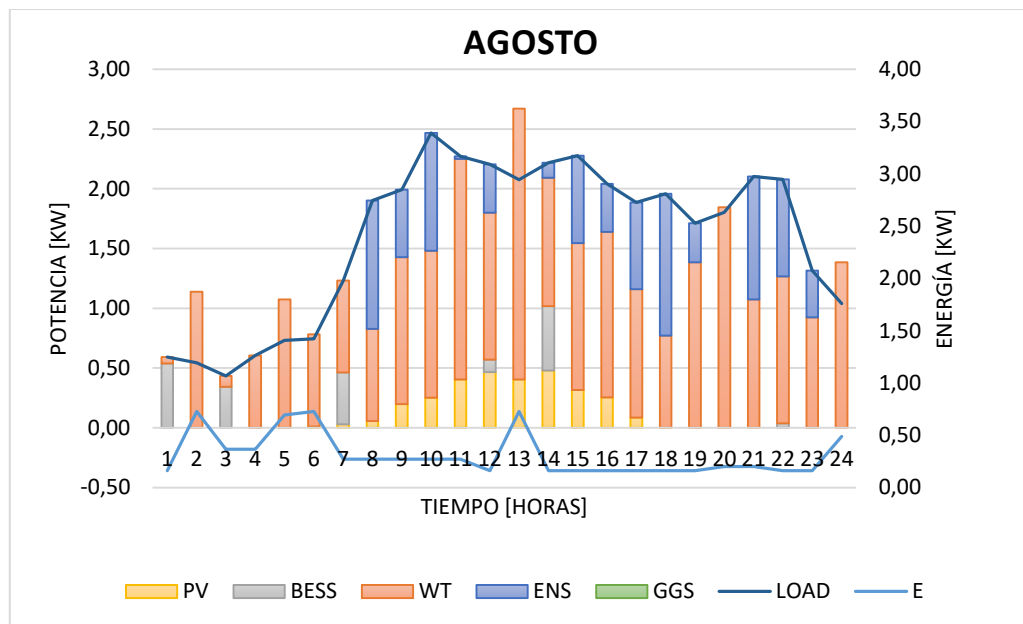


Figura 35. Curva de optimización de los recursos energéticos.

3.4.1 Consideraciones técnicas que establece el optimizador

De acuerdo a la energía generada por los recursos naturales el optimizador de enteros mixtos establece una planificación que para satisfacer la carga lo más óptimo es instalar 1 panel fotovoltaico de 550 W, 2 aerogeneradores con una potencia instalada de 3600W, no existe ingreso de generación térmica, y la utilización de BESS con un aporte de 0.808KW hacia el sistema, tal como muestra los datos arrojados por el optimizador en la figura 36.

```

Objective value is 274.8186114
GAP value is 0.07565212002
Inversión $6000
Number of PV installed: 1
Total capacity of PV installed: 0.55kW
Number of WT installed: 2
Total capacity of WT installed: 3.6kW
Number of PGAS installed: 0
Total capacity of PGAS installed: 0kW
Total capacity of BESS installed: 0.8083333333 kw

```

Figura 36. Resultados óptimos que se obtiene sin generador térmico.

3.4.2 Análisis económico del sistema sin considerar GGS

En la tabla 18 muestra los datos obtenidos dentro de la planificación óptima económica, se puede observar de las tres fuentes renovables el valor económico que representa cada una.

TABLA 18 . COSTO POR POTENCIA INSTALADA

	PV_INSTALLED	WT_INSTALLED	BESS_INSTALLED	PGAS_INSTALLED
1	0,55	3,6	0,81	0,00

En la tabla 19 se aprecia que el costo de inversión que tiende al valor objetivo propuesto de \$6.000, el costo de operación que el sistema planteado es de \$269,91, mantiene un costo de inversión de \$4,90 por día lo que permite una tasa de recuperación propuesta de 3 a 5 años y un costo de \$0,13 por KWh.

TABLA 19 . ANÁLISIS DE COSTOS POR OPERACIÓN E INVERSIÓN

CO	CO	CI al día	Energía /día	USD/KWh
\$6.000	\$269,91	\$4,90	\$38,22	\$0,13

3.5 Análisis del recurso energético considerando las cuatro fuentes de energía como caso de análisis el mes de agosto.

En la figura 37 se puede apreciar que en el mes de agosto están ingresando las cuatro fuentes de energía para que el optimizador planifique de acuerdo a la función objetivo, en este mes con el afán de minimizar la emanación de CO₂ el optimizador

planifica un incremento de inyección de energía solar en horas pico donde desde las 14:00 hasta las 17:00 existe un vertimiento considerable a causa de la energía eólica que ayuda a mantener cargadas las batería para que ingresen con mayor frecuencia en horas de la mañana y a suplir los picos de la noche.

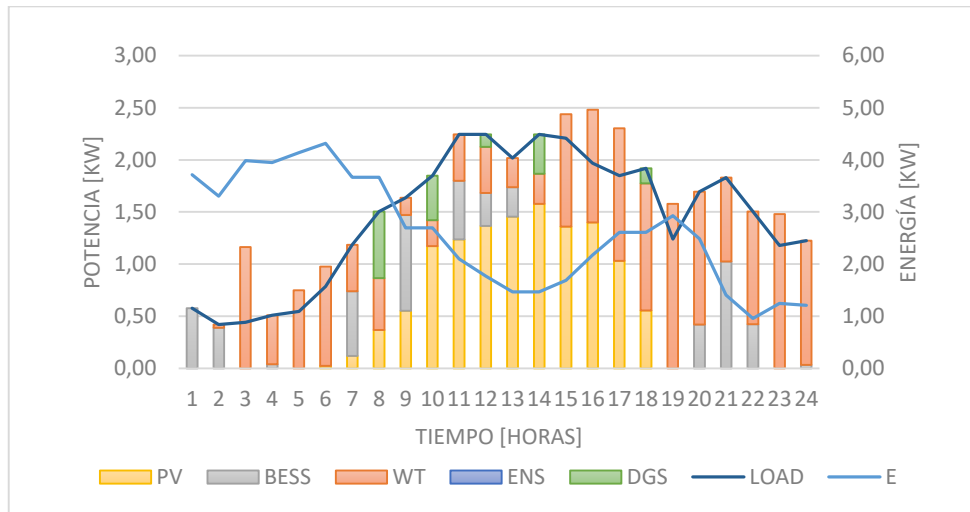


Figura 37 Curva de ingreso de las cuatro fuentes de energía.

En la figura 38 se aprecia que con el ingreso de la energía fotovoltaica permite hacer una planificación en el pico máximo solar, de esta forma existe un incremento del 95,1% de energía limpia, disminuyendo hasta un 4,90% de energía térmica.

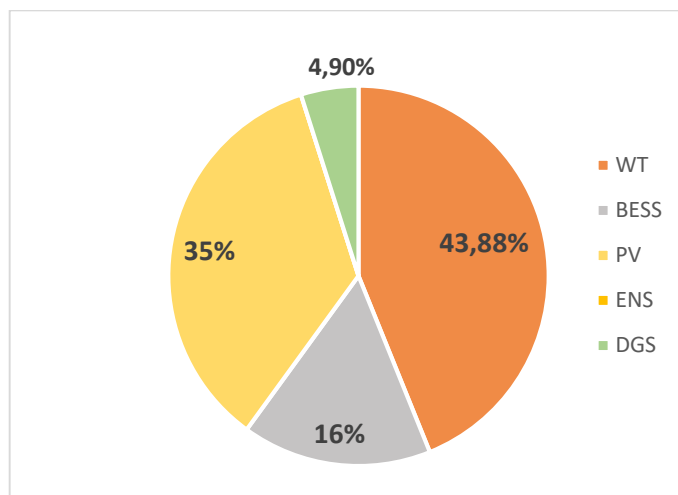


Figura 38 Porcentaje de entrega de energía por cada uno de los equipos.

3.5.1 Consideraciones técnicas que establece el optimizador

De acuerdo a la función objetivo para el costo por instalación debe ser máximo, de acuerdo optimizador en el grafico 39 se aprecia una sentencia de variables con el ingreso de 3 paneles fotovoltaicos, 1 sistema eólico, 4 baterías BESS y 1 generador térmico, logrando de esta tener un costo por instalación de \$5.960.

```

!COSTOS
Cost_PV= 360+350 !Costo panel + inversor
Cost_WT= 2160 !Costo turbina + inversor
Cost_BESS= 1210 !Costo baterias $/KW + costo inversor $/KW
!Cost_GAS= 2200 !Costo generador 4KW
Cost_GAS= 460 !Costo generador 1KW

```

Figura 39. Programación considerando las variables de restricción.

En la tabla 20 se aprecia el costo por el porcentaje de energía eléctrica, que aporta cada de uno de los recursos naturales dentro considerando una potencia instalada de 9,25 KW.

TABLA 20. COSTO TOTAL POR POTENCIA INSTALADA

	Número de equipos	Potencia instalada [kW]	CI [USD]
Sistema fotovoltaico	3	1,65	\$2.130,00
Sistema eólico	1	1,8	\$2.160,00
Baterías	4	4,8	\$1.210,00
Generación a diésel	1	1	\$460,00
Total	9	9,25	\$5.960,00

3.5.2 Análisis económico del sistema considerando las cuatro fuentes de energía.

La función objetivo determina que planificando de acuerdo a la tabla 20 los valores el costo de inversión es \$5.960 lo cual se encuentra dentro de las consideraciones establecidas, un costo de operación de \$1,19, el costo de inversión por día \$4,87 que de la misma forma permitirá una tasa de recuperación de la inversión en un tiempo de 3 a 5 años. En tabla 21 se aprecia el costo por día y por despacho de energía de cada uno de los equipos que de acuerdo a la potencia se mantiene dentro del costo de inversión.

TABLA 21 . COSTO DE LA ENERGÍA POR EQUIPOS

PV_INSTALLED	WT_INSTALLED	BESS_INSTALLED	PGAS_INSTALLED
1,65	1,80	4,80	1,00

3.6 Validación de resultados

3.6.1 Validación de resultados de impacto ambiental

De acuerdo a la EPA [13] considera que la tasa de salida de dióxido de carbono es de 1,021lb de CO₂ por cada KWh de energía eléctrica se puede apreciar en la tabla 22 el análisis comparativo si la carga seria suplida con el 100% de energía térmica y con la incorporación de un sistema distribuido con los dos modelos.

TABLA 22. TABLA COMPARATIVA DE EMANACIÓN DE CO2 AL AMBIENTE

Emanación de CO2 considerando (a) al 100% de carga, (b) modelo de optimizacion1 (c) Modelo de optimización de enteros mixtos

Meses de análisis	Energía Consumida (KWh-mes)	CO2 al 100% de carga	Modelo con máxima potencia		Modelo de optimización de enteros mixtos	
			Potencia entregada (KWh-mes)	CO2 al ambiente (Kg-mes)	Potencia entregada (KWh-mes)	CO2 al ambiente (Kg-mes)
FEBRERO	756	349 Kg	122,15	56,56	0	0
AGOSTO	797	368,87 Kg	382,56	177,14	63,56	29,5
DICIEMBRE	1341	620,65 Kg	362,07	167,65	58,07	27,07

Desde el punto de vista ambiental existe una reducción de emanación de gas CO₂ en febrero del 100%, y en los meses de agosto y diciembre que son los meses de mayor consumo y por ende mayor emanación de gases existe una reducción aproximado del 83%. Por esta consideración se establece que el proyecto es viable.

3.6.2 Análisis técnico – económico.

De acuerdo a las condiciones técnicas el modelo estableció que se instale 2 generadores eólicos, 4 baterías de almacenamiento, un generador térmico, los mismos que su distribución de carga se gestiona con un algoritmo de enteros mixtos el diseño está dentro de los presupuestos establecidos con una inversión máxima de \$6.000 y una tasa de recuperación de 5 años.

3.6.3 Análisis económico recurso energético planificado.

Costo de operación de la Microred

En la tabla 23 se aprecia que de acuerdo a la planificación del algoritmo (i) estima obtener una potencia de generación de 30,58 KW al día de disponibilidad con el ingreso de recursos energéticos con un alto consumo de energía fósil por ende el costo de operación de la microred se verá elevado si se considera una penalización por emisiones de CO2 diaria de \$3.95 diario, estimando un global de \$ 5,88 por día. Los resultados en la planificación del algoritmo (ii) se destaca el aumento del recurso energético eólico, el uso de energía BESS y la disminución de energía fósil por lo tanto el costo diario por penalización de emisión de CO2 es de \$0.23, estimando un global de \$0,72 por día. También se puede apreciar que en los dos casos la energía no suministrada (**ENS**) es cero en vista que la micro red planificada es capaz de suministrar energía a la demanda.

TABLA 23 . COSTO DE OPERACIÓN DE DESPACHO DEL RECURSO ENERGÉTICO

	ALGORITMO (I)	ALGORITMO (II)
Potencia de generación planificada (Kw/día)	30,58	46,59
ENS	\$0,00	\$0,00
P_PV_curt	\$0,00	\$0,00
P_WT_curt	\$0,06	\$0,38
BESS	\$0,00	\$0,01
F_gas	\$1,86	\$0,11
E_co2	\$3,95	\$0,23
TOTAL	5,88	0,72

ENS: Energía no suministrada

P_PV_curt: Energía Fotovoltaica

P_WT_curt: Energía Eólica

BESS: Batería

F_gas: Energía Térmica

E_co2: Costo por penalización por emanación de CO2

Costo mensual promedio por KWh

En la tabla 24 se aprecia un análisis comparativo económico por despacho mensual de KWh considerando la planificación que se establecen los algoritmos, cabe destacar que dicha planificación de los recursos energéticos varía de acuerdo a la disponibilidad por mes en consideración a las mediciones, por lo tanto el valor que se obtiene es un valor promedio es así que de acuerdo al algoritmo (i) se establece que el costo por despacho energético es de 0.32 \$/KWh, en el algoritmo (ii) establece un promedio de 0.17 \$/KWh. Estos costos bajaron en vista que el costo de operación de los recursos eólicos y BESS son los más económicos.

TABLA 24 . COSTO DE OPERACIÓN DE DESPACHO DEL RECURSO ENERGÉTICO POR MES

Costo mensual por despacho de energía por KW/h		
	Algoritmo (i)	Algoritmo (ii)
ENERO	\$ 0,353	\$ 0,18
FEBRERO	\$ 0,353	\$ 0,18
MARZO	\$ 0,368	\$ 0,19
ABRIL	\$ 0,353	\$ 0,18
MAYO	\$ 0,353	\$ 0,18
JUNIO	\$ 0,353	\$ 0,18
JULIO	\$ 0,307	\$ 0,16
AGOSTO	\$ 0,353	\$ 0,18
SEPTIEMBRE	\$ 0,353	\$ 0,18
OCTUBRE	\$ 0,353	\$ 0,18
NOVIEMBRE	\$ 0,212	\$ 0,11
DICIEMBRE	\$ 0,229	\$ 0,12
Promedio	\$ 0,328	\$ 0,17

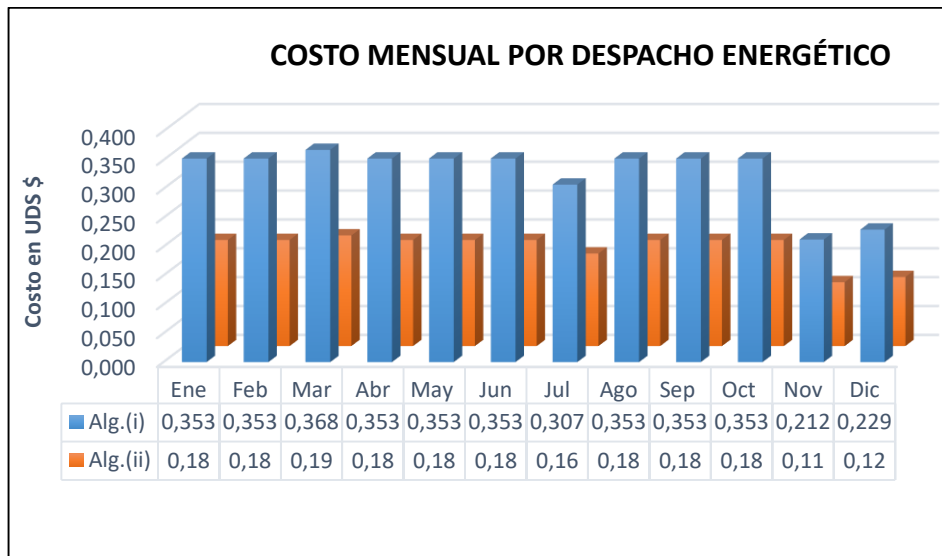


Figura 40 . Variación en los costos por despacho de energía.

3.7 Conclusiones el capítulo

- De acuerdo a las condiciones óptimas de implementación se establecieron como variables de entrada energía solar, eólica, térmica y baterías. El optimizador aplicado en la programación de FICO EXPRES determino de acuerdo a los costos de instalación y operación bajo ninguna condición el panel fotovoltaico entrega energía

- Se establecieron dos modelos matemáticos para determinar la condición optima de implementación y la condición optima de gestión de la energía suministrada de acuerdo a los resultados se pudo determinar que el modelo de enteros mixtos se ajusta a la necesidad local y se encuentra dentro de la restricción objetivo del costo de inversión.

- De acuerdo a la validación del estudio mediante un estudio de campo y mediciones aleatorias que la eficiencia en generación fotovoltaica es relativamente baja en un pico máximo de radiación de 4 horas, por lo que resulta más eficiente implementar dos aerogeneradores para satisfacer la carga y obtener vertimiento para el almacenamiento de energía.

4. CONCLUSIONES GENERALES

- En la presente investigación se establece un marco metodológico un estudio de caso puntual para satisfacer la demanda de una Hostería que brinda descanso utilizando fuentes de energía renovables disponibles al igual que un generador térmico de tal forma que dependiendo como actúen sus potenciales energéticos y la variación de la carga, y la energía generada sea distribuida de acuerdo a la función objetivo que es la de minimizar el impacto de emanación de CO₂ al ambiente.

- Se propuso dos modelos para ser evaluados para la planificación en la implementación que cumpla los requerimientos establecidos dentro de condición económica considerando a minimizar el costo combustible y costo por una penalización debido a la emanación de CO₂ de tal forma que el modelo 1 que es considerando las potencias máximas arroja un costo de \$5,81 por día y de acuerdo al modelo de enteros mixtos de la sumatoria de posibilidades entrega un costo de \$0,34 por día mejorando notablemente el consumo de combustible y emanación de CO₂.

- Tomando en consideración de acuerdo a los análisis comparativos dentro de la reducción de combustible fósil se toma en consideración el mes de mayor carga como es el mes de diciembre el optimizador realiza una planificación del recurso energético, con el modelo de potencias máximas considera que lo más óptimo es que el generador eólico entregue el 66% de la energía necesaria, el sistema de baterías el 7% y el generador térmico de gasolina el 27% no existe vertimiento en esta consideración por ende la carga de batería no es estaba. Con el modelo de enteros mixtos permite hacer una planificación de tal forma que suministra energía con el 83,69% energía eólica, 12,03% con batería y el 4,35% el generador térmico de gasolina.

- De acuerdo a la condición más crítica agosto es el mes que más energía térmica requiere considerando un 48% de la energía requerida esto quiere decir que está aportando con 382,07KWh al mes esto significa una emanación de 177,14 Kg de

CO₂ al ambiente, con una optimización planificada se reduce la utilidad el generador térmico al 8% que es un aporte de 58,07 KWh al mes, es una emanación de 27,07 Kg de CO₂ existiendo una reducción del 83,6% por lo que tiene un impacto ambiental importante.

- El sistema de optimización estableció que no es recomendable instalar paneles fotovoltaicos debido a que se tiene un pico máximo de radiación solar de 3 horas, de todas formas se realizó una modelación considerando poner una potencia de 550W para que aporte en las cuatro horas de máxima radiación al sistema y estableció una reducción en el consumo de energía fósil. Como caso de estudio se consideró el mes de Agosto y estableció que para suplir la carga es necesario que el 43,8% sea eólico, el 35% sea fotovoltaica, 16% BESS y el 4,9% sea energía térmica, logrando minimizar a 1KWh al mes.

5. RECOMENDACIONES.

Los costos asociados a la instalación de cada equipo para el modelo de enteros mixtos, no están considerados por lo que es recomendable que el algoritmo se pueda ampliar para obtener otras variables que ayuden a la toma de decisiones dentro de un proyecto tanto en la implementación como en su planificación energética.

Los costos asociados al traslado de combustible, así como también costos por reparación, mantenimiento no están considerados para el modelo de máxima potencia ni en el modelo estocástico, si se desea tener una aproximación real de este costo, se puede considerar este costo extra.

Se pueden añadir restricciones del flujo máximo de combustible que el generador diésel puede consumir considerando un límite máximo de disponibilidad de combustible para un día.

En post de mejorar y clarificar los resultados también se considera importante ampliar los resultados de acuerdo a todos los gastos directos e indirectos que generan cada una de las fuentes de energía de tal forma de obtener un costo más certero del costo por KWh que mantiene el sistema tendiendo a lo mínimo sin descuidar la implementación y la minimización de CO₂ al ambiente.

Bibliografía

- [1] J. Jamaica, *Estrategias de operación óptimas de Microrredes conectadas a la red*, Santiago de Cali, 2019.
- [2] A. Clavijo, *Despacho Económico de una red de Energía Eléctricas Trabajo de Profundización*, Bogotá, 2015.
- [3] D. Arango, R. Urrango y S. Rivera, «"Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales",» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, n° 25, 2017.
- [4] G. Arguello, "Óptima respuesta a la demanda y despacho económico de energía eléctrica en micro redes basados en árboles de decisión estocástica"; Quito, 2018.
- [5] D. Jimenez, D. Ortíz, A. Perez y M. Orchard, "Lithium-ion Battery Degradation Assessment in Microgrids"; 2018.
- [6] J. Proaño, D. Ortiz, D. Saez y D. Quero, *Economic dispatch for optimal managment of isolated microgrids*, 2016.
- [7] C. F, *Estudio de Factibilidad del Uso de Microgeneración en base a energías renovables en redes de baja tensión.*, Santiago de Chile, 2008.
- [8] Vercelli, «Energías como bienes comunes,» 17 octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/17/que-es-la-microgeneracion-de-energias-renovables>. [Último acceso: 15 01 2022].
- [9] MIEMDNE, *Microgeneración en Uruguay*, Montevideo, 2013.
- [10] Enérgya- VM, Grupo Villar Mir, 21 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.energyavm.es/que-son-las-micro-redes-y-por-que-seran-importantes/>. [Último acceso: 15 01 2022].

- [11] A. Bridam, A. Davoudi y F. L. Lewis, «Distributed control Systems for small - scale power networks,» *IEEE Control Systems magazine*, vol. 34, nº 6, pp. 56-77, 2014.
- [12] C. Bordons, F. García y L. Valverde, «Gestión Óptima de la Energía en Mocrirredes con Generación Renovable,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 12, pp. 117-132, 2015.
- [13] Y. LI y F. Nejabatkhah, «Overview of control, integration and energy managment of microgrods,» *Journal of modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, nº 3, 2014.
- [14] Z. Li, C. Zang, H. Yu y S. Li, «Agente-based distributed and economic automatic generation control for droop-controlled AC microgrids,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, nº 14, 2016.
- [15] E. NORVENTO, «Sistemas de microrredes renovables,» Julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.norvento.com/autoconsumo/microrredes/>. [Último acceso: 16 01 2022].
- [16] F. I. Ávila Swinburn, *Diseño de un sistema de gestión de demanda para micro redes*, Chile: Universidad de Chile, 2013.
- [17] G. NAP, *Energía Solar Fotovoltaica*, Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002.
- [18] H. Rudnick Van De Wyngard, «La Generación Eólica,» *Energía Eólica*, pp. 4-5, 2010.
- [19] Z. J., *Aplication of Renewable Energy*, Hoboken, NJ USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [20] M. Vergara, «Tecnología de Baterías,» [En línea]. Available: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBaterias.pdf>. [Último acceso: 16 01 2022].

- [21] Á. P. Clavijo Reyes, *Despacho económico de una Red de Energía Eléctrica Trabajo de Profundización*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana , 2015.
- [22] A. G, ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA Y DESPACHO ECONÓMICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MICRO REDES BASADOS EN ÁRBOLES DE DECISIÓN ESTOCÁSTICA, Quito: Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [23] M. G, ÓPTIMO CONTROL TERCIARIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE BATERIAS ACOPLADOS A MICRO-REDES EN DC USANDO PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA, Quito: Universidad Politécnica salesiana, 2021.
- [24] R. S., *Modelos y Optimización I*, 2007.
- [25] IPCC (2006). Volume 2 (Energy).SALIR DEL SITIO WEB DE LA EPA INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, GENEVA, SWITZERLAND 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories .
- [26] EPA (2020). eGRID, DATOS DEL FACTOR NACIONAL ANUAL DE EMISIONES DE LOS EE. UU DEL AÑO 2018. Agencia de Protección Ambiental de EE. UU., Washington, D.C.
- [27] PARRA René, CO2 EMISSION FACTOR FOR ELECTRICITY GENERATION IN ECUADOR DURING THE PERIOD 2001 – 2014, Artículo Avances de Ciencias de la Ingeniería Publicado en línea/Published on Web: 2015/12/30. Impreso/Printed: 2015/12/30
- [28] M.A.G.E.E Granda Gutiérrez O.A Orta, J.C. Díaz Guillen, M.A. Jiménez, M. Osorio "MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES", Septiembre 2014,2013, doi:1013140/2.1.4192.8968.
- [29] GUEVARA Díaz, José Manuel, Cuantificación del perfil del viento hasta 100 m de altura desde la superficie y su incidencia en la climatología eólica. Terra

Nueva Etapa, Universidad Central de Venezuela Julio – Diciembre 2013, pp81-101.

[30] “Fico xpress optimization suite available: <https://www.fico.com/en/products> Feb. 2021.

[31] A. V. Lozano, M. Aguirre-Velasco, M. Saltos-Rodriguez, D. Ortiz-Villalba, PRACTICAL FRAMEWORK FOR OPTIMAL PLANNING OF ISOLATED RURAL MICROGRIDS, Conference: XVI Multidisciplinary International Congresson Science and Technology, June 2021.

ANEXO A

ANEXO A

TOMA DE DATOS DE ENERGIA
SOLAR Y EOLICA

1 - 1

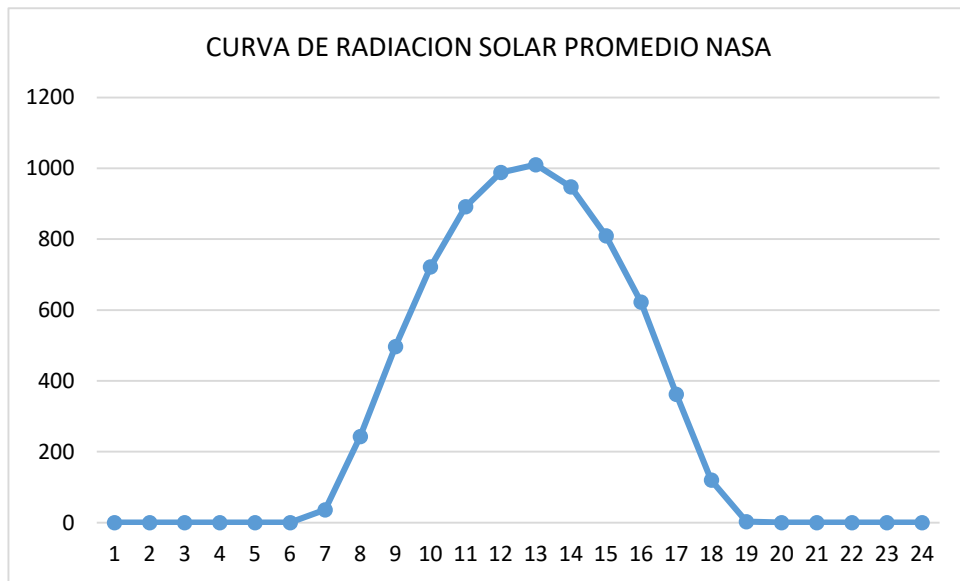


(a) Mediciones del potencial generado de un panel monocristalino.



(b) Medición del potencial eólico

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	22,39	15,69	22,05	32,12	35,24	27,23	19,88	24,69	45,25	74,39	73,68	44,35	36
7	218,90	197,61	221,79	243,61	234,82	213,56	194,33	218,32	273,72	322,20	311,29	261,40	243
8	477,86	461,54	489,47	497,92	477,09	446,92	431,24	469,77	538,90	586,55	566,99	514,02	497
9	712,09	701,09	718,10	729,79	694,39	657,25	648,59	696,92	768,88	809,71	784,82	734,81	721
10	892,16	888,28	905,02	904,18	855,89	815,96	817,93	868,40	938,07	968,80	940,64	898,94	891
11	998,68	1008,57	1013,67	1004,62	947,26	907,14	913,09	969,13	1031,14	1049,54	1020,62	991,61	988
12	1032,97	1026,70	1041,16	1026,18	960,36	937,60	953,92	1016,53	1053,18	1051,04	1015,68	1009,27	1010
13	977,04	975,39	989,10	962,94	894,97	880,43	901,57	958,82	983,03	968,47	933,56	943,56	947
14	852,58	850,70	855,78	819,92	756,41	752,07	776,46	823,62	833,53	814,17	776,33	801,66	809
15	656,45	657,53	657,51	801,01	558,18	563,50	588,99	624,62	618,76	584,31	557,64	596,39	622
16	413,61	414,20	414,80	361,49	323,74	336,21	360,35	380,84	361,67	323,54	304,97	351,24	362
17	159,69	164,34	156,07	116,76	99,07	114,36	127,38	134,31	108,35	74,93	69,72	111,00	120
18	7,46	10,51	6,95	0,37	0,00	0,00	3,97	2,44	0,00	0,00	0,00	0,24	3
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



COSTOS MODELO 1 (DIMENSIONAMIENTO GENERAL)

TABLE I

PARAMETERS OF CANDIDATE EQUIPMENT

Equipment	Efficiency	Investment cost
ED	<i>variable</i>	1490.3 (\$/kW)
GT	0.3	2067.1 (\$/kW)
EB	0.9	178.84 (\$/kW)
AC	1.2	183.01 (\$/kW)
BT	0.95	52.16 (\$/kWh)
TT	0.8	26.08 (\$/kWh)
HS	0.95	15 (\$/kWh)
SHS	0.95	0.91 (\$/kWh)
PV	-	1162.4 (\$/kW)
WT	-	2374.9 (\$/kW)

Table 4 Sizing options and cost

Sources	Sizes	Capital cost	O&M cost
<i>DiG</i> / kW	0-1500	350 \$/kW	0.03 \$/h/kW
<i>PV</i> / kW	1-3500	1500 & 2000 \$/kW	0 & 15 \$/y/kW
<i>WT</i> / no	10-20	8000 \$/turbine	30 \$/y/turbine
<i>BG</i> / kW	0-800	1000 \$/kW	0.03 \$/h/kW
<i>Battery</i> / string	0-200	150 \$/battery	10 \$/y/battery
<i>Convertor</i> / kW	0-2500	350 \$/kW	0

Table 1. Costs Estimation for Different BESS Technologies.

Technology	Cost Per Unit of Power [\$/kW]	Cost Per Unit of Energy [\$/kWh]
Lead acid	300-600	170-240
NaS	350-1000	240-500
ZnBr	400-700	170-500
Vanadium Redox	400-600	310-520
Lithium ion	400-1200	500-1500



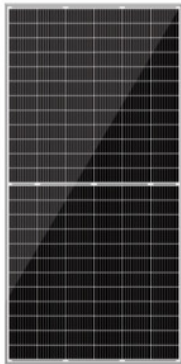
Generador Portatil Yamaha 1000 Wts Et-1

U\$S 446⁸⁷

Generador Portatil Yamaha Gasolina 2600 Wts Ef2600fw

U\$S 982¹⁰

Panel Solar 550W 24V Monocristalino PERC EcoGreen



S/.1.318,87

SIN IGV
S/. 1.117,69



Envío: Envío gratuito a provincias!

Entrega: **Recójalos el lunes 28 de febrero en agencia Marvisur o Shalom de provincias**

Fabricante: EcoGreen | Cod. Artículo: 1002071

Cantidad: - +

AÑADIR AL CARRITO

COMPRAR



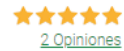
<https://autosolar.pe/paneles-solares-24v/panel-solar-550w-24v-monocristalino-perc-ecogreen>

Inversor Victron Phoenix 24V 800VA



278,47€

SIN IVA
230,14 €



Envío: Entrega gratuita en España!

Entrega: **Recíbelo el viernes 18 de febrero**

Fabricante: Victron | Cod. Artículo: 3005060

Cantidad: - +

Financiación: Calcular cuota

AÑADIR AL CARRITO

COMPRAR

<https://autosolar.es/inversores-24v/inversor-victron-phoenix-24v-800va>

<p>AEROGENERADOR ZONHAN ZH2.0</p>		<p>Potencia nominal: 2000W Potencia max: 2800W</p> <p>Diametro de hélice: 3.2m</p> <p>Velocidad de arranque: 4 m/s</p> <p>Velocidad potencia: 8 m/s</p> <p>Rotación: 380 rpm</p> <p>Voltaje: 24VDC</p> <p>Peso: 88 kg</p>	<p>Aerogenerador robusto de origen chino. El cuerpo es de aluminio para disminuir la corrosión. Hélice con tres aspas de fibra de vidrio</p> <p>IMANES CROMATIZADOS de alta eficiencia (NdFeB) cada uno emperrado para facilitar el mantenimiento.</p>  <p>Controlador de carga con tecnología PWM y entrada de 300W para paneles fotovoltaicos.</p> 	  	<p>2</p> <p>2400,- USD</p>
---------------------------------------	---	---	---	--	--------------------------------

PRECIO REFERENCIAL EÓLICO= \$1200/KW

Para un generador eolico de 1.8kw = \$2160

model "Microred"

uses "mmxprs", "mmsheet"

parameters

Data = 'Microred.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

N_inv: real

NT: real

!WT

v: array(1..24,1..12) of real

end-declarations

initialisations from 'mmsheet.xlsx:'+Data

Irradiancia as "skiph;noindex;Irrad"

TempC as "skiph;noindex;TempC"

v as "skiph;noindex;Vel"

Dem as "skiph;noindex;Dem"

N_inv as "skiph;noindex;N_inv"

NT as "skiph;noindex;NT"

end-initialisations

declarations

T= 24

M= 12

Cost_PV= 1500 !Costo PV \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW

Cost_WT= 2375 !Costo WT \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW

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

Cost_GAS= 550 !Costo GAS \$/KW

Cost_PD_BESS= 0.00114 !Costo de descarga del bess

Cost_curt_WT= 0.05 !Costo de vertimiento de energía

Cost_curt_PV= 0.05

Cost_OP_PGAS= 0.674 !Costo combustible \$/ltr

Cost_CO2= 60.78 !Costo emisión CO2 USD/TON

C_ENS= 100

FRC= 0.298315552

BUDGET=6000

!EÓLICO

vci=2.5 !startup wind speed m/s

vco=50 !maximum wind speed m/s

vr=9 !rate wind speed m/s

n_spv= 0.95 !Eficiencia PV system

n_swt= 0.95 !Eficiencia Wt system

ANEXO E	ALGORITMO MATEMÁTICO CONSIDERANDO POTENCIAS MÁXIMAS DE LOS EQUIPOS	2 - 5
<pre> !COMBUSTIBLE k=0.00258 !Emisión TON/ltr u=9.12 !Poder calorico combustible KWH/ltr ngeg=0.37 !Eficiencia del generador balance: array(1..T,1..M) of linctr ENS,PV,WT,PV_curt,WT_curt,PGAS:array(1..T,1..M) of mpvar PV_installed, WT_installed,PGAS_installed: mpvar E0, BESS_installed: mpvar E,PC_BESS,PD_BESS,B: array(1..24,1..12) of mpvar Eco2,fco2: array(1..T,1..M) of mpvar PD_sol,PC_sol,PV_sol,WT_sol,ENS_sol,PV_curt_sol,WT_curt_sol,E_sol,PGAS_sol: array(1..T,1..M) of real CO_sol,CI_sol,CI_sol1,E0_sol,PV_installed_sol, WT_installed_sol,B_sol, PGAS_installed_sol: real COT: array(1..7) of real CIT: array(1..4) of real end-declarations forall (m in 1..M) do forall (t in 1..T) do FOTOVOLTAICO PV(t,m)=PV_installed*((Irradiancia(t,m)/1000)*(1-NT*(TempC(t,m)-25))*N_inv)- PV_curt(t,m) PV(t,m)<=PV_installed*n_spv PV(t,m)>=0 !EÓLICO if(v(t,m)<=vci or v(t,m)>=vco) then WT(t,m)=0 elif(vci<=v(t,m) and v(t,m)<=vr) then WT(t,m)=WT_installed*((v(t,m)-vci)/(vr-vci))-WT_curt(t,m) end-if WT(t,m)<=WT_installed*n_swt WT(t,m)>=0 !Diesel fco2(t,m)=PGAS(t,m)/(u*ngeg) Eco2(t,m)=k*u*fco2(t,m) PGAS(t,m)<=PGAS_installed PGAS(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_BESS+PC_BESS(t,m)*n_BESS else E(t,m)=E0-PD_BESS(t,m)/n_BESS+PC_BESS(t,m)*n_BESS end-if </pre>		

ANEXO E	ALGORITMO MATEMÁTICO CONSIDERANDO POTENCIAS MÁXIMAS DE LOS EQUIPOS	3 - 5
<pre> forall(i in 1..M)do forall(j in 1..T)do B(j,i) is_binary end-do end-do 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)+WT(t,m)+PD_BESS(t,m)+PGAS(t,m)= Dem(t,m)-ENS(t,m) +PC_BESS(t,m) !Budget PV_installed*Cost_PV+WT_installed*Cost_WT+BESS_installed*Cost_BESS+ PGAS_installed*Cost_GAS<=BUDGET PV_installed*Cost_PV+WT_installed*Cost_WT+BESS_installed*Cost_BESS+ PGAS_installed*Cost_GAS>=0 end-do end-do !Objetivo funcion CI:=(T*FRC/8760)*(Cost_PV*PV_installed+Cost_WT*WT_installed+ Cost_BESS*BESS_installed+ Cost_GAS*PGAS_installed) CO:= sum(i in 1..T, s in 1..M)(ENS(i,s)*C_ENS+PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV+WT_curt(i,s)*Cost_curt_WT+ PD_BESS(i,s)* Cost_PD_BESS+fco2(i,s)*Cost_OP_PGAS+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 </pre>		

ANEXO E	ALGORITMO MATEMÁTICO CONSIDERANDO POTENCIAS MÁXIMAS DE LOS EQUIPOS	4 - 5
<pre> Gap:=getmipgap*100 T_S:=getparam("XPRS_TIME") CI_sol:=getsol(CI*8760/(T*FRC)) CI_sol1:=getsol(CI) CO_sol:=getsol(CO) PV_installed_sol:=getsol(PV_installed) WT_installed_sol:=getsol(WT_installed) PGAS_installed_sol:=getsol(PGAS_installed) E0_sol:=getsol(BESS_installed) writeln("Results:") writeln("Objective value is ", getobjval) writeln("GAP value is ", Gap) writeln("Inversión \$", CI_sol) writeln("PV installed capacity: ", PV_installed_sol,"kW") writeln("Número de paneles instalados: ", PV_installed_sol/0.530) writeln("WT installed capacity: ", WT_installed_sol,"kW") writeln("Número de turbinas eólicas: ", WT_installed_sol/1.7) writeln("BESS installed capacity: ", E0_sol,"kW") writeln("P_GAS installed capacity:", PGAS_installed_sol,"kW") forall (m in 1..M) do forall (t in 1..T) do PV_sol(t,m):=getsol(PV(t,m)) WT_sol(t,m):=getsol(WT(t,m)) ENS_sol(t,m):=getsol(ENS(t,m)) PV_curt_sol(t,m):=getsol(PV_curt(t,m)) WT_curt_sol(t,m):=getsol(WT_curt(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)) PGAS_sol(t,m):=getsol(PGAS(t,m)) end-do end-do COT(1):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s)*C_ENS)*(1/M)) COT(2):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV)*(1/M)) COT(3):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(WT_curt(i,s)*Cost_curt_WT)*(1/M)) COT(5):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(PD_BESS(i,s)*Cost_PD_BESS)*(1/M)) COT(6):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(fco2(i,s)*Cost_OP_PGAS)*(1/M)) COT(7):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Eco2(i,s)*Cost_CO2)*(1/M)) CIT(1):=getact(Cost_PV*PV_installed) CIT(2):=getact(Cost_WT*WT_installed) CIT(3):=getact(Cost_BESS*BESS_installed) CIT(4):=getact(Cost_GAS*PGAS_installed) initialisations to 'mmsheet.xlsx:'+Data PV_sol as "skiph;grow;noindex;PV_sol" WT_sol as "skiph;grow;noindex;HYD_sol" ENS_sol as "skiph;grow;noindex;ENS" PGAS_sol as "skiph;grow;noindex;PGAS_sol" </pre>		

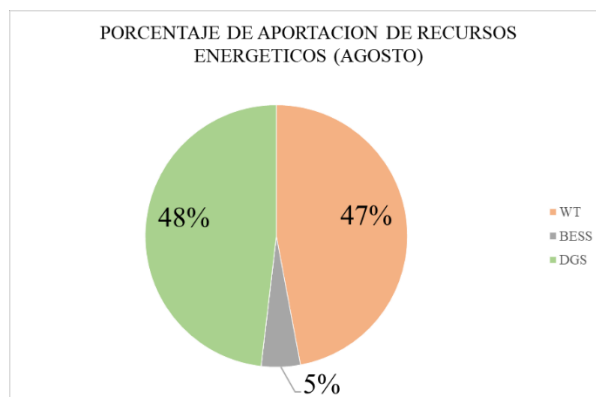
ANEXO E	ALGORITMO MATEMÁTICO CONSIDERANDO POTENCIAS MÁXIMAS DE LOS EQUIPOS	5 - 5
PV_installed_sol WT_installed_sol PGAS_installed_sol PV_curt_sol WT_curt_sol PC_sol PD_sol E0_sol CI_sol CI_sol1 CO_sol COT CIT E_sol	as "skip;grow;noindex;INST_PV" as "skip;grow;noindex;INST_H" as "skip;grow;noindex;INST_GAS" as "skip;grow;noindex;PV_curt" as "skip;grow;noindex;HYD_curt" as "skip;grow;noindex;PC_sol" as "skip;grow;noindex;PD_sol" as "skip;grow;noindex;BESS" as "skip;grow;noindex;CI" as "skip;grow;noindex;CII" as "skip;grow;noindex;CO" as "skip;grow;noindex;COT" as "skip;grow;noindex;CIT" as "skip;grow;noindex;E"	
end-initialisations end-model		

ANEXO F	RESULTADOS ÓPTIMOS DE PARTICIPACION POR EQUIPOS AGOSTO	1 - 1
----------------	---	--------------

E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
1,99	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47
1,99	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43
1,99	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
1,99	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
1,99	0,55	0,00	0,00	0,00	0,04	0,59
1,99	0,39	0,00	0,00	0,00	0,20	0,60
1,99	0,39	0,00	0,00	0,00	0,59	0,99
1,99	0,39	0,00	0,00	0,00	1,13	1,52
1,99	0,63	0,00	0,00	0,00	0,97	1,59
1,99	0,63	0,00	0,00	0,00	1,34	1,97
1,99	0,94	0,00	0,00	0,00	0,87	1,82
1,99	0,63	0,00	0,00	0,00	1,13	1,76
1,99	1,26	0,00	0,00	0,00	0,40	1,66
1,71	0,55	0,27	0,00	0,00	0,96	1,77
1,71	0,63	0,00	0,00	0,00	1,19	1,82
1,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,93	1,63
1,71	0,55	0,00	0,00	0,00	0,96	1,51
1,71	0,39	0,00	0,00	0,00	1,17	1,57
1,71	0,71	0,00	0,00	0,00	0,66	1,37
1,18	0,94	0,50	0,00	0,00	0,00	1,44
1,18	0,55	0,00	0,00	0,00	1,13	1,68
1,18	0,63	0,00	0,00	0,00	1,03	1,66
0,57	0,47	0,58	0,00	0,00	0,00	1,05
0,44	0,71	0,12	0,00	0,00	0,00	0,83

40,68 14,39 1,47 0,00 0,00 14,72 30,58

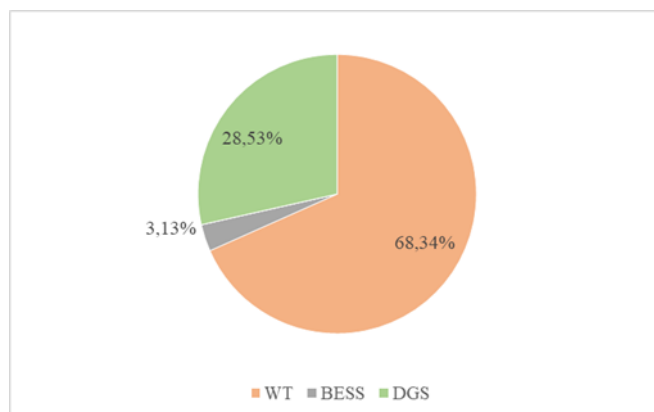
E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
	47,05%		4,81%	0,00%	0,00%	48,14%



ANEXO G	RESULTADOS ÓPTIMOS DE PARTICIPACIÓN POR EQUIPOS DICIEMBRE	1 - 1
----------------	--	--------------

E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
1,99	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
1,99	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49
1,99	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
1,99	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
1,99	0,54	0,00	0,00	0,00	0,09	0,63
1,69	0,79	0,28	0,00	0,00	0,00	1,07
1,10	0,62	0,56	0,00	0,00	0,00	1,18
0,46	1,02	0,61	0,00	0,00	0,00	1,63
0,46	1,58	0,00	0,00	0,00	0,40	1,98
0,46	1,58	0,00	0,00	0,00	0,27	1,86
0,46	1,75	0,00	0,00	0,00	0,60	2,34
0,46	1,58	0,00	0,00	0,00	0,56	2,15
0,44	1,75	0,02	0,00	0,00	0,61	2,38
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	0,50	2,24
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	1,47	3,22
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	1,30	3,05
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	0,28	2,03
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	0,40	2,15
0,44	1,58	0,00	0,00	0,00	1,46	3,05
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	1,20	2,95
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	1,31	3,06
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	1,04	2,79
0,44	1,75	0,00	0,00	0,00	0,80	2,54
0,44	1,58	0,00	0,00	0,00	1,12	2,70

20,36	32,11	1,47	0,00	0,00	13,40	46,99
E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
	68,34%	3,13%	0,00%	0,00%	28,53%	



ANEXO H	PROGRAMACION (ii) MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	1 - 5
<p><i>model "Microred"</i></p> <pre> uses "mmxprs","mmsheet" parameters Data = 'Microred.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 N_inv: real NT: real !WT v: array(1..24,1..12) of real end-declarations initialisations from 'mmsheet.xlsx:'+Data Irradiancia as "skip;noindex;Irrad" TempC as "skip;noindex;TempC" v as "skip;noindex;Vel" Dem as "skip;noindex;Dem" N_inv as "skip;noindex;N_inv" NT as "skip;noindex;NT" end-initialisations </pre> <p><i>declarations</i></p> <pre> T= 24 M= 12 Cost_PV= 1500 !Costo PV \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW Cost_WT= 2375 !Costo WT \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW Cost_BESS= 300 !Costo BESS \$/KW + COSTO INVERSOR \$/KW Cost_GAS= 550 !Costo GAS \$/KW Cost_PD_BESS= 0.00114 !Costo de descarga del bess Cost_curt_WT= 0.05 !Costo de vertimiento de energía Cost_curt_PV= 0.05 Cost_OP_PGAS= 0.674 !Costo combustible \$/ltr Cost_CO2= 60.78 !Costo emisión CO2 USD/TON C_ENS= 100000 FRC= 0.298315552 BUDGET=6000 </pre> <p><i>IEÓLICO</i></p> <pre> vci=2.5 !startup wind speed m/s vco=50 !maximum wind speed m/s vr=9 !rate wind speed m/s n_spv= 0.95 !Eficiencia PV system n_swt= 0.95 !Eficiencia Wt system </pre>		

ANEXO H	PROGRAMACION (ii) MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	2 - 5
<pre> !BESS n_BESS= 0.95 !Eficiencia inversor BM=10000000000 !COMBUSTIBLE k=0.00258 !Emisión TON/ltr u=9.12 !Poder calorico combustible KWH/ltr ngeg=0.37 !Eficiencia del generador balance: array(1..T,1..M) of linctr ENS,PV,WT,PV_curt,WT_curt,PGAS:array(1..T,1..M) of mpvar PV_installed, WT_installed,PGAS_installed: mpvar E0, BESS_installed: mpvar E,PC_BESS,PD_BESS,B: array(1..24,1..12) of mpvar Eco2,fco2: array(1..T,1..M) of mpvar PD_sol,PC_sol,PV_sol,WT_sol,ENS_sol,PV_curt_sol,WT_curt_sol,E_sol,PGAS_sol: array(1..T,1..M) of real CO_sol,CI_sol,CI_sol1,E0_sol,PV_installed_sol, WT_installed_sol,B_sol, PGAS_installed_sol: real COT: array(1..7) of real CIT: array(1..4) of real end-declarations forall (m in 1..M) do forall (t in 1..T) do !FOTOVOLTAICO PV(t,m)=PV_installed*((Irradiancia(t,m)/1000)*(1-NT*(TempC(t,m)-25))*N_inv) -PV_curt(t,m) PV(t,m)<=PV_installed*n_spv PV(t,m)>=0 !EÓLICO if(v(t,m)<=vci or v(t,m)>=vco) then WT(t,m)=0 elif(vci<=v(t,m) and v(t,m)<=vr) then WT(t,m)=WT_installed*((v(t,m)-vci)/(vr-vci))-WT_curt(t,m) end-if WT(t,m)<=WT_installed*n_swt WT(t,m)>=0 !Natural gas fco2(t,m)=PGAS(t,m)/(u*ngeg) Eco2(t,m)=k*u*fco2(t,m) PGAS(t,m)<=PGAS_installed PGAS(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_BESS+PC_BESS(t,m)*n_BESS </pre>		

ANEXO H	PROGRAMACIÓN (ii) MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	3 - 5
<pre> else E(t,m)=E0-PD_BESS(t,m)/n_BESS+PC_BESS(t,m)*n_BESS end-if forall(i in 1..M)do forall(j in 1..T)do B(j,i) is_binary end-do end-do 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)+WT(t,m)+PD_BESS(t,m)+PGAS(t,m)= Dem(t,m)-ENS(t,m)+ PC_BESS(t,m) !Budget PV_installed*Cost_PV+WT_installed*Cost_WT+BESS_installed*Cost_BESS+ PGAS_installed* Cost_GAS<=BUDGET PV_installed*Cost_PV+WT_installed*Cost_WT+BESS_installed*Cost_BESS+ PGAS_installed*Cost_GAS>=0 end-do end-do !Objetivo funcion CI:=(T*FRC/8760)*(Cost_PV*PV_installed+Cost_WT*WT_installed+Cost_BESS* BESS_installed+Cost_GAS* PGAS_installed) CO:= sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s)*C_ENS+PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV+WT_curt(i,s)*Cost_curt_WT+ PD_BESS(i,s)* Cost_PD_BESS+fco2(i,s)*Cost_OP_PGAS+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)) CI_sol1:=getsol(CI) CO_sol:=getsol(CO) PV_installed_sol:=getsol(PV_installed) WT_installed_sol:=getsol(WT_installed </pre>		

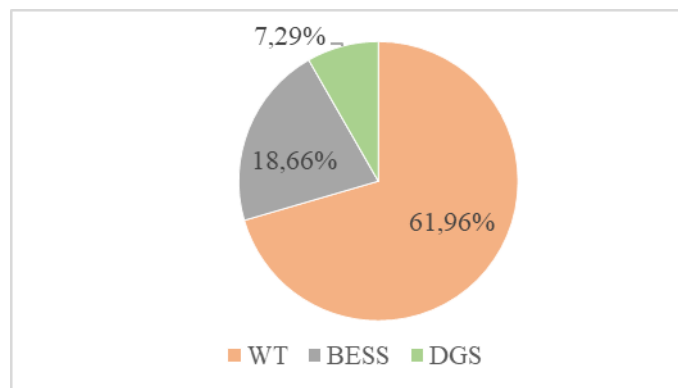
ANEXO H	PROGRAMACIÓN (ii) MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	4 - 5
<pre> PGAS_installed_sol:=getsol(PGAS_installed) EO_sol:=getsol(BESS_installed) writeln("Results:") writeln("Objective value is ", getobjval) writeln("GAP value is ", Gap) writeln("Inversión \$", CI_sol) writeln("PV installed capacity: ", PV_installed_sol,"kW") writeln("Número de paneles instalados: ", PV_installed_sol/0.530) writeln("WT installed capacity: ", WT_installed_sol,"kW") writeln("Número de turbinas eólicas: ", WT_installed_sol/1.7) writeln("BESS installed capacity: ", EO_sol,"kW") writeln("P_GAS installed capacity:", PGAS_installed_sol,"kW") forall (m in 1..M) do forall (t in 1..T) do PV_sol(t,m):=getsol(PV(t,m)) WT_sol(t,m):=getsol(WT(t,m)) ENS_sol(t,m):=getsol(ENS(t,m)) PV_curt_sol(t,m):=getsol(PV_curt(t,m)) WT_curt_sol(t,m):=getsol(WT_curt(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)) PGAS_sol(t,m):=getsol(PGAS(t,m)) end-do end-do COT(1):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(ENS(i,s)*C_ENS)*(1/M)) COT(2):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(PV_curt(i,s)*Cost_curt_PV)*(1/M)) COT(3):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(WT_curt(i,s)*Cost_curt_WT)*(1/M)) COT(5):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(PD_BESS(i,s)*Cost_PD_BESS)*(1/M)) COT(6):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(fco2(i,s)*Cost_OP_PGAS)*(1/M)) COT(7):=getsol(sum(i in 1..T,s in 1..M)(Eco2(i,s)*Cost_CO2)*(1/M)) CIT(1):=getact(Cost_PV*PV_installed) CIT(2):=getact(Cost_WT*WT_installed) CIT(3):=getact(Cost_BESS*BESS_installed) CIT(4):=getact(Cost_GAS*PGAS_installed) initialisations to 'mmsheet.xlsx'+Data PV_sol as "skiph;grow;noindex;PV_sol" WT_sol as "skiph;grow;noindex;HYD_sol" ENS_sol as "skiph;grow;noindex;ENS" PGAS_sol as "skiph;grow;noindex;PGAS_sol" PV_installed_sol as "skiph;grow;noindex;INST_PV" WT_installed_sol as "skiph;grow;noindex;INST_H" PGAS_installed_sol as "skiph;grow;noindex;INST_GAS" PV_curt_sol as "skiph;grow;noindex;PV_curt" WT_curt_sol as "skiph;grow;noindex;HYD_curt" PC_sol as "skiph;grow;noindex;PC_sol" PD_sol as "skiph;grow;noindex;PD_sol" EO_sol as "skiph;grow;noindex;BESS" CI_sol as "skiph;grow;noindex;CI" </pre>		

ANEXO H	PROGRAMACIÓN (ii) MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	5 - 5
<p> CI_sol1 as "skiph;grow;noindex;CI" CO_sol as "skiph;grow;noindex;CO" COT as "skiph;grow;noindex;COT" CIT as "skiph;grow;noindex;CIT" E_sol as "skiph;grow;noindex;E" end-initialisations end-model </p>		

ANEXO I	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	1 - 1
----------------	--	--------------

E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
3,82	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,47
3,36	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,43
4,20	1,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35
3,69	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,48
4,15	1,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59
4,32	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
4,09	0,77	0,22	0,00	0,00	0,00	0,99
3,30	0,77	0,75	0,00	0,00	0,00	1,52
3,30	1,23	0,00	0,00	0,00	0,36	1,59
2,52	1,23	0,74	0,00	0,00	0,00	1,97
2,55	1,84	0,00	0,00	0,00	0,00	1,82
2,55	1,23	0,00	0,00	0,00	0,53	1,76
3,30	2,46	0,00	0,00	0,00	0,00	1,66
2,68	1,07	0,59	0,00	0,00	0,11	1,77
2,06	1,23	0,59	0,00	0,00	0,00	1,82
1,80	1,38	0,25	0,00	0,00	0,00	1,63
1,80	1,07	0,00	0,00	0,00	0,43	1,51
0,96	0,77	0,80	0,00	0,00	0,00	1,57
0,98	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37
1,36	1,84	0,00	0,00	0,00	0,00	1,44
1,36	1,07	0,00	0,00	0,00	0,61	1,68
0,96	1,23	0,38	0,00	0,00	0,06	1,66
0,96	0,92	0,00	0,00	0,00	0,13	1,05
1,49	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83

61,55	18,94	5,71	0,00	0,00	2,23	30,58
E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
	61,96%	18,66%	0,00%	0,00%	7,29%	



ANEXO I	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE ENTEROS MIXTOS CONSIDERANDO COSTOS POR UNIDADES DE EQUIPOS	1 - 1
----------------	--	--------------

E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
3,81	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,48
4,32	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49
3,74	0,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,55
4,32	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48
3,66	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,63
4,11	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07
3,79	0,88	0,31	0,00	0,00	0,00	1,18
2,08	0,00	1,63	0,00	0,00	0,00	1,63
3,14	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98
4,32	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86
2,15	0,29	2,06	0,00	0,00	0,00	2,34
3,06	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15
3,06	2,38	0,00	0,00	0,00	0,00	2,38
3,06	2,24	0,00	0,00	0,00	0,00	2,24
3,06	3,22	0,00	0,00	0,00	0,00	3,22
3,06	3,05	0,00	0,00	0,00	0,00	3,05
3,06	2,03	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03
3,06	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	2,15
3,11	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	3,05
3,11	2,95	0,00	0,00	0,00	0,00	2,95
3,11	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00	3,06
3,11	2,79	0,00	0,00	0,00	0,00	2,79
3,94	3,42	0,00	0,00	0,00	0,00	2,54
4,32	3,10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70

81,58	41,34	5,65	0,00	0,00	0,00	46,99
E	WT	BESS	PV	ENS	DGS	LOAD
	87,97%	12,03%	0,00%	0,00%	0,00%	

