



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

**Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada
basado en un problema de optimización no lineal**

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

Autor:

Salguero Remache Vinicio Orlando

Tutor:

Jiménez Jiménez Diego Leonardo MSc.

LATACUNGA-ECUADOR

2022

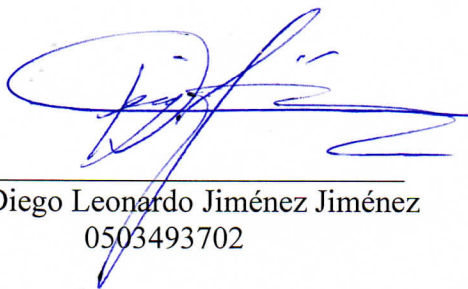
AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del trabajo de titulación "**Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal**" presentado por Vinicio Orlando Salguero Remache, para optar por el título de Magister 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, noviembre, 14, 2022



MSc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez
0503493702

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de titulación: “**Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal**”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magister 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, noviembre, 14, 2022

MSc. Edgar Roberto Salazar Achig
0502847619
Presidente del tribunal

MSc. Jessica Nataly Castillo Fiallos
0604590216
Lector 2

MSc. Xavier Alfonso Proaño Maldonado
0502656424
Lector 3

DEDICATORIA

A mi pequeña familia Shirley Pamela y Esteban Alejandro, por haberme regalado la dicha de convertirme en padre; su amor y comprensión me han motivado a no desmayar.

A toda mi familia que confían y creen en mí.

Vinicio Orlando

AGRADECIMIENTO

A Dios por la salud y fortaleza para culminar esta etapa de vida.

A la Virgen de la Merced, por ser intercesora de mis peticiones.

A mis padres Héctor y Elsa que con amor, paciencia y esfuerzo me han apoyado infinitamente en todas las decisiones que he tomado y darme la oportunidad de crecer.

A mi hermano Darío, que me ha enseñado más de lo que debería.

A Diego, por colaborarme como tutor, una excelente persona y un profesional inigualable.

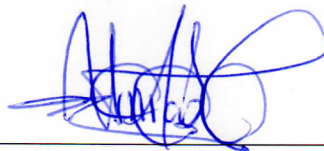
A todas las personas que de una u otra forma han colaborado para que este objetivo se cumpliera.

Vinicio Orlando

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

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

Latacunga, noviembre, 14, 2022

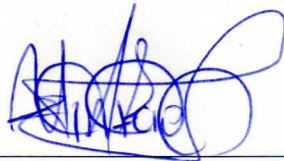


Vinicio Orlando Salguero Remache
0502904840

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, noviembre, 14, 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Vinicio Orlando Salguero Remache', written over a horizontal line.

Vinicio Orlando Salguero Remache
0502904840

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente trabajo de titulación: **“Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal”**, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, noviembre, 14, 2022



MSc. Edgar Roberto Salazar Achig
0502847619

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal

Autor: Salguero Remache Vinicio Orlando

Tutor: Jiménez Jiménez Diego Leonardo MSc.

RESUMEN

El despacho económico cumple un papel importante en un sistema de gestión de energía, pues es el que asigna la salida de potencia de cada fuente de generación, sin importar las condiciones de carga del sistema, bajo este concepto, la presente investigación fue aplicada en una microrred aislada que está compuesta por fuentes de generación renovables no convencionales, un banco de baterías y un generador a combustión que en conjunto abastecen una demanda eléctrica típica residencial.

Para resolver el despacho económico en una microrred aislada, por lo general, es aplicando un problema de optimización lineal típico, sin embargo, en este estudio se resolvió utilizando un método no lineal debido a la presencia de un generador a combustión el cual tiene un comportamiento del tipo cuadrático.

La metodología aplicada al problema de optimización no lineal fue mediante la formulación de una función objetivo sujeto a varias restricciones propias del sistema, siendo una de ellas la modelación del consumo de combustible del generador a diésel, es importante aclarar que el costo de la energía renovable es despreciable, lo que dio como resultado una minimización del costo operativo y el máximo consumo de energía renovable. El análisis de resultados fue a través de establecer horizontes de programación de 24, 48 y 168 horas, en todos los casos el despacho económico gestionó de manera acertada el uso de las fuentes de generación abasteciendo la demanda del sistema.

Bajo las condiciones establecidas, el despacho económico no lineal dio una mejor respuesta respecto a la de tipo lineal, se pone de manifiesto que la energía solar fue la que aportó con mayor energía siendo el 42%; la energía eólica inyectó un 12% debido a la situación geográfica, el excedente de energía renovable permitió la carga de baterías, es así que al momento que se encontraron en modo descarga aportaron con un 30 % de energía, lo que permitió que el generador a diésel se encienda en pequeños lapsos de tiempo aportando un 16%, cumpliendo de esta manera el abastecer de energía al sistema en los periodos de tiempo.

PALABRAS CLAVE: Microrred, sistema de gestión de energía, despacho económico, optimización no lineal.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

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

Topic: “An energy management system assessment into an isolated microgrid, based onto a nonlinear optimization problem”.

Author: Salguero Remache Vinicio Orlando
Tutor: Jimenez Jimenez Diego Leonardo MSc.

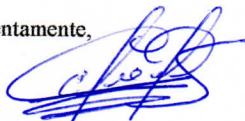
ABSTRACT

The economic dispatch achieves an important role within an energy management system, due to it is responsible for assigning the output power of each generation source regardless the load conditions in the system, under this same concept, the current research is applied in an isolated microgrid, which is compound by non-conventional renewable generation sources, a battery bank and a combustion generator, what together supply the typical residential electricity demand. The most common manner for solving the economic dispatch in an isolated microgrid is through a typical linear optimization problem application, however, into practice it should not be treated this manner, due to a combustion generator presence, which has a quadratic type behavior, what makes that it become a nonlinear optimization problem. The applied methodology to the non-linear optimization problem, it is developed, through the an aim function formulation subject to system several restrictions, being one them the diesel generator fuel consumption modeling, what is the quadratic type; it is thus that the result is an operating costs minimization and the non-conventional renewable energy maximum consumption. For a response detailed analysis to the problem, it is established 24, 48 and 168 hours scenarios, where all cases, the economic dispatch meets its aim, correctly managing the generation sources use by supplying the system demand. It should be mentioned, what under the established conditions solar energy is the one, which contributes the most energy being 42%; because the geographical location, wind energy helps with 12%, the renewable energy surplus allows the batteries charge, so that, at the moment they are found into discharge mode, they contribute energy 30%, what allows to understand that the diesel generator was turned on, into time short periods, by contributing with 16%, thus, achieving the energy supply to the system all time periods.

KEYWORDS: Microgrid, energy management system, economic dispatch, nonlinear optimization.

Yo, Beltrán Semblantes Marco Paúl 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: “EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA EN UNA MICRORRED AISLADA BASADO EN UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN NO LINEAL” de: **Salguero Remache Vinicio Orlando**, aspirante a Magister en Electricidad- Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CC: 0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

Latacunga, Noviembre del 2022.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema	2
Formulación del problema.....	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos.....	4
Justificación.....	5
Hipótesis.....	5
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACION TEÓRICA - METODOLÓGICA	6
1.1. Antecedentes de la investigación.....	6
1.2. Fundamentación teórica	9
1.2.1. Fundamentos de las microrredes.....	10
1.2.1.1. Microrredes eléctricas	10
1.2.1.2. Elementos de las microrredes eléctricas	12
1.2.2. Fundamentos de optimización matemática.....	19
1.2.2.1. Optimización lineal	22
1.2.2.2. Optimización lineal entera mixta	23
1.2.2.3. Optimización no lineal	23
1.2.3. Despacho económico de energía en la microrred	24
1.2.3.1. Despacho económico convencional	24
1.2.3.2. Despacho económico no convencional	25
1.2.3.3. Formulación de un despacho económico	25

1.2.4.	Optimización no lineal.....	27
1.3.	Fundamentación metodológica.....	30
1.3.1.	Tipos de investigación	31
1.3.2.	Métodos de investigación	32
1.3.3.	Técnicas de investigación	32
1.4.	Conclusiones Capítulo I	33
CAPÍTULO II. PROPUESTA		34
2.1.	Título del proyecto	34
2.2.	Objetivo del proyecto	34
2.3.	Justificación de la propuesta.....	34
2.4.	Descripción de la propuesta.....	35
2.5.	Procedimientos empleados para el cumplimiento de la propuesta.....	38
2.5.1.	Diseño de la microrred aislada.....	38
2.5.1.1.	Demanda eléctrica.....	39
2.5.1.2.	Energía solar.....	40
2.5.1.3.	Energía eólica.....	44
2.5.1.4.	Sistemas de almacenamiento (Banco de baterías)	46
2.5.1.5.	Grupo electrógeno (Generador a diésel)	48
2.5.2.	Formulación del despacho económico.....	50
2.5.2.1.	Función objetivo	52
2.5.2.2.	Restricciones	52
2.5.3.	Implementación del modelo de optimización.....	59
2.5.3.1.	Flujograma planteado en el modelo de optimización	59
2.1.1.1.	Consideraciones de costos en el despacho económico	59
2.2.	Requerimientos de hardware y software	62

2.2.1. Hardware.....	62
2.2.2. Software.....	62
2.3. Descripción del caso de estudio	64
2.4. Conclusiones Capítulo II.....	65
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA	66
3.1. Análisis de resultados	66
3.2. Resultados de diferentes horizontes de programación	67
3.2.1. Despacho económico no lineal para 24 horas.....	67
3.2.2. Despacho económico lineal para 24 horas.....	69
3.2.3. Despacho económico no lineal para 48 horas.....	70
3.2.4. Despacho económico lineal para 48 horas.....	71
3.2.5. Despacho económico no lineal para 168 horas.....	72
3.2.6. Despacho económico lineal para 168 horas.....	73
3.3. Análisis de costos del despacho económico.....	74
3.4. Conclusiones Capítulo III.....	75
CONCLUSIONES GENERALES	76
RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sistemas de tareas y objetivos	4
Tabla 2: Redes eléctricas según su potencia	11
Tabla 3: Expresiones matemáticas de problemas de optimización.....	21
Tabla 4: Características Peimar SG360M.....	41
Tabla 5: Características AWS HC 650W Wind Turbine	45
Tabla 6: Características de la batería MAX POWER MP250-12.....	48
Tabla 7: Características Generac 5KW Protector	49
Tabla 8: Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred	49
Tabla 9: Consumo de combustible del motor	54
Tabla 10: Precio internacional del diésel	59
Tabla 11: Costos de consideración para la optimización	61
Tabla 12: Especificaciones mínimas de hardware	62
Tabla 13: Costo total del despacho económico no lineal y lineal.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Arquitectura básica de una microrred	9
Figura 2: Diagrama de una microrred.....	10
Figura 3: Elementos de una microrred.....	12
Figura 4: Esquema de un sistema fotovoltaico	13
Figura 5: Esquema de un sistema eólico para uso residencial	14
Figura 6: Generador eléctrico con motor a combustión	15
Figura 7: Sistema de almacenamiento de energía (banco de baterías)	16
Figura 8: Partes de una batería.....	17
Figura 9: Conjunto de soluciones factibles de un PPLEE	23
Figura 10: Relación entre teoría, investigación y la realidad cuantitativa.....	30
Figura 11: Función de costos linealizada de un generador a diésel.....	34
Figura 12: Sistema de gestión de energía propuesto.....	35
Figura 13: Microrred aislada propuesta	36
Figura 14: Descripción básica de un despacho económico	37
Figura 15: Flujograma para el diseño de la microrred aislada.....	39
Figura 16: Curva de demanda eléctrica diaria	40
Figura 17: Curva de irradiación solar diaria	41
Figura 18: Curva característica V-I de una celda solar.....	42
Figura 19: Potencia generada proporcional a la irradiancia	43
Figura 20: Potencia solar diaria	43
Figura 21: Curva de velocidad del viento diaria.....	44
Figura 22: Curva de potencia AWS HC 650 Turbine Wind.....	45
Figura 23: Potencia eólica diaria	46

Figura 24: Microrred aislada diseñada.....	50
Figura 25: Diagrama de bloques del despacho económico.....	51
Figura 26: Curva del costo de combustible en un generador a diésel.....	53
Figura 27: Curva característica consumo de combustible	54
Figura 28: Eficiencia del generador.....	55
Figura 29: Flujograma de optimización en software	60
Figura 30: Despacho económico no lineal en un tiempo de 24 horas	67
Figura 31: Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas	68
Figura 32: Despacho económico lineal en un tiempo de 24 horas	69
Figura 33: Despacho económico no lineal en un tiempo de 48 horas	70
Figura 34: Ciclo de la batería en un tiempo de 48 horas	71
Figura 35: Despacho económico lineal en un tiempo de 48 horas	72
Figura 36: Despacho económico no lineal en un tiempo de 168 horas	72
Figura 37: Ciclo de la batería en un tiempo de 168 horas	73
Figura 38: Despacho económico lineal en un tiempo de 168 horas	73

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, es el proceso dominante en lo referente al consumo energético en el mundo, sin embargo, es altamente cuestionado fundamentalmente por la producción de dióxido de carbono, el cual contribuye a la acumulación de gases de efecto invernadero, por esta razón, es importante plantear varias líneas de investigación, teniendo como principal finalidad, la búsqueda de tecnologías alternativas de generación, basadas en fuentes de energías renovables, que sean amigables con el medio ambiente.

La Universidad Técnica de Cotopaxi propone varias líneas de investigación, las cuales están acorde a los planes de desarrollo local, regional y nacional, con el fin de cubrir las necesidades en distintas áreas del conocimiento y sobre todo en el área de la electricidad, que en la última década se ha desarrollado considerablemente, tanto en infraestructura como en conocimiento.

El incremento de generación de energía por medio de fuentes renovables amigables con el medio ambiente, permite que el tema propuesto “Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal” se enmarque en la línea de investigación **Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental**, debido a que dentro de la investigación se encuentran como actores principales, fuentes de energía no convencionales, que después de un análisis permitan abastecer energía eléctrica de manera óptima, cuidando el medio ambiente.

Esta línea de investigación, acoge varias sub líneas en el accionar investigativo, las cuales tienen temáticas establecidas las que permiten enmarcar y delimitar el tema propuesto. La sub línea encaminada al desarrollo del proyecto es **Conversión y uso racional de la energía eléctrica**, pues a tratarse de un tema de optimización, exige de manera estricta el aprovechamiento máximo de los recursos energéticos, sobre todo, los alternativos como son: el eólico, solar, etc., y la minimización de los costos operativos, con la finalidad de cubrir la demanda energética, es importante considerar que el despacho económico es una variable donde se debe fomentar el aprovechamiento del recurso.

Se debe poner en contexto que la crisis energética es una preocupación mundial en lo referente al desarrollo sostenible de la sociedad, el constante crecimiento de la demanda plantea un desafío energético, por este motivo, el optimizar el uso de la energía, permite en gran medida, reducir las pérdidas y aprovechar la producción energética, y es así que, con la incorporación de nuevas fuentes de energía alternativas, la demanda será abastecida en la mayoría.

A medida que los sistemas de generación renovable se incrementan a nivel global, ha aumentado la incertidumbre y la variabilidad en los sistemas eléctricos, existiendo intermitencias, conllevando desafíos investigativos, operativos, económicos, etc., con la finalidad de garantizar un sistema de suministro de energía confiable y estable, se debe involucrar a la investigación, optimización matemática, la que permitirá aprovechar el mayor consumo de energía, con menores costos operativos y de intermitencias, además, es necesario de manera transversal, el aspecto ambiental, que sin duda alguna debe ser el menor impacto posible.

Planteamiento del problema

Un sistema de gestión de energía, aplicado a una microrred, se basa en la aplicación de un algoritmo el cual administre de manera óptima el recurso energético en un periodo de tiempo establecido, con la finalidad de minimizar gastos operativos, abasteciendo la demanda eléctrica de la microrred.

El despacho económico en una microrred aislada, es un problema que se plantea de forma estocástica debido a la naturaleza propia de los recursos energéticos, sin embargo, por medio de un adecuado pronóstico de las variables, dicho problema se plantea de una forma determinística lo que lleva a una resolución mediante un proceso de optimización ya sea del tipo lineal o lineal entero mixto.

Es destacable mencionar que en la mayoría de trabajos la resolución del problema opta por las metodologías descritas anteriormente, sin embargo, el comportamiento de un generador a diésel está bajo una ecuación cuadrática, lo que conlleva la implementación de un algoritmo de optimización de un despacho económico del tipo no lineal, con el fin de minimizar de mejor manera la respuesta de optimización frente a un despacho del tipo lineal.

Con estas consideraciones, el problema se basa en una microrred aislada, la cual conste de fuentes de energía renovable y de un generador a combustión, el que se encienda en cierto tiempo de tal manera que abastezca la demanda requerida.

Es necesario aclarar que, se ha optado por recoger datos que en su mayoría sean reales y/o válidos, con la finalidad de que los resultados obtenidos sean muy cercanos a la realidad, los que permitan tomar decisiones acertadas en una etapa de implementación.

Formulación del problema

¿El resolver un problema de despacho económico en una microrred aislada, mediante optimización no lineal presenta una mejor respuesta frente a un despacho lineal?

Objetivo general

Evaluar el comportamiento de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada a través de un problema de optimización no lineal relacionando con un despacho económico lineal.

Objetivos específicos

1. Realizar una investigación bibliográfica frente a un estado del arte acerca de problemas de optimización de despacho económico en microrredes aisladas.
2. Plantear un problema de optimización no lineal en el contexto de microrredes aisladas basadas en Fuentes Energías Renovables No Convencionales (ERNC).
3. Resolver el problema de optimización no lineal para diferentes horizontes de programación basado en datos reales

Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos

Tabla 1: Sistemas de tareas y objetivos

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	<p>Revisar material bibliográfico sobre despacho económico en microrredes aisladas.</p> <p>Identificar metodologías para resolver programación matemática en despacho económico de microrredes.</p>	<p>Elaboración del marco teórico que muestre las distintas formas de resolver despacho económico en microrredes aisladas.</p> <p>Entendimiento de métodos aplicados (algoritmos, función objetivo, restricciones, etc.) para el despacho económico en microrredes aisladas.</p>	<p>Se recopilará tesis, artículos científicos, libros los cuales tengan como tema principal optimización matemática y despacho económico en microrredes aisladas.</p> <p>Se revisará en bibliografía las metodologías empleadas por distintos autores en un despacho económico de microrredes aisladas.</p>
2	Plantear una ecuación de costos (función objetivo y restricciones).	Formulación de la función objetivo y restricciones donde conste el comportamiento no lineal del generador.	Se identificará variables que forman parte de la función objetivo y las restricciones.
3	<p>Desarrollar un flujograma para la optimización no lineal del despacho económico.</p> <p>Comprobar el comportamiento del despacho económico en la microrred planteada.</p>	<p>Obtención del despacho económico diario y semanal bajo el algoritmo implementado en base a varios horizontes de programación.</p> <p>Comparación del despacho económico no lineal en la microrred versus uno del tipo lineal.</p>	<p>Se implementará un algoritmo en cualquier software dedicado a optimización matemática.</p> <p>Se revisará en bibliografía las condiciones que debe cumplir un despacho económico en una microrred.</p>

Fuente: Autor

Justificación

La aplicación de microrredes aisladas permite explorar el campo de los sistemas de gestión de energía, donde el despacho económico mediante técnicas y metodologías permiten el aprovechamiento del recurso renovable y la minimización del costo operativo.

Es necesario entender que una microrred está formada por diversas fuentes de generación renovable, sistemas de almacenamiento y grupos electrógenos; según varias investigaciones, el despacho económico en una microrred lo plantean de un modo determinístico, lo que conlleva a presentar una función objetivo y restricciones que cumplan un balance de energía, siendo así que su resolución se basa en métodos del tipo de programación lineal y/o programación lineal entera mixta.

Así también, la metodología de resolución mediante programación lineal entera mixta en una microrred, se debe a que relaciona directamente la energía nominal del sistema de almacenamiento y costo total de generación; permitiendo que se opte minimizar el costo operativo del generador a combustión.

Se debe considerar al momento de producir energía mediante un generador a combustión se relaciona con el consumo de combustible bajo una curva cuadrática y en muchas de las investigaciones optan por linealizar por secciones, sin embargo, bajo esta necesidad, es necesario contemplar el comportamiento de una función de costos cuadrática con la finalidad de observar el comportamiento dentro de una microrred, superando diferentes paradigmas con respecto a las microrredes y dando paso a la masiva de la generación distribuida.

Hipótesis

El planteamiento de una función de costos no lineal en un despacho económico para una microrred aislada permitirá obtener un mejor costo frente a utilizar una función lineal.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACION TEÓRICA - METODOLÓGICA

1.1. Antecedentes de la investigación

La demanda de energía se debe satisfacer de modo sostenible y eficaz, Martínez y sus colaboradores, plantean un modelo energético alternativo donde los sistemas de generación eléctrica son desplazados por sistemas de generación distribuida, así también, un sistema de gestión óptimo que disponga de un control predictivo basado en modelos, permitiendo predecir el comportamiento de la red. La función objetivo de costo que se emplea, consiste en la minimización de la suma de todos los factores que introduce un costo como son: la generación, el estado y el arranque de los generadores a diésel. En el sistema de gestión de energía el despacho económico es un problema de optimización de programación lineal de enteros mixtos (MILP), donde se considera al generador a diésel y baterías como los puntos de ajuste para el despacho económico, las variables binarias se las utiliza para definir el estado de las baterías ya sea en modo carga o descarga, las variables de holgura están dadas por la cantidad de energía no suministrada y el desprendimiento de energía [1] [2].

En la tesis desarrollada por Solano [3], el problema del despacho económico convencional, es la utilización de las plantas de generación térmica y las restricciones operativas del sistema. Lo primordial es satisfacer una potencia demandada a través de N generadores conectados a un bus, se considera que el costo de generación de cada generador dependerá del combustible que requiere cada uno. La resolución es a través de programación cuadrática secuencial, que es una extensión del método de cuasi-Newton, por medio de este método se modela la función objetivo en la iteración x^k como un subproblema cuadrático de segundo orden y minimiza este subproblema para definir el nuevo punto [3].

En la tesis planteada por Cira Pérez [4], describe un circuito eléctrico representando en una gráfica nodos y aristas, donde las aristas representan un cuerpo eléctrico (líneas de transmisión), y los nodos representan buses. En la resolución de problemas de despacho económico se puede tratar como un sistema de ecuación lineal, sin embargo, en esta tesis [4], el autor presenta una resolución donde tiene como objetivo obtener un algoritmo más eficiente para problemas no lineales.

La resolución al despacho económico por medio de grafos, se tratar como un conjunto de productores conectados a un nodo tratando de satisfacer la demanda, la cual se encuentra conectada al nodo, tiene como meta encontrar el nivel óptimo de producción de cada generador, así como también, el precio de la energía, obteniendo una producción con eficiencia económica [4].

Para los autores Bordons, García, Valverde [5], la gestión óptima de la energía se basa en la interacción de varias etapas del sistema eléctrico como son los sistemas de generación, sistemas de almacenamiento de energía, aislados o conectados al resto de la red eléctrica. El control de una microrred se considera por medio de una estructura jerárquica de control dividida en tres niveles asociados a distintas escalas de tiempo como son: el nivel primario que se encarga de la seguridad y fiabilidad, el nivel secundario es el encargado de asegurar las desviaciones de tensión y frecuencia y el nivel terciario controla los flujos de potencia entre la microrred y la red principal. En este caso, la gestión de flujos de energía se hace a través de algoritmos heurísticos, donde la estrategia es el control por banda de histéresis, es decir, mantener el nivel del almacenamiento en una banda, procediendo a su carga o descarga cuando este salga de la zona definida [6].

Para los autores Llanos, Ortiz [7], un sistema de gestión de energía dispone de controladores, debido a esto, los controladores de la microrred deben garantizar la correcta funcionalidad de cada micro fuente en un punto de operación definido. La metodología del sistema de gestión de energía se basa en la implementación de dos diferentes tipos de topologías de microrred (microrred de un nodo y microrred radial) donde su solución se basa en programación lineal entera mixta, el sistema de gestión de energía impone las consignas a las unidades de generación, la potencia inyectada depende de la disponibilidad de los recursos renovables, las entradas del sistema de gestión de energía son los límites de potencia de las unidades de generación y el costo de operación de cada unidad de generación; así como también, es necesario el estado de carga para estimar la energía disponible y la demanda de potencia [7].

En la investigación de Olivares [8], presenta una formulación matemática y su correspondiente arquitectura de control de un sistema de gestión de energía estocástico-predictivo, la estrategia se basa en la incertidumbre utilizando un proceso de decisión de dos etapas combinado con un enfoque de horizonte descendente. El compromiso de unidad, las variables de decisión se determinan utilizando una formulación estocástica de programación lineal entera mixta [9].

En otra investigación [10], los autores optan por una nueva solución para el despacho de energía convencional, donde principalmente desarrollan un algoritmo donde se utiliza el jacobiano invertido del algoritmo de flujo de potencia para obtener las ecuaciones de pérdidas de transmisión incrementales, de esta manera obtener un cronograma de generación más preciso y con un costo mínimo.

Para el autor Vu [11], el análisis lo realiza a través de un modelo autorregresivo de orden selectivo que permite predecir en cierta manera la demanda eléctrica en un horizonte de pronóstico que a diferencia de otros métodos este se enfatiza en corto plazo, cabe notar que, lo esencial en este es la elección de distintos patrones estacionales agregado en un modelo AR, que mediante un orden selectivo elimina los retrasos más despreciables del modelo AR estacional [12].

Para Alqunun, Crossley [13], en una microrred que consta de un sistema de almacenamiento de energía, se describe un método de optimización que permite el intercambio de energía con el sistema de distribución principal, el método que utilizan los autores se basa en uno de programación lineal entera mixta, se evalúa el costo total de generación cuando este aporte o no al sistema. Lo primordial sobre este método, es que, el sistema de almacenamiento de energía pueda extraer energía de la red principal para almacenarla, posterior se suministre energía con un costo menor, donde no exista costos de generación y otros factores que encarecen la energía [14].

Por otro lado Chansareewittaya [15], implementa un algoritmo híbrido donde se combina la evolución diferencial y búsqueda Tabú, es así que las funciones objetivo de costos y emisiones se formulan como una sola función, se debe distinguir las características de seguimiento antirretroceso, pues se obtiene mejor resultados que con un algoritmo de evolución diferencial.

1.2. Fundamentación teórica

La energía eléctrica se ha convertido en un sector estratégico, siendo de uso indispensable en la mayoría de las aplicaciones residenciales, comerciales e industriales, la misma que, es generada en grandes magnitudes en puntos específicos y es transmitida a largas distancias a los centros de consumo, donde es transformada y aprovechada para todo tipo de aplicaciones [16].

En la actualidad, la incorporación de recursos de energía renovables, la mejora de la eficiencia en la utilización de la energía y la mitigación de las emisiones de CO₂ se consideran factibles para abordar estos desafíos. Debido a esto, es necesario aumentar la penetración de las fuentes de energía renovables y acelerar la descarbonización de los sistemas energéticos, con la finalidad de reducir entre un 80% y 95% las emisiones de gases de efecto invernadero [17].

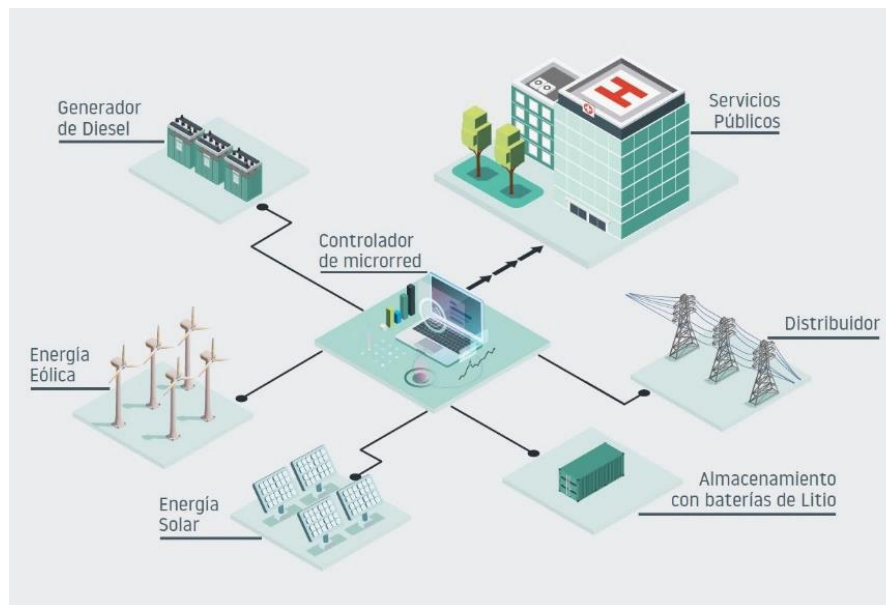


Figura 1: Arquitectura básica de una microrred [17]

La Figura 1, muestra una arquitectura básica de una microrred, con todos sus componentes, principalmente las fuentes de generación de diverso tipo; sin embargo, se debe considerar el despacho energético, que consiste en distribuir la demanda total entre todas las unidades de generación disponibles, tomando en cuenta que se debe minimizar el costo total de operación, mientras que el controlador mediante el uso de diversas técnicas de resolución debe obtener una respuesta óptima en función del algoritmo planteado [18].

En este capítulo, se tratará de temas donde la finalidad es la de entender los aspectos fundamentales para un sistema de gestión de energía dentro de una microrred y sus técnicas de optimización.

1.2.1. Fundamentos de las microrredes

Una red eléctrica está formada por fuentes de generación eléctrica, cargas y/o líneas de transmisión de potencia, incluyendo el equipo asociado, conectado de forma eléctrica o mecánica a la red, este sistema debe cumplir con algunos requerimientos para su utilización como son [19]:

- Disponer ininterrumpidamente de energía suficiente para los consumidores.
- Mantener el voltaje nominal estable, con una variación de $\pm 10\%$.
- Mantener la frecuencia estable, con una variación de $\pm 0.1\text{Hz}$.
- Suministrar energía a un precio razonable.

1.2.1.1. Microrredes eléctricas

Una microrred (Figura 2) puede definirse como una red de bajo voltaje, la cual consta de varios tipos de generación entre ellas fuentes de energía renovable no convencional, un sistema de almacenamiento y generación convencional que permite alimentar cargas locales, además, dispone de un sistema de generación distribuida empleado para abastecer consumos a nivel de potencia bajos [19].

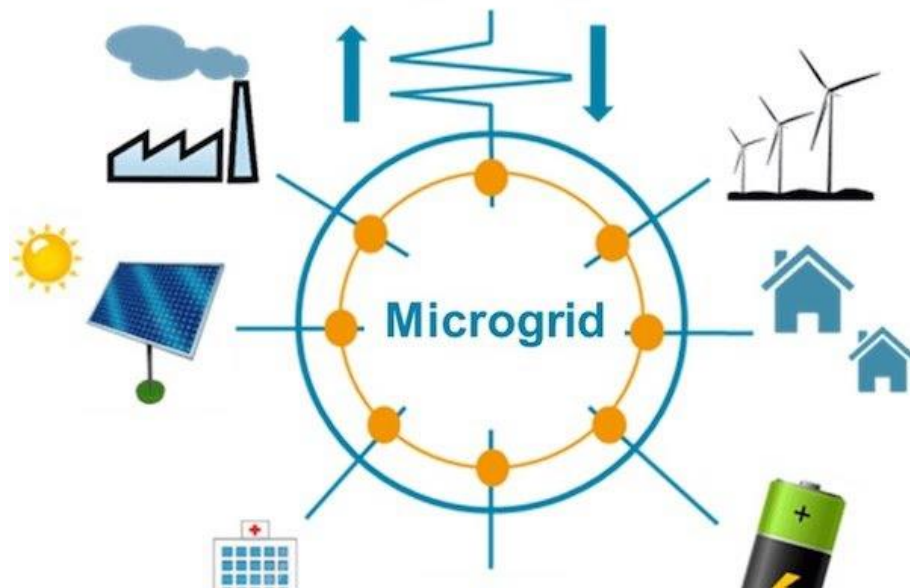


Figura 2: Diagrama de una microrred [19]

Al hablar de una microrred, se debe considerar que las fuentes de energía y las cargas se pueden desconectar y reconectar, ya sea una parte o todo al sistema eléctrico principal, con un mínimo de perturbaciones en las cargas locales mediante un único punto de conexión, que debe tener una estrategia para gestionar el flujo de energía, así como el intercambio de potencia con el sistema de distribución [19].

En la Tabla 2, se presenta un análisis de redes eléctricas por potencias con la finalidad de conocer a que grupo pertenece una microrred [20]:

Tabla 2: *Redes eléctricas según su potencia [20]*

Potencia del Sistema	Denominación	Generación	Características
Hasta 0.5KW	Sistemas autónomos individuales	Fotovoltaica	Distribución en CC o CC+CA en vivienda
0.5 hasta 10KW	Sistemas autónomos individuales	Fotovoltaica	Normalmente distribución en CA en vivienda
10 hasta 100KW	Sistemas centralizados microrredes	Fotovoltaica Grupo aerogenerador	Distribución en CA a grupo de consumidores. Generación centralizada
100KW en adelante	Minirredes	Las anteriores más otras fuentes energéticas	Distribución en CA a grupo de consumidores. Generación descentralizada

Según la Tabla 2, toda microrred es una instalación que no sobrepasa valores de potencia considerables, y que usa generación eléctrica proveniente de sistemas aerogeneradores, módulos fotovoltaicos y grupo electrógeno. El uso de la energía fotovoltaica en las microrredes es lo más habitual, estando su uso extendido como amplia diferencia respecto a otras fuentes generadoras; además, es importante el uso de sistemas de almacenamiento de energía que permitan resolver picos de consumo, transitorios de producción renovable, escasos consumos nocturnos, convirtiéndose en una solución fiable de bajo costo para la microrred [20].

1.2.1.2. Elementos de las microrredes eléctricas

Una microrred se compone de diferentes fuentes de generación, tanto del tipo convencional como no convencional, cargas de respuesta y cargas críticas (Figura 3); además, está conectada a la red eléctrica principal a través de un punto de acoplamiento común. Sin importar el modo de operación de una microrred, las fuentes de energías están conectadas a una interface de electrónica de potencia para lograr objetivos de control, medición y protección [21].

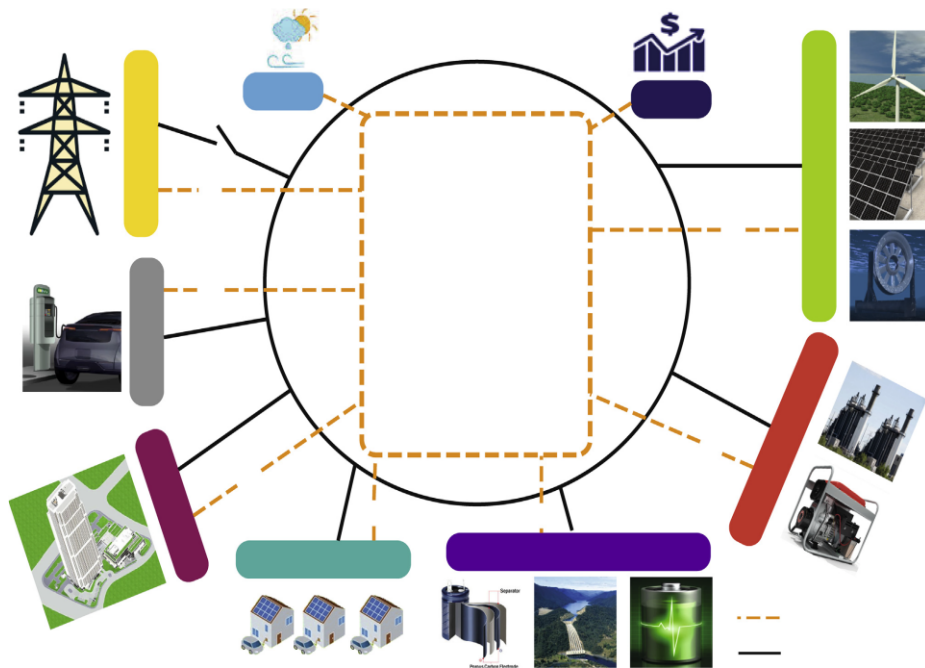


Figura 3: Elementos de una microrred [21]

En caso de existir perturbaciones o fallas en la red eléctrica principal, la microrred cambia su operación al modo isla garantizando la estabilidad del sistema; en este caso, proporciona un suministro continuo de energía a las cargas críticas mediante una operación integrada eficiente de las fuentes de generación distribuidas, la respuesta de la demanda y el deslastre de carga.

La operación de la microrred es controlada y coordinada por los controladores centrales y locales; la gestión y coordinación de las fuentes de energía dan como resultado un mejor rendimiento y un desarrollo sostenible del sistema [21].

- **Equipos de generación**

Dentro de una microrred, los equipos de generación son seleccionados en relación a la energía primaria que utilicen, lo que permite tener una ventaja hacia los usuarios. A continuación, se presenta diferentes tipos de fuentes de generación.

Energía fotovoltaica

Se obtiene de la conversión directa de la radiación solar, es una tecnología prometedora y madura en el mercado actual; cuando un fotón incide sobre la superficie de un semiconductor es capaz de energizar la capa externa del mismo, creando así una diferencia de potencial [22].

Es una energía sostenible a largo plazo, incide en un impacto ambiental positivo y su funcionamiento es silencioso; sin embargo, tiene consideraciones como alto costo de instalación, baja eficiencia energética, entre otras [23].

Los paneles fotovoltaicos (Figura 4) tienen un promedio de eficiencia entre 14% y 22% en la conversión de la radiación solar a energía eléctrica y se estima que en el mercado mundial el 6.9% son de capa fina. Sin embargo, se espera que este porcentaje aumente en los próximos años, minimizando costos de producción y mejorando el nivel de eficiencia energética [23].

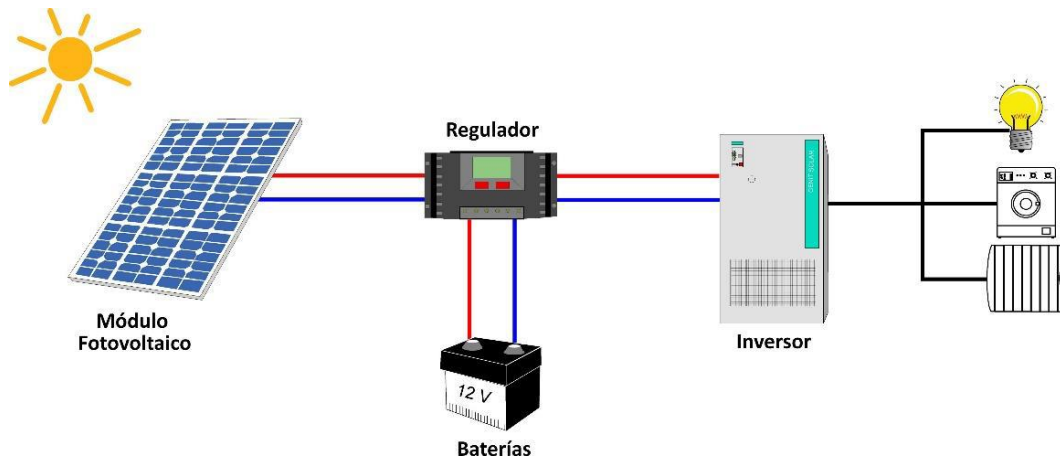


Figura 4: Esquema de un sistema fotovoltaico [24]

Energía eólica

Es una de las energías más abundantes, de mayor crecimiento y sobre todo del tipo renovable, esta energía hace relación a toda tecnología donde aprovecha la energía cinética del viento, transformándola en energía eléctrica o mecánica. Para efectuar la conversión de energía se utilizan distintos tipos de equipamientos, no se requiere grandes velocidades de viento para producir energía. La conexión a la red de distribución (Figura 5) se realiza mediante inversores de potencia que permiten regular la tensión, de esta manera se modifica el consumo y la generación de potencia activa.

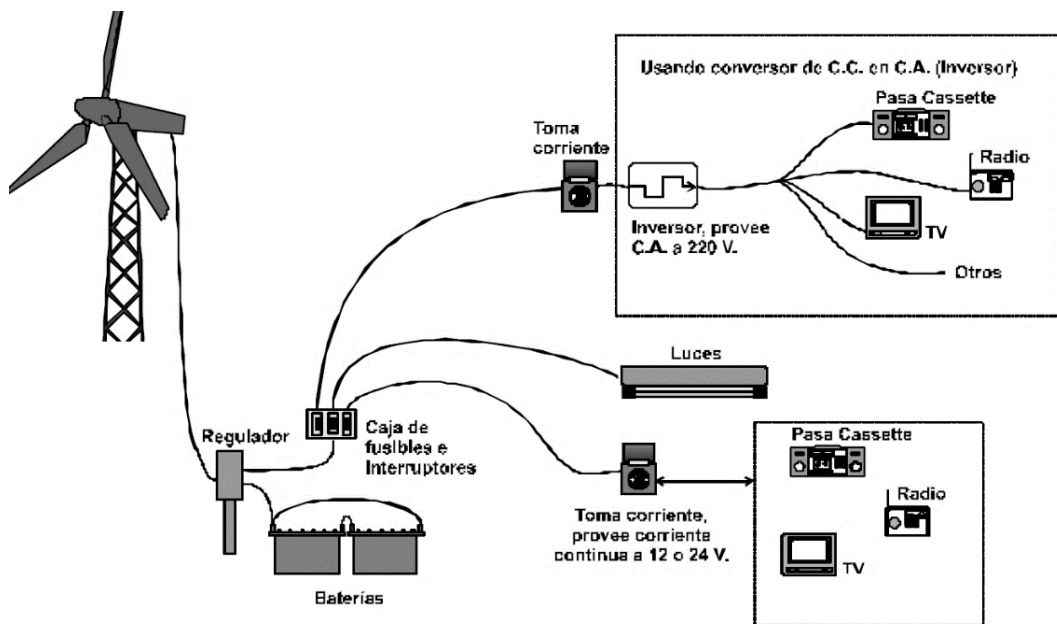


Figura 5: Esquema de un sistema eólico para uso residencial [25]

En la mayoría de casos, un equipo comienza a generar energía con una velocidad del viento de 4 m/s (15 Km/h), entregando una potencia máxima cuando la velocidad es del orden de los 12 a 15 m/s (40 a 55 Km/h) y es necesario sacar de funcionamiento cuando alcanza 25 m/s (90 Km/h) [25].

Existen diferentes tipos de aerogeneradores que van desde 1KW hasta los 12MW, llegando a consolidar un porcentaje de fiabilidad de las máquinas del 57%. Estos pueden trabajar solos o agrupados en parque eólicos distanciados unos de otros [23].

Grupo electrógeno con motor de combustión interna

Es aquel donde los gases de combustión empujan un embolo, con la finalidad de girar un cigüeñal (Figura 6), produciendo de esta manera energía mecánica, la misma que se transformará en energía eléctrica [22].



Figura 6: Generador eléctrico con motor a combustión [22]

La utilización en las microrredes es casi obligatoria, ya que actúa como una fuente energética de respaldo, entrando en funcionamiento cuando sea necesario, disminuyendo el almacenamiento en baterías. El mayor inconveniente es que su costo de operación depende de factores externos, por lo que, los consumidores quedan sujetos a posibles fluctuaciones del precio del combustible [23].

Se debe considerar que estos equipos no pueden encenderse y apagarse constantemente, ya que se reduce la vida útil, esto quiere decir que, cuando arranquen se debería garantizar que lo hagan por un tiempo suficiente para que no haga falta otro encendido a corto plazo [20].

Es necesario un registro del funcionamiento del grupo, así también un análisis en el caso de existir un incremento momentáneo del consumo o, en el caso del paso de una nube ocasione la reducción de energía fotovoltaica y ese impacto de carga sea menor al máximo que el grupo puede soportar para restablecer tensión y frecuencia.

El dimensionamiento del grupo electrógeno es de importancia en una microrred, ya que, este sistema debe funcionar como mínimo del 20% al 30% de carga para evitar el deterioro acelerado de elementos del motor de combustión.

La operación de los grupos puede ser de manera manual o automática, se debe optar por la opción más conveniente dependiendo del diseño de la instalación, las necesidades de funcionamiento y la capacidad de la comunidad local [20].

- **Sistemas de almacenamiento de energía**

Las grandes variaciones de energía eléctrica que existen en una microrred debido al uso de fuentes de generación intermitentes, exigen el uso de equipos de almacenamiento para solventar la demanda en determinadas horas del día [23].

En el diseño se busca que las fuentes renovables sean capaces de generar energía suficiente como para hacer que el grupo de respaldo no funcione, o lo haga durante el menor tiempo posible dado que es el elemento con mayor impacto ambiental y con la vida más limitada, necesitando de mantenimiento y combustible [20].



Figura 7: Sistema de almacenamiento de energía (banco de baterías) [23]

Bajo estas condiciones es necesario el uso de un acumulador (Figura 7) que su finalidad sea de resolver rápidamente posibles transitorios de producción que generalmente se dan en los sistemas solares y eólicos, así como para mantener las cargas alimentadas hasta el momento que el grupo electrógeno entre en funcionamiento, tanto en momentos de emergencia, como en los previstos por el propio diseño del sistema [23].

○ Baterías de ion Litio

La tecnología de litio, a diferencia de otras tecnologías de acumuladores, ofrece una alta densidad energética, ya que acumula mucha energía en poco espacio. Esta característica permite que las baterías de ion litio tengan dimensiones reducidas y un peso ligero. Este tipo de baterías ofrece una densidad de energía de 3 veces a la de una batería plomo-ácido. Cuenta con un alto voltaje por celda de aproximadamente 3.5 voltios, lo cual reduce el número de celdas en serie para alcanzar un cierto voltaje [23].

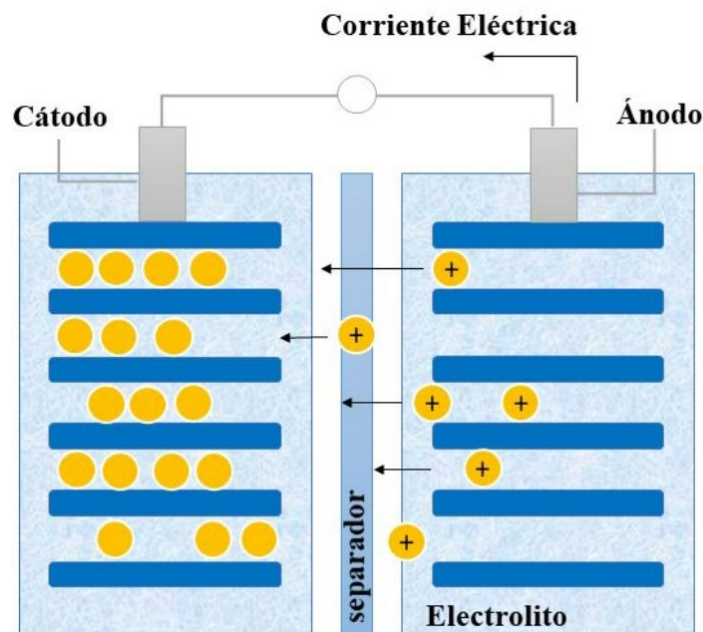


Figura 8: Partes de una batería [26]

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas conectadas en serie o en paralelo. Una celda es la unidad básica de una batería capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas.

Las baterías (Figura 8) constan de cuatro partes fundamentales que son el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito. El ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción. Para el caso de cátodo tenemos una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga [26].

- **Estado de carga (SOC) y Estado de salud (SOH)**

El SOC y el SOH son dos indicadores que brindan información sobre el estado de la batería. El SOC es un concepto que hace referencia a cuanta energía está disponible en la batería, mientras que el SOH denota la degradación que ha sufrido la misma. Ambos indicadores son empleados para determinar el tiempo de vida de la batería aspecto importante en las aplicaciones donde se utilizan baterías de iones de litio [27].

El SOC se define como la cantidad de energía disponible que puede entregar una batería, este valor es estimado en el corto plazo y comúnmente presentado en porcentaje. Un SOC del 100% significa que una batería está completamente cargada, mientras que un SOC del 0% quiere decir que la batería está completamente descargada [28].

El SOH es un indicador del punto que se ha alcanzado en el ciclo de vida de una batería, es decir una estimación de su condición de salud con respecto a cuando era nueva, este valor es comúnmente presentado en porcentaje. Un SOH del 100% significa que la batería es nueva mientras que un SOH del 0% quiere decir que la batería está completamente degradada. Sin embargo, en la práctica cuando una batería de ion-litio alcanza un punto entre 70%-80% del SOH ya se considera degradada [2].

El SOC y SOH no pueden ser medidos directamente por ende se requiere información de variables como como la corriente de descarga, el voltaje, la temperatura, la resistencia interna/impedancia, ciclo de vida, tasa de degradación de la capacidad para ser estimados [26].

- **Profundidad de descarga (DOD)**

La profundidad de descarga de las baterías está relacionada con el SOC ya que representa el porcentaje de cuanta energía es utilizada por la batería desde una carga completa 100% del SOC. Es decir, cuando una batería cargada completamente y es usada hasta alcanzar el 40% del SOC, el DOD será del 60%. Sin embargo, si una batería parte cargada complemente y entrega energía hasta alcanzar el 20% del SOC, y entonces es cargada nuevamente hasta alcanzar el 40% del SOC, el DOD será la diferencia entre el valor máximo y mínimo del SOC, es decir 80% [28].

- **Tasa de Carga/Descarga (C-Rate)**

Es un factor de la corriente de carga/descarga en términos de la capacidad nominal de una batería expresada en Amperios-hora (Ah). Este factor indica la cantidad de corriente usada para cargar/descargar la batería. Es decir, si la capacidad nominal de la batería es de 100Ah esto correspondería a cargar/descargar la batería a 1C o corriente nominal, ahora si se realiza una descarga a 2C la batería entregará 200Ah, mientras que, si se realiza una carga a C/2, la batería se cargara a 50Ah [29].

- **Sistemas de control**

La gestión de un sistema de control es la de asegurar la explotación de la microrred, con sus correspondientes recursos energéticos en generación y almacenamiento, así también la de brindar una respuesta técnica óptima a los requerimientos energéticos que plantee el perfil de la demanda.

El objetivo del control de una microrred es proporcionar la energía demandada por las cargas haciendo uso de la generación y los sistemas de almacenamiento de forma eficiente y fiable tanto en condiciones normales como durante las contingencias que se puedan producir, independientemente de la conexión a la red [30].

La principal característica de un sistema de control conectado a una microrred aislada, es que no tiene fijado el valor de tensión y frecuencia, por lo que deben ser generados en la propia microrred, normalmente los grupos electrógenos o las baterías actúan como fuentes de tensión, mientras que, el resto de generadores operan como fuentes de corriente, entregando las consignas fijadas por el control central [20].

1.2.2. Fundamentos de optimización matemática

La programación matemática se basa principalmente en optimización, es decir, que a través de un proceso complejo se toman decisiones. Además, la programación matemática se sirve de modelos que se asemejan a la realidad; el objetivo de estos modelos consiste en reproducir la realidad de la forma más fiel posible, tratando de entender cómo se comporta el mundo real y obteniendo respuestas esperadas [31].

La optimización tuvo un progreso algorítmico inicial rápido y consiste en la selección de la “mejor alternativa”, en relación con las demás alternativas. Se puede definir como la aplicación de métodos científicos en la mejora de la efectividad en las operaciones, decisiones y gestión; existen múltiples formas (lineal, no lineal, entera, estocástica, multiobjetivo), teoría de la decisión y de juegos, teoría de colas y simulación, teoría de grafos o flujos de redes, todas con la finalidad de conseguir la satisfacción óptima de un objetivo específico [32].

Los distintos tipos de problemas de optimización se conforman generalmente de tres componentes.

- **Función objetivo**

Es la parte medular del funcionamiento de un sistema, pues es la medida cuantitativa que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Dentro de las distintas funciones objetivo se puede mencionar: la minimización de los costes variables de operación de un sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, etc., [32].

- **Variables**

Se refiere a las decisiones que muy probablemente se pueden tomar con la finalidad de afectar el valor de la función objetivo. Funcionalmente, se pueden clasificar en variables independientes o de control y variables dependientes o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales; en el sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas [32].

- **Restricciones**

Se definen como un conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) donde ciertas variables deben sujetarse a satisfacer. Por ejemplo, las potencias máxima y mínima de operación de un grupo de generación, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos, etc.

La resolución de los problemas de optimización se basa en llegar a un valor, donde todas las variables deben optar por dicho valor para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo todas las restricciones planteadas.

Los métodos de optimización se pueden clasificar en métodos clásicos y métodos metaheurísticos; en relación al primer método se encuentra la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, etc., en referencia al segundo método se incluyen los algoritmos evolutivos, el método del recocido simulado, las búsquedas heurísticas, etc., [32].

De forma general, se puede mencionar que los métodos clásicos buscan y garantizan un óptimo local mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, aunque no garantizan su alcance. En la Tabla 3, se denota las expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos. A los problemas de optimización se puede clasificar por el carácter de las funciones que intervienen (lineales o no lineales) y de las variables (reales-continuas o enteras-discretas).

Tabla 3: Expresiones matemáticas de problemas de optimización [32]

Programación lineal LP	$\min_x c^T x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$
Programación lineal entera mixta (MIP)	$\min_x c^T x + d^T y$ $Ax + By = b$ $x; y \geq 0$ $x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l$ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m$
Programación cuadrática (QP)	$\min_x c^T x + \frac{1}{2} x^T Q x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}, b \in \mathbb{R}^m$
Programación no lineal (NLP)	$\min_x f(x)$ $g(x) = 0$ $h(x) \leq 0$ $l \leq x \leq u$ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ $g, h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

Al momento de encontrar una resolución, aparecen decisiones donde no pueden ser representadas de forma adecuada, es decir, mediante variables continuas. Por ejemplo, las decisiones de inversión son variables discretas (planificación de la expansión de la generación o de la red, adquisición de equipos singulares, contratación de personas) o binarias (localización de plantas o almacenes).

Por otro lado, dentro del tipo de problemas de optimización, aparecen algunos tipos que alteran ligeramente el esquema planteado [32].

- **Sistemas de ecuaciones lineales – no lineales**

No existe una función objetivo como tal. Fundamentalmente, es necesario encontrar una solución factible y posible a un problema con un conjunto de restricciones.

- **Optimización sin restricciones**

Se trata de utilizar un conjunto de valores de variables que determinen el mínimo/máximo valor de una función. Algunas de las técnicas para programación no lineal se desarrollan en función a optimización sin restricciones.

- **Optimización multiobjetivo**

Es aquel problema donde existe más de una función objetivo, su planteamiento, de igual manera, se debe tratar las varias funciones objetivo de manera simultánea; teniendo en cuenta que el óptimo para un objetivo no lo es para otro, es decir, son objetivos que tienen conflictos entre sí. La resolución se basa de forma más general como una decisión multicriterio.

1.2.2.1. Optimización lineal

La optimización lineal, se refiere a la aplicación clásica por excelencia, por ende, la más desarrollada, esto ocasiona que, los modelos sean los más utilizados en relación a los otros tipos de optimización [33]. Este tipo de optimización abarca la mayoría de modelos de la actividad humana como son la economía, finanzas, planificación, selección de procesos, etc. Su importancia es por la existencia de técnicas potentes, estables y robustas para encontrar el valor óptimo [31].

1.2.2.2. Optimización lineal entera mixta

Un problema de programación lineal entera mixta es un problema de programación lineal en el que algunas de las variables son enteras. Por esta razón, si todas las variables enteras son binarias (0-1), a dicho problema se denomina como problema de programación lineal entera mixta (0-1). Si, por otra parte, todas las variables son enteras, el problema se denomina problema de programación lineal entera estricta. Dentro de ingeniería, los problemas más frecuentes son los de problemas de este tipo. En la Figura 9 indica los puntos factibles de una respuesta [31].

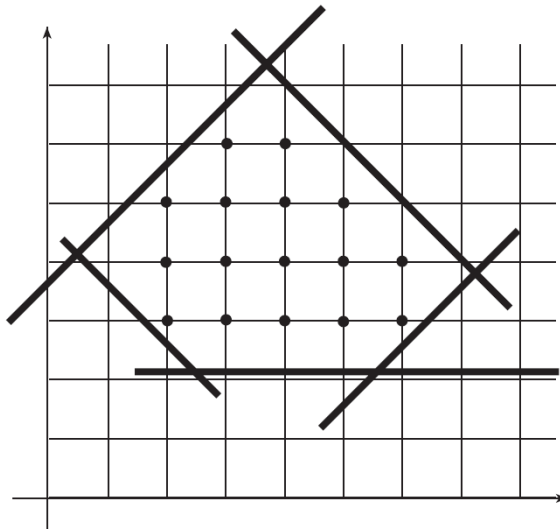


Figura 9: Conjunto de soluciones factibles de un PPLEE [31]

1.2.2.3. Optimización no lineal

Un problema de programación no lineal, de forma general se plantea bajo la expresión de la ecuación 1.

$$\min_x f(x) \tag{1}$$

$$g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, \dots, m$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$, $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ y $g_i(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Nótese que, en este caso, la no negatividad de las variables no forma parte de la formulación general. A pesar de que una función objetivo puede ser de maximización o minimización, en lo referente a un problema de programación no lineal, se supondrá sin pérdida de generalidad, que es un problema de minimización.

1.2.3. Despacho económico de energía en la microrred

El despacho económico se describe como una distribución de la carga, donde asumen las diferentes fuentes de generación para su abastecimiento, el principal objetivo es la disminución de costos al momento de suministrar energía y principalmente se basa en tener un sistema de calidad, confiable y eficaz [34].

Por otra parte, se debe considerar que para una demanda dada exista disponibilidad de energía en su fuente de generación, lo que lleva a declarar costes de producción de los generadores; y, a partir de ello, se persigue la mejor configuración de la generación posible desde el punto de vista económico.

Por todo ello, se trata de una optimización donde se considera un nodo único dentro de la red al que inyectan energía una serie de generadores, que son absorbidas por unos demandantes [35].

Es de relevancia, decir que cada generador tendrá un coste por unidad de energía producida característico, por lo que se considera de forma inicial solo los costes debidos al combustible, sin tomar en cuenta los costes de mantenimiento, costes a la emisión de CO₂ u otros adicionales. Los costes están en relación directa a la potencia, sobre todo la que está determinada en cada central. A más potencia, mayores consumos, luego mayor coste absoluto, aunque menor coste por unidad producida. Se debe observar el comportamiento de la curva de costes, se observa un óptimo en el que el coste unitario es el más bajo, es decir, el rendimiento de la producción es el más alto económicamente [34].

1.2.3.1. Despacho económico convencional

El despacho económico convencional determina las potencias que deben establecerse por la generación en cada una de las unidades que estén disponibles para cubrir la demanda requerida en los diferentes periodos de tiempo tomando en cuenta el menor costo que se pueda generar. Está conformado de centrales que utiliza combustibles fósiles o hidroeléctricas de gran tamaño. Se toma en cuenta la demanda y sus diferentes picos que deben ser cubiertos a sus diferentes plazos de tiempo, como también la asignación de potencia de salida y que unidad ingresa al SEP y una inversión a un plazo futuro para nuevos sistemas de generación y transmisión [17].

1.2.3.2. Despacho económico no convencional

El despacho económico no convencional define su interés como un despacho convencional, pero tomando en cuenta centrales de generación con diferentes recursos para generar energía eléctrica. Las centrales de generación son más amigables con el medio ambiente y son parte de las nuevas tecnologías limpias; ya que su fuente primaria ya no depende únicamente de los combustibles fósiles. Las centrales de generación no convencionales se describen a base de energías renovables. Entre las fuentes consideradas renovables no convencionales se encuentra la energía eólica, solar, mareomotriz, geotérmica, hidráulica en ciertos aspectos y biocombustibles que contribuyen a reducir las emisiones de gases dañinos para el medio ambiente ya que reducen el efecto invernadero, diversifica los suministros energéticos y ayuda a la disminución de los mercados con combustibles fósiles como el petróleo y el gas [23].

1.2.3.3. Formulación de un despacho económico

Para resolver un problema de despacho económico se debe hacer modelados de las curvas de entrada y salida de las unidades térmicas, que son las que son más costosas en generación de energía eléctrica, estas curvas son complejas ya que dependen de condiciones ambientales y de parámetros termodinámicos, el costo de estas unidades está representados por la ecuación 2:

$$C(P_{Gi}) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (2)$$

Donde:

P_{Gi} es la salida del generador i en MW,

a_i, b_i, c_i son coeficientes constantes.

El despacho económico se lo puede analizar de dos formas, sin pérdidas y con pérdidas; el despacho económico sin pérdidas, es un caso simplificado, con este estudio se puede tener una primera aproximación para la solución iterativa al considerar el sistema con pérdidas.

Matemáticamente se representa el despacho económico sin pérdidas según la ecuación 3 [36].

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \\ \text{sujeto a } &\left(P_D - \sum_{i=1}^n (P_{Gi}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

P_{Gi} es la salida del generador i en MW,

P_D es la potencia demandada,

Sin embargo, siempre hay pérdidas, lo cual complica el problema, en donde se debe aumentar las pérdidas, algunas veces se lo hace de manera exacta y otras de manera aproximada, su representación matemática (ecuación 4) se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \min F &= \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \\ \text{sujeto a } &\left(P_d + P_L - \sum_{i=1}^n (P_{Gi}) \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

P_{Gi} es la salida del generador i en MW,

P_D es la potencia demandada,

P_L la pérdida en la línea.

Una vez que se tiene definido el problema de despacho económico, se debe cumplir con las ecuaciones de balances nodales y esto se logra ingresándolas como restricciones.

1.2.4. Optimización no lineal

La programación no lineal es un método por el cual se optimiza, ya sea maximizando o minimizando, una función objetivo. Esto, tomando en cuenta distintas restricciones dadas. Se caracteriza porque la función objetivo, o alguna de las restricciones, pueden ser no lineales. Los principales elementos de la programación no lineal son los siguientes:

- **Función objetivo:** Es aquella función que se optimiza, ya sea maximizando o minimizando su resultado.
- **Restricciones:** Son aquellas condiciones que deben cumplirse al optimizar la función objetivo. Puede tratarse de ecuaciones o inecuaciones algebraicas.

Dentro de los problemas de programación no lineal se pueden presentar de muchas formas distintas y no existe un único algoritmo o método para resolverlos. En su lugar, se han desarrollado algoritmos para unas clases o tipos especiales.

La resolución de estos problemas es, en general, más difícil y computacionalmente más costosa. En programación no lineal no existen métodos completamente robustos que solucionen cualquier tipo de problema. Por ello, en la formulación de un problema es necesario seguir dos recomendaciones esenciales:

- 1) Escalar adecuadamente las variables y restricciones del problema alrededor de 1, es decir, tanto las variables originales como las de holgura o exceso a 1, y
- 2) Proporcionar un punto inicial suficientemente cercano al óptimo.

- **Optimización no restringida**

Son problemas de optimización (ecuación 5), donde no hay restricciones

$$\min_x f(x) \quad (5)$$

Para este tipo de problemas es necesario determinar las condiciones que ha de cumplir un punto para que sea óptimo y algunos algoritmos de búsqueda para encontrar tal punto, diferenciando entre problemas de una variable (unidimensionales) o de más variables (multidimensionales) y entre algoritmos que usan diferenciación y otros que no [33].

- **Optimización linealmente restringida**

Son problemas donde todas las restricciones son lineales, aunque la función objetivo no lo es

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ Ax = b \end{aligned} \tag{6}$$

En este caso (ecuación 6), el problema se simplifica y existe una extensión del algoritmo simplex para resolverlo además de algunos casos particulares, como el del problema cuadrático, con algoritmos particulares muy eficientes [33].

- **Programación cuadrática**

Son problemas donde las restricciones son lineales, pero la función objetivo es cuadrática (ecuación 7), es decir, que incluye algún término con el cuadrado de alguna variable o con el producto de dos variables

$$\begin{aligned} \min_x f(x) = \frac{1}{2} x^T Q x - b^T x \\ Ax = b \end{aligned} \tag{7}$$

La programación cuadrática es muy importante, ya que surge de forma natural, por ejemplo, cuando la función objetivo representa distancias euclídeas (mínimos cuadrados). Además, una de sus utilidades es como problema auxiliar en otros tipos de optimización [33].

- **Programación convexa**

La programación convexa engloba una amplia clase de problemas, entre los que se encuentran los casos anteriores cuando las funciones son convexas. Sus hipótesis son: $f(x)$ es convexa (cóncava si es maximización) y $g_i(x)$ es convexa $\forall i=1, \dots, m$. En tal caso, se puede asegurar que todo óptimo local es también global [33].

- **Programación no convexa**

Incluye todos los problemas de programación no lineal que no cumplen la hipótesis de la programación convexa. En este caso, aun cuando se logra encontrar un óptimo local, no se puede asegurar que sea un óptimo global [37].

Para este tipo de problemas existen algoritmos, bastante adecuados en algunos casos, para encontrar óptimos locales. Para algunos casos especiales, además, hay algoritmos específicos que permiten resolver los problemas sin gran dificultad.

- **Programación geométrica**

Surge a menudo en problemas de diseño de ingeniería, donde la función objetivo y las restricciones toman la forma de la ecuación 8

$$g(x) = \sum_{j=1}^n c_j P_j(x) \quad (8)$$

Donde

$$P_j(x) = x_1^{a_{j1}} x_2^{a_{j2}} \dots x_n^{a_{jn}}, \quad j = 1, \dots, n$$

En tales casos, c_j y a_{ij} representan las constantes físicas y x_j las variables de diseño. Estas funciones, en general, no son ni cóncavas ni convexas, pero, existe un caso particular bien resuelto cuando los coeficientes c_j son estrictamente positivos.

- **Programación fraccional**

Surge cuando la función objetivo (ecuación 9) se encuentra como una fracción

$$f(x) = \frac{f_1(x)}{f_2(x)} \quad (9)$$

Situación que se puede plantear, por ejemplo, al maximizar la razón de la producción entre las horas/hombre empleadas (productividad) o la ganancia entre el capital invertido (tasa de rendimiento), etc.

Existen algunos procedimientos especiales para ciertas formas de las funciones $f_1(x)$ y $f_2(x)$, aunque en general, se intenta transformar el problema en algún otro para el que se disponga de un procedimiento eficiente [38].

1.3. Fundamentación metodológica

Para el desarrollo del proyecto, se necesita de un sistema metodológico de investigación con la finalidad de obtener resultados óptimos de manera eficiente y eficaz [39].

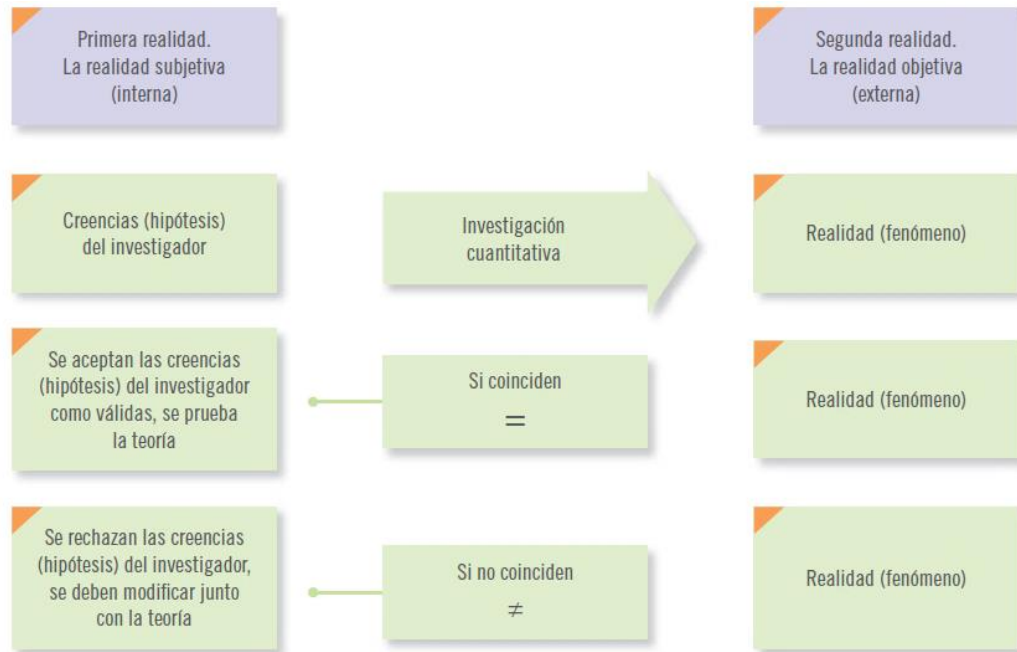


Figura 10: Relación entre teoría, investigación y la realidad cuantitativa [39]

De esta manera, este proyecto al buscar un resultado exacto se lo enfoca de manera cuantitativa, sin embargo, también es necesario tener una investigación cualitativa para conocer los fenómenos relacionados al despacho económico en sistema de gestión de energía.

En la Figura 10, prevalece la idea de una realidad creíble, pero que a su vez es diferente al conocimiento que uno se tiene, es por esto que, se debe modificar y a adaptarse a la realidad, de igual manera, en la investigación se debe asociar a la idea de una realidad conocida sobre la gestión de energía; pero con la contrastación de valores se llega a una investigación real que coincidirá o no con la hipótesis planteada [40].

1.3.1. Tipos de investigación

El tema de investigación propone una evaluación del sistema de gestión de energía mediante optimización no lineal, esto como una alternativa observar una respuesta óptima y aprovechamiento de la energía, obtener la investigación se va a necesitar de varios de tipos de investigación como se presenta a continuación.

Investigación descriptiva

Al ser un proyecto de investigación, es necesario descomponer el objeto de estudio en distintas aristas en lo concerniente a sistema de gestión de energía, con el objetivo de llegar a un conocimiento más específico con ideas claras y concisas relacionado a métodos de optimización matemática.

Este tipo de investigación permite describir un despacho económico y sus formas para optimizar el recurso energético.

Investigación teórica-conceptual

Este tipo de investigación se fundamenta en la revisión bibliográfica, a través de tesis, artículos científicos, libros, etc., acerca del despacho económico, sobre todo documentación donde la optimización es un camino óptimo para no llegar a un punto crítico en el sistema.

Es necesario la recopilación, organización, valoración crítica de la información bibliográfica, con la finalidad de evitar la dispersión de publicaciones que no estén muy acordes al tema de investigación. Es imprescindible conocer la fundamentación de optimización matemática no lineal, así como también los métodos y técnicas que han sido utilizado para su resolución.

Investigación aplicada

Con este tipo de investigación, permite plasmar los conocimientos científicos, teóricos y prácticos, con la finalidad de aplicarlos y obtener la investigación deseada; con el uso de softwares especializados permite conocer todos los escenarios del sistema y su respuesta frente a cada una de los valores obtenidos.

1.3.2. Métodos de investigación

Método analítico - sintético

El análisis de los métodos o fenómenos que permite a una optimización del sistema sobre todo en su despacho económico, permite conocer a detalle los parámetros que aportan cada uno de ellos, con el objeto de evitar un colapso del sistema. Toda la síntesis de la información obtenidas a través de la documentación permite tener claro el fundamento teórico para la investigación.

Método deductivo - inductivo

El conocimiento adquirido junto con la experiencias laborales o reales en sistemas eléctricos de potencia, permite inducir a que sea plasmado de forma práctica en softwares, modelos matemáticos para evitar una respuesta no óptima. Por esta razón, es necesario conocer temas particulares con la finalidad de englobar el tema general.

Sin embargo, las deducciones personales fortalecen la investigación, con la finalidad de optimizar la comprobación de varios fenómenos dentro de lo que se refiere al despacho energético [40].

1.3.3. Técnicas de investigación

La observación

Método práctico y tangible ya que permite apreciar en forma directa el funcionamiento de cada una de las etapas al momento de implementar el modelo simulado sobre todo el sistema eléctrico [39].

La experimentación

Este método permite tomar decisiones y formas de reaccionar a un sistema estable conjuntamente con las decisiones que debe tomar el sistema de gestión, por medio de la técnica “Ensayo - Error”, para conocer si está funcionando correctamente el sistema [39].

Análisis documental

El punto clave de la presente investigación es el proceso de análisis documental, ya que es donde se define el punto de partida para el caso de estudio; los documentos a ser analizados son el conjunto de toda la información referente a sistemas de gestión de energía, despacho económico, optimización matemática, etc. La información recolectada en este punto de la investigación será comparada con las prospectivas desarrolladas para fundamentar nuestro proyecto [40].

1.4. Conclusiones Capítulo I

Una vez extraído toda la documentación necesaria, y junto a ella la revisión bibliográfica de artículos científicos, libros, tesis de pregrado y posgrado, se establece una estructura secuencial, la que permite determinar una microrred aislada, los elementos que la conformaran y las diferentes ecuaciones para el modelamiento.

La metodología que se plantea para el cumplir los objetivos principalmente se basa en estructurar y formular una función objetivo junto a sus restricciones que minimizan o maximizan la variable que se busca. El método lineal al ser el más práctico de aplicación, es el que la mayoría de investigación utilizan para el desarrollo de un despacho económico.

El enfoque, método y técnicas de investigación escogidas de una manera exacta permite buscar la solución de manera eficiente y eficaz al problema de optimización sobre el cual se desarrolla el tema de investigación, y que, por esta razón, la gestión de energía de una microrred debe cumplir con todas las restricciones impuesta.

La optimización no lineal en sus diferentes formas de resolución se da con mayor utilización de recursos o iteraciones con el propósito de llegar a un mínimo local, que en cierta manera es la mejor respuesta.

CAPÍTULO II. PROPUESTA

2.1. Título del proyecto

Evaluación de un sistema de gestión de energía en una microrred aislada basado en un problema de optimización no lineal

2.2. Objetivo del proyecto

- Plantear un problema de optimización no lineal en el contexto de microrredes aisladas basadas en Fuentes Energías Renovables No Convencionales (ERNC).

2.3. Justificación de la propuesta

El uso de energías renovables se está convirtiendo en una solución viable para el abastecimiento de energía eléctrica en distintos lugares aislados de la población, debido a esto, se han implementado microrredes aisladas, conformadas básicamente por fuentes de energía renovables, sistemas de almacenamiento (baterías) y fuentes de energías no renovables, que mediante un análisis abastezca la demanda requerida.

Para el óptimo funcionamiento de una microrred aislada es necesario recurrir a metodologías de despacho económico con la finalidad de minimizar costos operacionales, sin embargo, la mayoría de estudios ponen de manifiesto en relación al generador a combustión que tiene un comportamiento donde se relaciona el consumo de combustible con su potencia generada del tipo cuadrático y que a pesar de aquello puede ser tratado como un problema lineal.

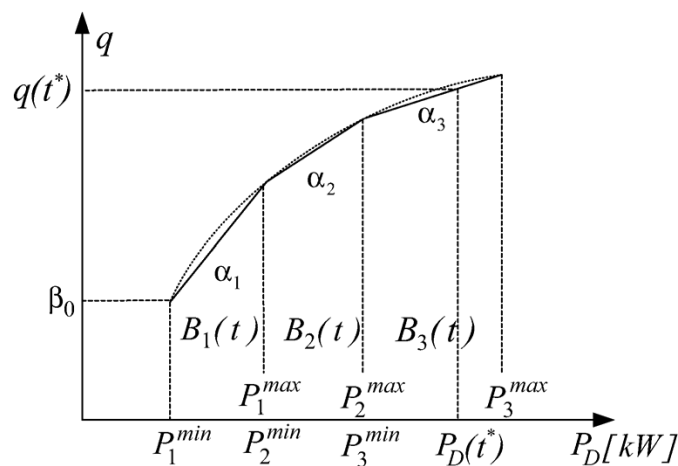


Figura 11: Función de costos linealizada de un generador a diésel [8]

Cabe notar que el consumo de combustible en un generador a diésel se rige bajo una curva cuadrática, y que, a pesar de aquello, puede ser representado como una función no convexa (Figura 11), siendo así que, se puede aproximar a una función no convexa por segmentos lineales en partes iguales, debido a esto, la necesidad de realizar un estudio donde se considere la curva de manera completa [8].

Por esta razón, el desarrollo de un algoritmo de optimización es importante para el aprovechamiento de la energía, de esta manera, la aplicación de optimización no lineal, permite que el generador a combustión actúe de manera acertada.

2.4. Descripción de la propuesta

El sistema de gestión de energía (Figura 12), que se propone tiene como finalidad abastecer de potencia eléctrica a una demanda, minimizando costos operativos; el mismo que se basa en tres ejes principales: la microrred, el despacho económico y el modelo de optimización. En relación a la microrred, es del tipo aislada la cual está conformada por fuentes de energía renovables, no renovables y un sistema de almacenamiento. El despacho económico tiene por objeto, el de garantizar la operación óptima de las fuentes de generación con la finalidad de abastecer de energía eléctrica a la demanda existente, todo esto bajo un modelo de optimización que en este caso es del tipo no lineal, debido a la existencia de un generador a combustión.

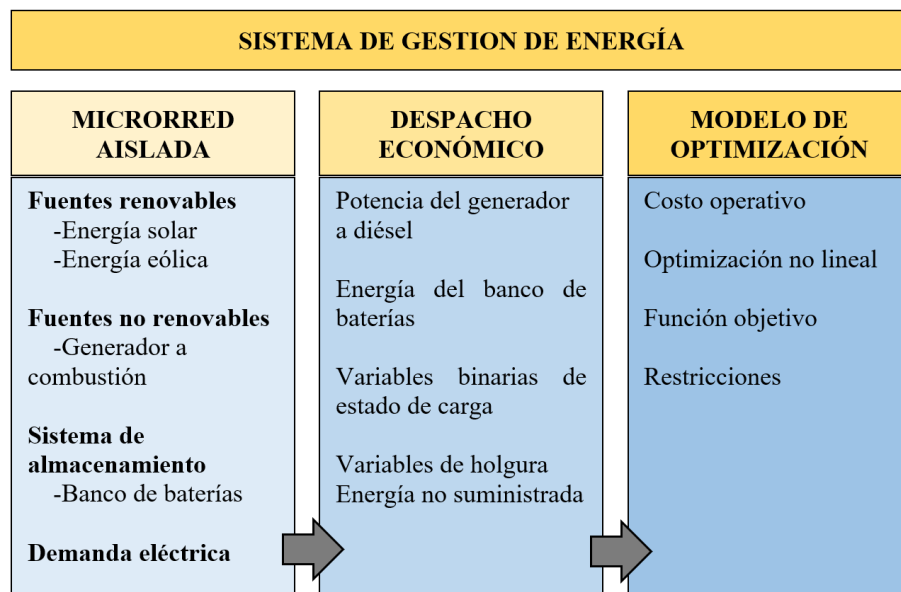


Figura 12: Sistema de gestión de energía propuesto

La microrred propuesta (Figura 13) consta de un sistema fotovoltaico y eólico, los cuales al ser energía renovable y no incurrir en un gasto económico del recurso energético son prioridad en el despacho económico, por lo tanto, aportaran la máxima energía producida hacia la demanda, de ser el caso que exista mayor producción de energía a la requerida por la demanda, se proporcionara al banco de baterías, las mismas que en un principio se encuentran descargadas y que deben llegar a estar completamente cargadas para que actúen como fuentes de energía.

Finalmente, existe un generador a diésel, el cual, de ser el caso se encenderá el tiempo que sea necesario para proporcionar energía a la demanda no abastecida por las fuentes de energías renovables, cabe mencionar, que la operación de este incurre en un gasto económico, por lo que el sistema de gestión de energía, determinará mediante el algoritmo implementado el mínimo consumo de recurso energético, pues la potencia que proporciona el generador se relaciona de forma cuadrática con el consumo de diésel, así también, el generador actúa como sistema de emergencia en el caso de que las fuentes de energías renovables no aporten de energía a la microrred.

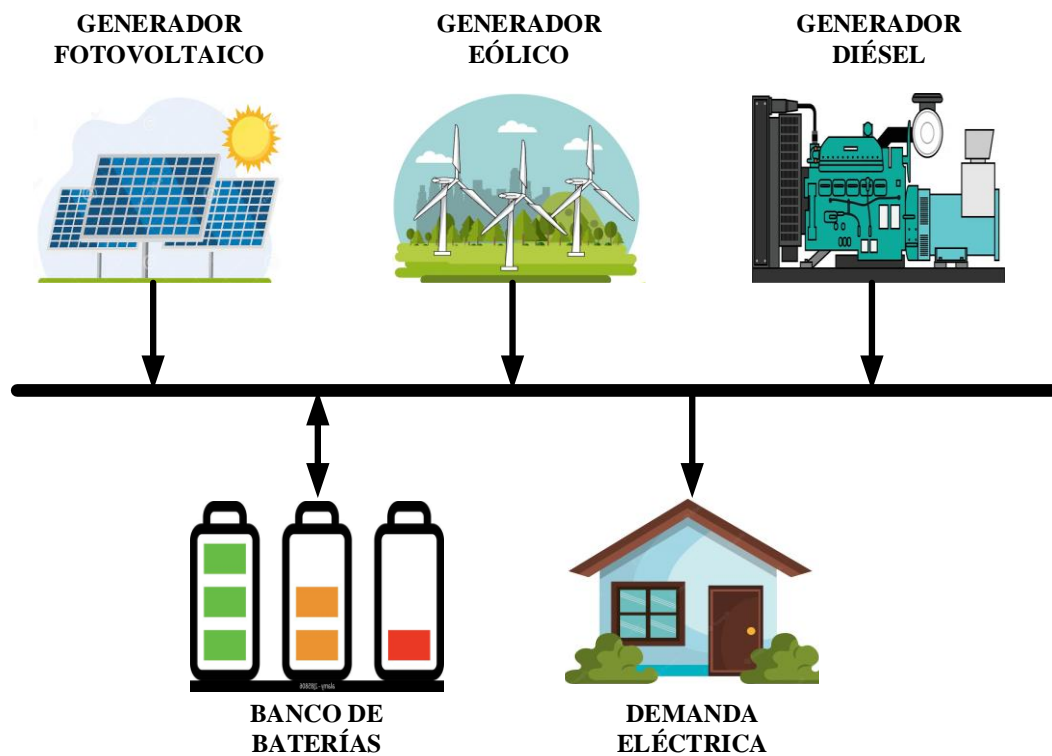


Figura 13: Microrred aislada propuesta

El despacho económico (Figura 14), básicamente se conforma por unidades de generación no despachables (energía solar y eólica) y unidades de generación despachables como son el generador a diésel y el banco de baterías.

Las entradas al modelo son los límites de la potencia de generación, los costos de cada unidad de generación, el SOC del banco de baterías, la generación solar, eólica y la demanda eléctrica. Por otro lado, como salidas se tienen los puntos de ajuste para las unidades despachables (diésel y baterías) y variables de holgura como es la energía no suministrada

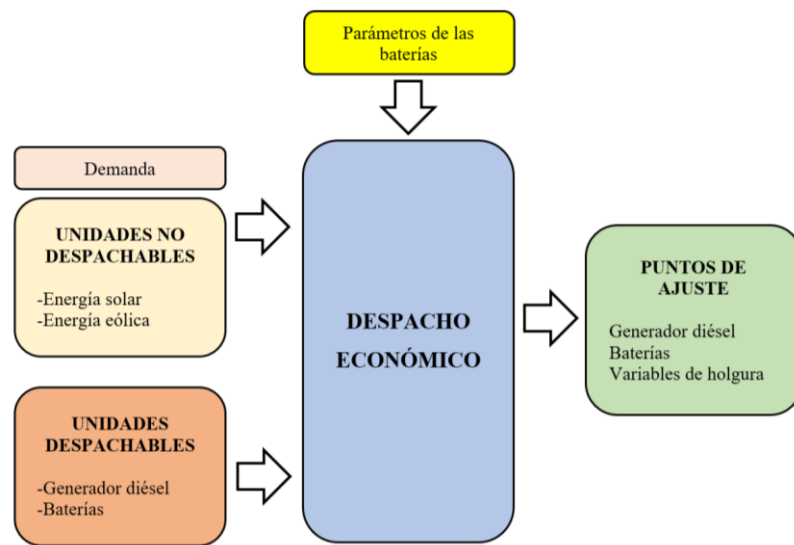


Figura 14: Descripción básica de un despacho económico

Todos estos elementos permiten que la operación de las unidades de generación dentro de la microrred cubra la demanda, sobre todo, la parte no lineal que corresponde al generador a diésel.

Finalmente, para resolver el problema de despacho económico bajo un modelo de optimización no lineal, es necesario formular las diferentes ecuaciones, tanto a nivel de su función objetivo como las distintas restricciones, considerando el modelamiento cuadrático del generador a diésel y de esta manera desarrollar el respectivo algoritmo que será compilado en un software dedicado, obteniendo así el resultado esperado, donde la demanda será abastecida por el sistema de gestión de energía mediante el despacho de las fuentes de generación, priorizando el uso de energías renovables, consiguiendo de esta manera una minimización de los recursos no renovables, produciendo un ahorro en el costo operativo.

2.5. Procedimientos empleados para el cumplimiento de la propuesta

2.5.1. Diseño de la microrred aislada

En la Figura 13, se muestra la microrred que se debe conformar la misma que está integrada por una unidad controlable (grupo electrógeno), fuentes de generación de energía renovables (solar y eólica) y un sistema de almacenamiento por baterías, después de definir los equipos, bajo sus características correspondientes, la microrred será capaz de abastecer la demanda en cada hora del día.

El diagrama de flujo (Figura 15), muestra el proceso que se debe considerar para la implementación de la microrred, es necesario, establecer un lugar sobre el cual se desarrollará el estudio. La adquisición de datos, sobre el lugar definido, puede ser mediante trabajo de campo o a su vez gracias a una base de datos que varios centros meteorológicos cuentan y que se encuentran disponibles a la comunidad.

El criterio de dimensionamiento para la generación fotovoltaica principalmente es aprovechar el recurso en las horas de mayor intensidad solar y acumularlo para que abastezca en la mayoría del día a la demanda. El sistema eólico al ser un recurso pobre, este aportará directamente de potencia eléctrica al sistema, de ser el caso, también tiene la posibilidad de ayudar al sistema de almacenamiento. Sin embargo, el banco de baterías inicialmente se encuentra en etapa descargada, será abastecido por el excedente de energía renovable, mientras que el generador a diésel, se dimensionará de tal manera que cubra toda la demanda existente, actuando también como un sistema de emergencia, con estos valores obtenidos, se puede asociar a equipos que se encuentren en el mercado y aplicar los modelos propuestos para conocer su respuesta dentro del proyecto [22].

Una vez establecida una correlación de ideas, donde el principal objetivo es el entendimiento de una microrred y todas las partes que la conforman, deducido de la fundamentación teórica, se procede a iniciar una búsqueda de datos ya sea del tipo solar, eólico, etc. Para la ejecución de la investigación los datos se obtienen del centro de meteorología de la NASA (<https://power.larc.nasa.gov/>), así como también, del centro de meteorología METEOBLUE (<https://www.meteoblue.com>).

El contenido obtenido por parte de esta base de datos, son de alta calidad, precisión y exactitud. Se obtienen datos de dos años anteriores, con intervalos de una hora para cada día.

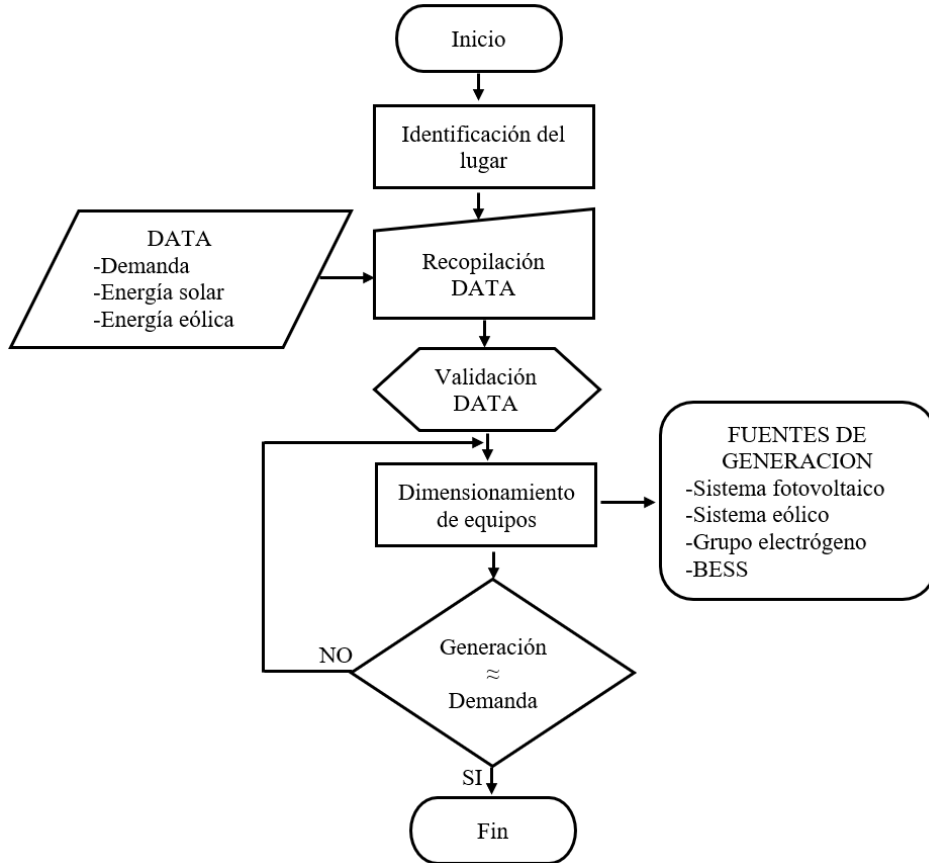


Figura 15: Flujograma para el diseño de la microrred aislada

Los datos obtenidos por los centros de meteorología se encuentran en formato .CSV, se procede a una revisión, discriminando los valores del tipo nulo y/o vacíos, los mismos que deben ser revisados y de ser el caso eliminarlos, para obtener una data más cerca a la realidad.

2.5.1.1. Demanda eléctrica

La demanda eléctrica es variante en el tiempo, debido a esto, se debe considerar para que sea lo más exacta, ya sea por diferentes métodos matemáticos, sin duda, siempre existirá una incertidumbre proporcionada en cualquier estudio y lapso de tiempo, bajo estas consideraciones, es importante conocer que la incertidumbre aumenta cuando se realiza un análisis de predicción, por lo que, es necesario aplicar de ser el caso diferentes métodos de predicción [41].

Para el presente análisis se utilizan datos obtenidos por la EEQ del año 2021, el que indica la demanda residencial, durante los 365 días, en intervalos de una hora. A pesar de existir una base de datos sólida, se opta por trabajar con los datos del mes de agosto; el análisis que se realiza es con una demanda real de los usuarios dentro del lugar.

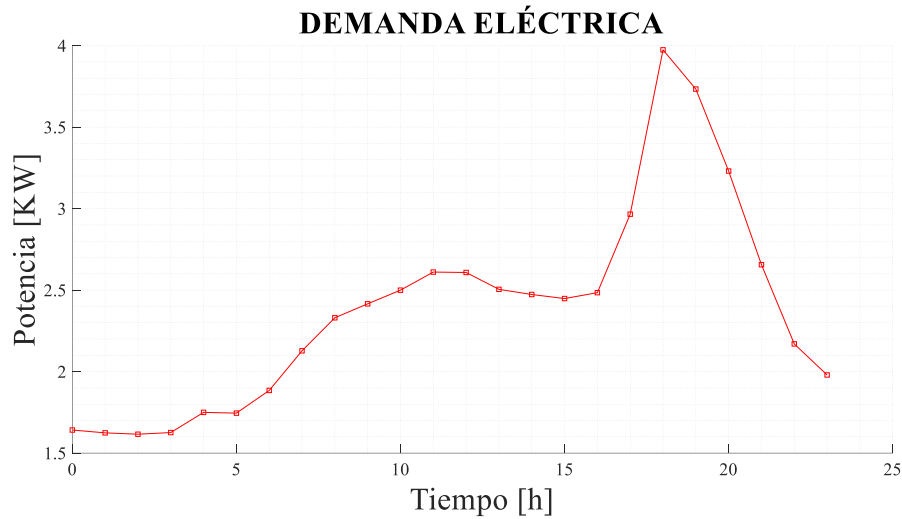


Figura 16: Curva de demanda eléctrica diaria

Fuente: Departamento de planificación Empresa Eléctrica Quito (EEQ)

Según la Figura 16, establece que la mayor demanda se produce entre las 17h00 y 20h00, por lo tanto, en este horario llega a una potencia de 4KW, que debe ser abastecido por las distintas fuentes de energía que conforman la microrred.

Dentro de la investigación, se considera la sumatoria de potencias individuales instaladas, así como también, la instalación de un analizador de energía para determinar el consumo.

2.5.1.2. Energía solar

La energía solar fotovoltaica, es sin duda, una fuente de energía limpia y renovable, que utiliza la radiación solar para la generación de electricidad. A partir de esto, el efecto fotoeléctrico, permite que algunos materiales puedan absorber fotones y liberar electrones en forma de corriente eléctrica; estos materiales son del tipo semiconductor y pueden ser de silicio monocristalino, policristalino o amorfo [42].

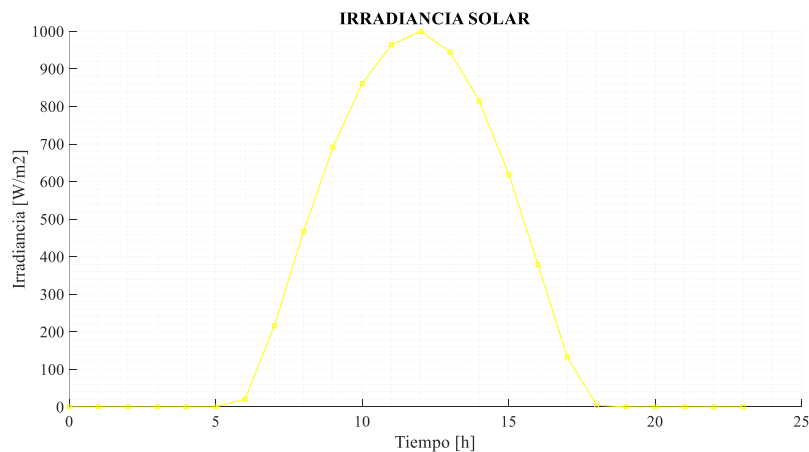


Figura 17: Curva de irradiación solar diaria

Fuente: <https://power.larc.nasa.gov/>

En la Figura 17, se presenta la cantidad de energía solar (irradiación), durante el periodo de un día, esto permite determinar la incidencia de este recurso energético sobre sobre este lugar [43].

La generación fotovoltaica se describe como la transformación de forma directa de la radiación solar a través de la conexión de celdas solares (dispositivo semiconductor), ya sea en paralelo o serie; la misma que produce la excitación de los electrones produciendo un diferencial de potencial.

Tabla 4: Características Peimar SG360M [44]

DESCRIPCIÓN	VALORES
Potencia nominal (Pmax)	360 W
Voltaje a Pmax (Vmp)	38 V
Corriente a Pmax (Imp)	9.48 A
Voltaje a circuito abierto (Voc)	46.6 V
Corriente a corto circuito (Isc)	10.09 A
Voltaje máximo del sistema	1500 V
Capacidad máxima de fusible en serie	15 A
Eficiencia del módulo	18.54 %

Es importante, considerar que las horas de sol pico (HSP), se presentan desde las 11h00 hasta las 13h00, teniendo un valor superior a los 1000 W/m^2 , lo que permite contabilizar la energía recibida del sol. Con estas consideraciones de datos, se determina un panel fotovoltaico con las siguientes características, Tabla 4.

La Figura 18, muestra los parámetros que definen el funcionamiento de la celda. La intensidad de corto circuito (I_{sc}), se obtiene de la celda cuando, en ausencia de cargas extremas y tras haber sido cortocircuitada en sus terminales, la tensión entre bornes es nula. Constituye la máxima corriente que puede obtenerse [45].

La tensión en circuito abierto (V_{oc}), es para la que los procesos de recombinación igualan a los de generación y, por lo tanto, la corriente extraída de la celda es nula. Constituye la máxima tensión que puede obtenerse de la celda, cuando no hay conectado ningún consumo y la intensidad que circula es nula [46].

La potencia máxima (P_{max}), es la que se extrae de la celda y viene dada por el producto de corriente y tensión, en la Figura 19, se representa mediante línea de trazos y puntos. Se observa que tanto en corto circuito como en circuito abierto la potencia generada es nula; de igual manera, existe un punto de operación en el cual la potencia disipada en la carga es máxima, denominado punto de máxima potencia [47].

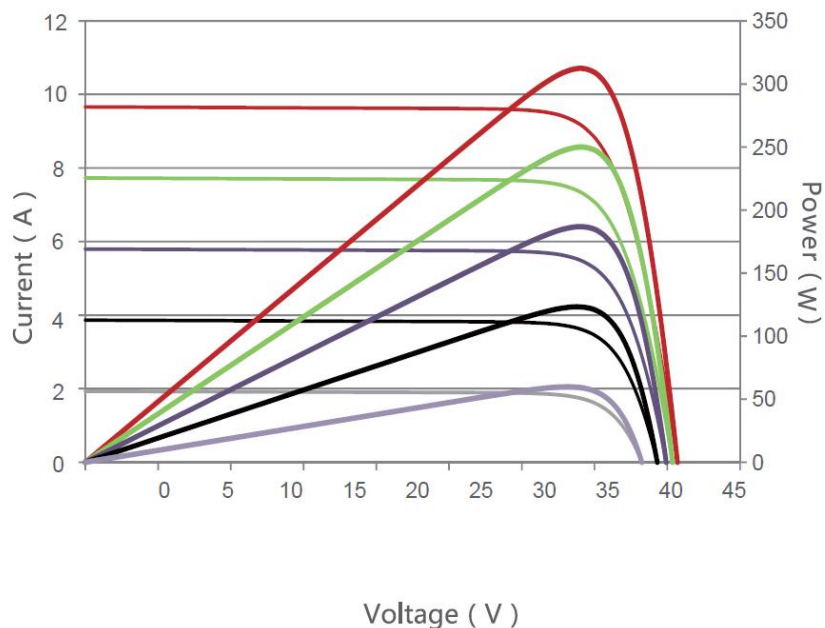


Figura 18: Curva característica V-I de una celda solar [47]

Dado que la corriente de cargas generadas a partir de la radiación luminosa es proporcional al flujo de fotones con energía superior a la anchura de la banda prohibida, la intensidad de cortocircuito de una celda solar es directamente proporcional a la intensidad de la iluminación incidente; ante un determinado aumento o disminución porcentual de la iluminación, la intensidad se ve modificada con un cambio porcentual similar en el mismo sentido. En la Figura 19, la tensión en circuito abierto no experimenta grandes variaciones al modificarse las condiciones de la radiación solar [46].

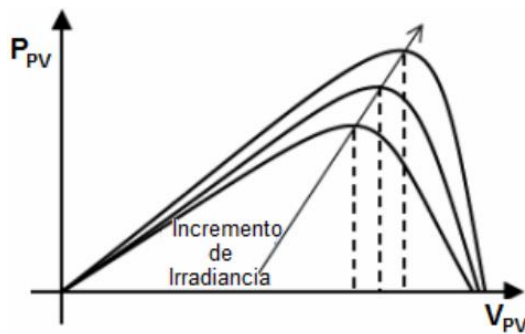


Figura 19: Potencia generada proporcional a la irradiancia [47]

En consecuencia, la potencia generada es prácticamente proporcional a la irradiancia (Figura 17). La proporcionalidad con la irradiancia permite el cálculo de la producción diaria fácilmente. Con este antecedente, se puede concluir la curva de potencia del caso en estudio Figura 20.

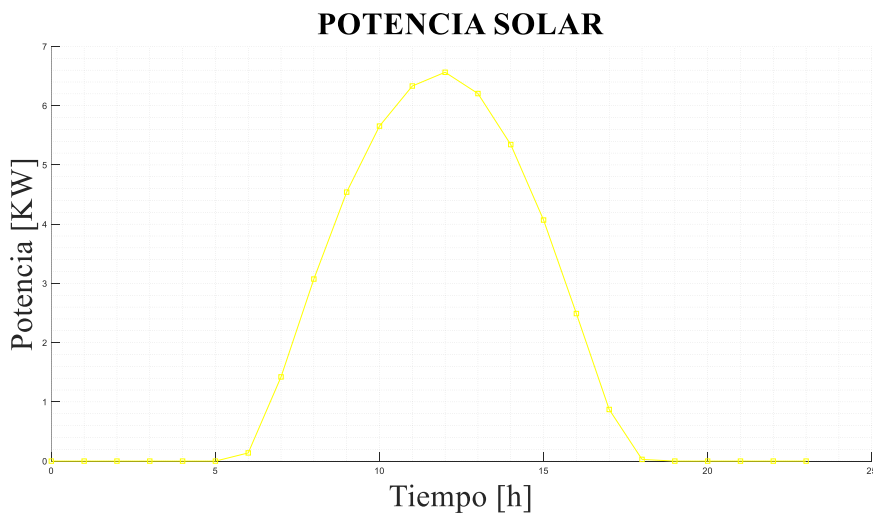


Figura 20: Potencia solar diaria

Fuente: <https://power.larc.nasa.gov/>

En la Figura 20, la energía solar aporta a la microrred potencia eléctrica a partir de las 7h00, de igual manera, en horas del mediodía se llega a una potencia máxima generada, alrededor de los 7KW, lo que cubriría a la demanda de estudio. Continuando el día, se empieza a tener una reducción de potencia casi en su totalidad a partir de las 18h00, es así que debe ingresar otra fuente de energía para suplir la demanda.

2.5.1.3. Energía eólica

Para realizar el análisis del recurso eólico se necesita de datos, los cuales se obtienen gracias al aporte científico de alguna institución internacional, que aportan sin ningún costo y está al alcance de todos [48].

La Figura 21, muestra la velocidad del viento del sector en un día, la misma que no supera los 9m/s y a su vez es constante en todo el transcurso del día, con estas características se puede escoger un aerogenerador que entregue una potencia proporcional a la velocidad existente [49].

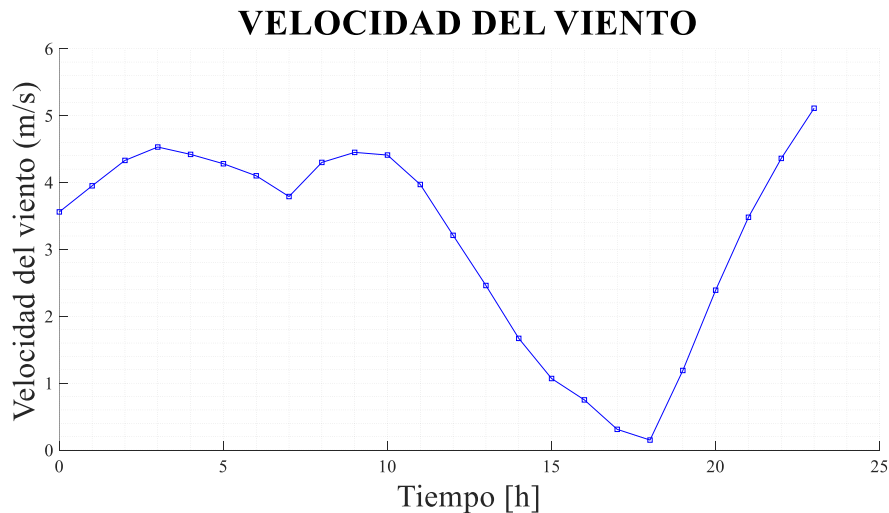


Figura 21: Curva de velocidad del viento diaria

Fuente: <https://power.larc.nasa.gov/>

Con los valores de velocidad de viento y con la ayuda de HOMER PRO, se selecciona el equipo AWS HC 650W WIND TURBINE, con las siguientes características Tabla 5 [50].

Tabla 5: Características AWS HC 650W Wind Turbine [50]

DESCRIPCIÓN	VALORES
Salida nominal	650W
Velocidad nominal del viento	10.5m/s – 24mph
Salida máxima	750W
Velocidad de corte	2.7m/s – 6mph
Área barrida	3.7 m ² /43 pies ²

En la Figura 22, se presenta la curva de potencia que tiene la turbina escogida, con la ayuda de esta curva se pretende obtener la potencia que va a generar alrededor del día y lo que aporte al sistema en términos de potencia eléctrica.

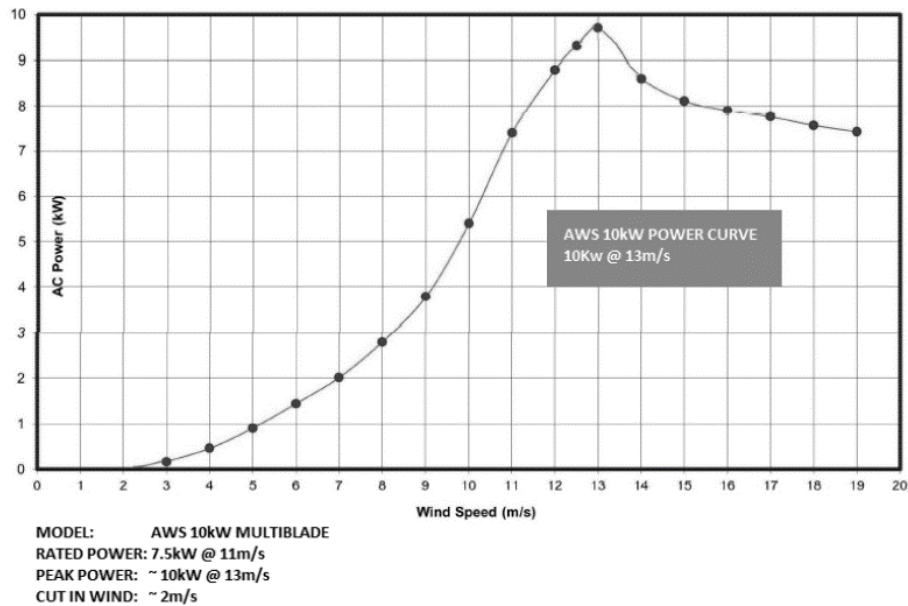


Figura 22: Curva de potencia AWS HC 650 Turbine Wind [50]

La Figura 23, muestra la curva de potencia eléctrica que produce el generador durante las 24 horas del día, existe un aporte que oscila hasta 1 KW, con un pequeño aumento en horas de la mañana, lo cual se da por la topografía del lugar. Sin embargo, la potencia eólica, aunque es de manera constante, no es muy alta en comparación con la energía solar presentada [49].

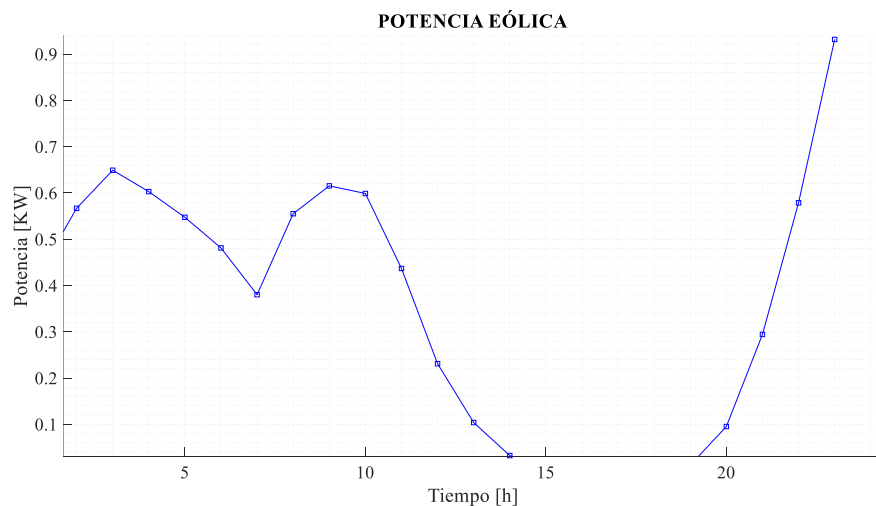


Figura 23: Potencia eólica diaria

Fuente: <https://power.larc.nasa.gov/>

2.5.1.4. Sistemas de almacenamiento (Banco de baterías)

La microrred aislada, por el momento, no está preparada para estas condiciones de funcionamiento, por lo que se hace necesario algún sistema de apoyo a la red en momentos críticos. Un sistema BESS es un conjunto de baterías, normalmente de ion-Litio, capaces de almacenar energía de forma electroquímica y verterla a la red cuando sea necesario [51].

Los acumuladores electroquímicos son dispositivos electrónicos que almacenan energía en su interior. A groso modo se componen de un polo positivo y otro negativo y un electrolito donde ambos polos se encuentran sumergidos.

Las reacciones químicas que se dan en su interior, dependiendo de la tecnología usada, dan como resultado una circulación de corriente continua cuando se cierra un circuito exterior conectado a los electrodos. Esta corriente continua va de polo positivo a negativo cuando se carga y en sentido contrario cuando se descarga [52].

Para el cálculo del sistema de baterías (ecuación 10), se debe considerar la capacidad total del banco de baterías ($C_{baterías}$), teniendo en cuenta la demanda máxima, las horas de autonomía y la profundidad de descarga de la batería [45].

Tomando en consideración lo mencionado, para el dimensionamiento y el número de baterías de litio que van a formar parte del grupo de almacenamiento o BESS, se plantea un consumo de alrededor de 2460Wh, adicionalmente, se determina un respaldo de energía para un promedio de 4 horas diarias.

$$C \text{ baterias} = \frac{D_{\text{máx}} \times D_a}{P_d \times V_{\text{sist}}} \quad (10)$$

Donde:

$D_{\text{máx}}$ Demanda máxima

D_a Días de autonomía

P_d Profundidad de descarga de la batería

V_{sist} Tensión del sistema

$$C \text{ baterias} = \frac{3281 \times 4}{0.5 \times 24} = 1093Ah$$

Una vez, con el dato se elige una batería, para determinar la cantidad de baterías necesarias para la instalación (ecuación 11 y 12). En este caso, se utiliza baterías de 250Ah/12 V GEL Maxpower, como se describe en la Tabla 6, con los valores, se calcula el número de baterías en paralelo [53].

$$N^{\circ} \text{ bat paralelo} = \frac{\text{Capacidad nominal de baterias}}{\text{Capacidad nominal de cada bateria}} \quad (11)$$

$$N^{\circ} \text{ bat paralelo} = \frac{1093 \text{ Ah}}{250 \text{ Ah}} = 4.372$$

$$N^{\circ} \text{ bat paralelo} = 5$$

De igual manera, se procede a calcular el número de baterías en serie.

$$N^{\circ} \text{ bat serie} = \frac{\text{Voltaje del sistema}}{\text{Voltaje de la bateria elegida}} \quad (12)$$

$$N^{\circ} \text{ bat serie} = \frac{24V}{12V} = 2$$

$$N^{\circ} \text{ bat serie} = 2$$

Tabla 6: Características de la batería MAX POWER MP250-12 [53]

DESCRIPCIÓN	VALORES
Voltaje nominal	12V
Capacidad nominal	250Ah
Tiempo de vida	10 años
Capacidad nominal	250Ah 10 Tarifa horaria 197Ah 3 Tarifa horaria 160Ah 1 Tarifa horaria
Resistencia interna	Carga completa a 25°C: 2.9mΩ
Máxima corriente de descarga	3000A(5s)

Con todos estos requerimientos establecidos, se determina que se debe implementar una conexión serie-paralelo. Esta consiste en cinco ramales en paralelo, los cuales están conformados por dos baterías en serie de 12V/250Ah [54].

2.5.1.5. Grupo electrógeno (Generador a diésel)

Las plantas térmicas, dependen directamente del calor para generar electricidad ya que dentro del proceso de generación es indispensable calentar una caldera para transformar un combustible de alimentación en vapor y así mover el rotor de la máquina para generar energía [55].

La fuente de generación principal para abastecer la demanda requerida (5KW), como primera opción se pone de manifiesto un generador a combustión, el cual debe cubrir la potencia a la que el sector se encuentra expuesta, en la Tabla 7 se presenta las características del generador.

Tabla 7: Características Generac 5KW Protector [56]

DESCRIPCIÓN	VALORES
Tipo de combustible	Combustible diésel con azufre extremadamente bajo
Voltaje de salida	120/240 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia (En espera)	5 KW
Corriente (En espera)	62 A

Una vez conformada la microrred, en la Tabla 8, se presenta de manera resumida los valores más representativos de cada una de las fuentes de generación que se contemplan en el diseño, así como, también la demanda del lugar escogido.

Tabla 8: Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred

Elemento de la microrred	Pmin (KW)	Pmax(KW)
Potencia de demanda	1.5	4
Generador fotovoltaico	0.5	6.5
Generador eólico	0.2	1
Banco de baterías	0	2.4
Generador diésel	0	5

2.5.2. Formulación del despacho económico

La microrred planteada en la Figura 24, con las características descritas, se propone un diseño de un sistema de gestión de energía; sobre la cual se aplica un despacho económico, con la finalidad de realizar la programación horaria de las unidades de generación controlables (generador diésel, sistema de almacenamiento de energía), en un periodo de tiempo corto, 24 horas hacia adelante.

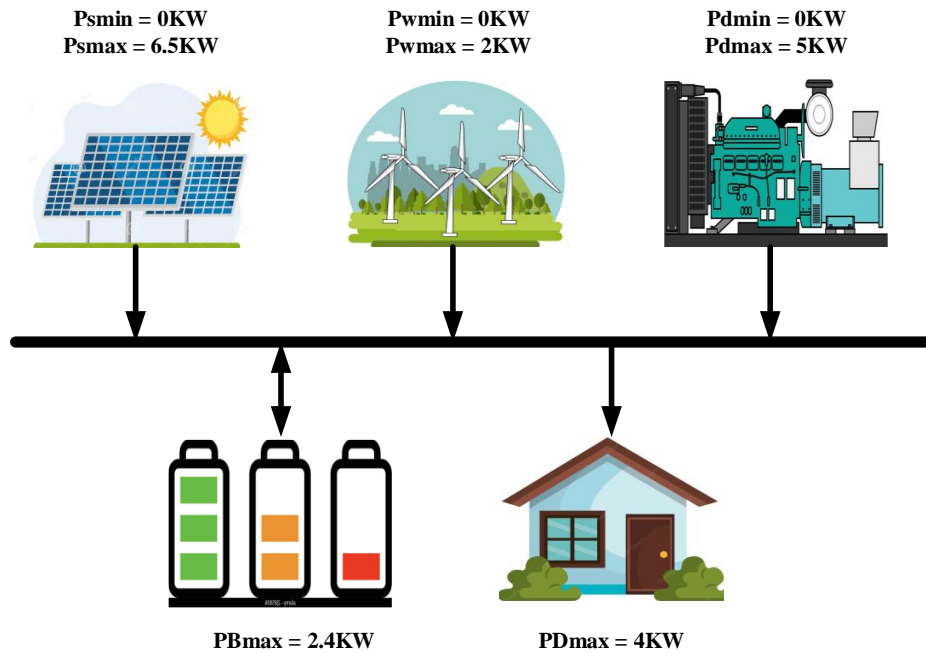


Figura 24: Microrred aislada diseñada

Una vez descrito como está conformada la microrred, la Figura 25, muestra el problema de optimización, que se lleva a través de un despacho económico, el cual se define, como la combinación óptima de las unidades de generación, garantizando el mínimo costo de operación y el abastecimiento de la demanda eléctrica.

El problema de optimización (Figura 25) se plantea como un modelo matemático, el sistema de gestión de energía entrega puntos de referencia a las unidades generadoras despachables, es decir, la potencia del generador diésel P_D , la potencia del pack modular de baterías en modo carga P_B^C y descarga P_B^D , las variables binarias utilizadas para definir el estado del pack X^C en modo carga y X^D en modo descarga. Además, la cantidad de energía no suministrada P_{ENS} .

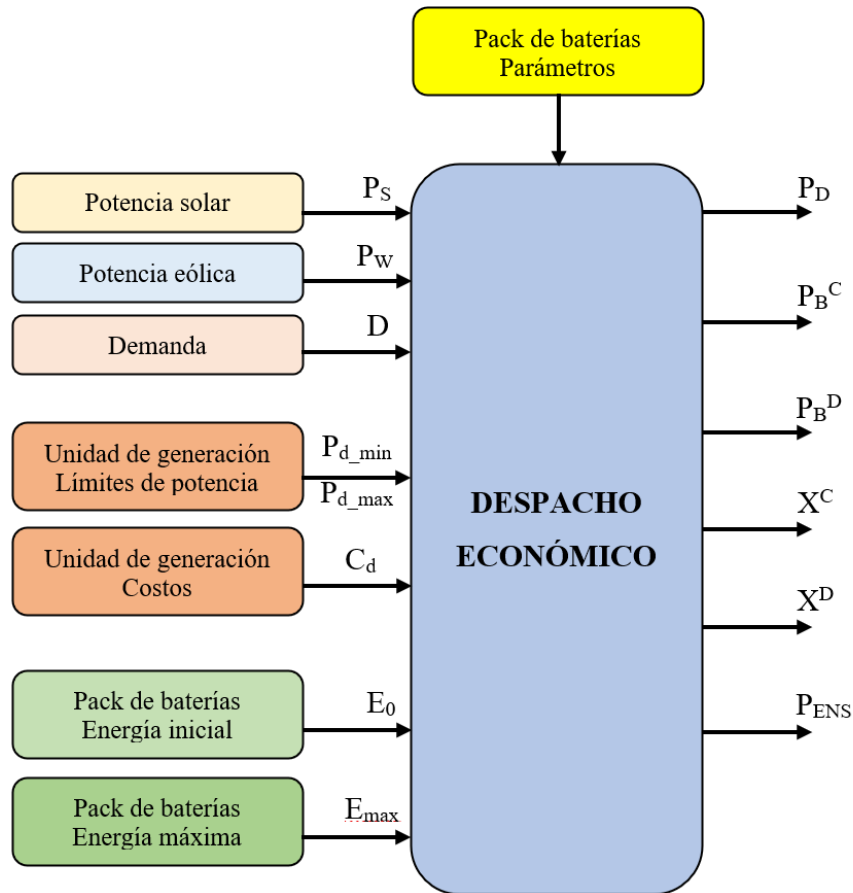


Figura 25: Diagrama de bloques del despacho económico

Por otra parte, las entradas del despacho económico provienen de las fuentes de energía renovables (Potencia solar P_S y Potencia eólica P_W), la potencia que aportan este tipo de generadores depende de la disponibilidad del recurso, en referencia al generador a combustión, se considera como entradas los límites de potencia (P_{d_min} , P_{d_max}) y el costo de operación C_d , adicionalmente, el modelo necesita de la demanda eléctrica D .

Además, la energía inicial E_0 del pack modular de baterías depende del estado de carga (SOC) en el tiempo $t=0$ y la energía máxima E_{max} que el pack puede almacenar o entregar en cada instante de tiempo depende de su estado de salud (SOH).

El despacho económico es formulado como un problema de optimización no lineal, debido a la función de costos del combustible que viene dado por una función cuadrática, así como también, dentro del planteamiento aparecen variables del tipo reales enteras y binarias [57].

Para el diseño del modelo matemático, a continuación, se describe la función objetivo, el balance de potencia y las restricciones; considerando dentro de las ecuaciones, el costo del consumo del combustible diésel, el costo de encendido y apagado del generador diésel [58].

2.5.2.1. Función objetivo

El problema de optimización formulado, se plantea como uno de optimización no lineal, que considera el uso máximo de energías renovables, con la finalidad de abastecer la demanda de electricidad.

La función objetivo (ecuación 13) minimiza el consumo de combustible del generador y el costo operativo de la microrred dentro de un horizonte de tiempo de evaluación (T). La función objetivo se expresa a continuación [57].

Minimizar

$$J = \sum_{t=1}^T \left[C_d \times q_d(t) + C_{ENS} \times P_{ENS}(t) + C_{U_BESS} \times \left(P_B^C(t) \times \eta^C + \frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \right) \right] \quad (13)$$

En la función objetivo, C_d es el costo en función del generador a diésel; minimizando el consumo de diésel (q_t) [58].

Además, en la función objetivo, C_{ENS} , es el costo de la energía no suministrada. C_{U_BESS} es el costo del uso de las BESS y (η^C, η^D) representan el coeficiente de eficiencia del modo carga y descarga del BESS, respectivamente [22].

2.5.2.2. Restricciones

En el control y modelado de la microrred existen diferentes restricciones que deben tenerse en cuenta, así como límites en las diferentes unidades que componen en el sistema y que influyen en control de las operaciones durante el despacho económico.

- **Balance de potencia**

La ecuación de balance de potencia (ecuación 14), manifiesta que, la energía generada por las unidades de potencia debe ser igual a la demanda de electricidad, y se representa como [57]:

$$P_D(t) + P_S(t) + P_W(t) + P_B^D(t) = D(t) - P_{ENS}(t) + P_B^C(t) \quad (14)$$

- **Consumo del diésel – Costo de generación del recurso**

La salida de un generador a diésel es potencia (W), la figura 26 de manera simplificada presenta en su ordenada la curva de costo de combustible. En todos los casos prácticos, el costo de combustible de cualquier generador a combustión se representa bajo una función cuadrática (ecuación 15) de la generación de energía real.

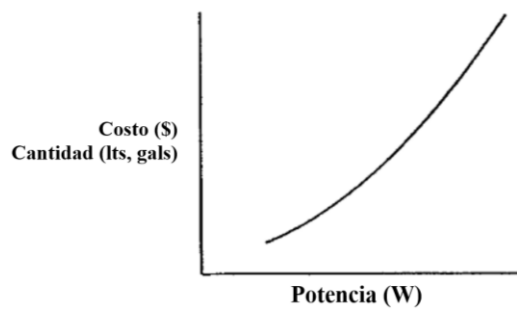


Figura 26: Curva del costo de combustible en un generador a diésel [59]

Para que una unidad generadora de este tipo entregue energía, se necesita de combustible fósil, es decir, que tiene una pequeña relación entre la potencia y el consumo del generador [60]. En referencia a la relación potencia y consumo de diésel, la ecuación 15 manifiesta que dependiendo del porcentaje de consumo de combustible no es lineal, por el contrario, la potencia generada disminuye según aumente el costo de combustible.

$$q_d(t) = \alpha_i + \beta_i P_{di} + \gamma_i P_{di}^2 \quad (15)$$

Es necesario definir que α , β , γ son constantes que definen la relación polinomial del consumo del combustible (y por ende su costo), respecto a la potencia de la máquina.

Al conocer las características del generador y como se encuentra conformada la microrred, nace la necesidad de minimizar el uso de esta fuente de generación, sobre todo en menorar el costo del combustible, que en este caso se trata de diésel. En la Tabla 9, se presenta el comportamiento del generador a distintas etapas de operación.

Tabla 9: Consumo de combustible del motor [56]

	gal/hr	L/hr
25% de carga nominal	0.30	1.34
50% de carga nominal	0.45	1.61
75% de carga nominal	0.65	2.08
100% de carga nominal	0.80	2.77

En la Figura 27, se visualiza el accionar del generador dependiendo del consumo de combustible, es decir, mientras se genera más potencia, el consumo de combustible aumenta, lo primordial, es considerar que no es de manera proporcional, por el contrario, su accionar está representado bajo una ecuación del tipo cuadrática.

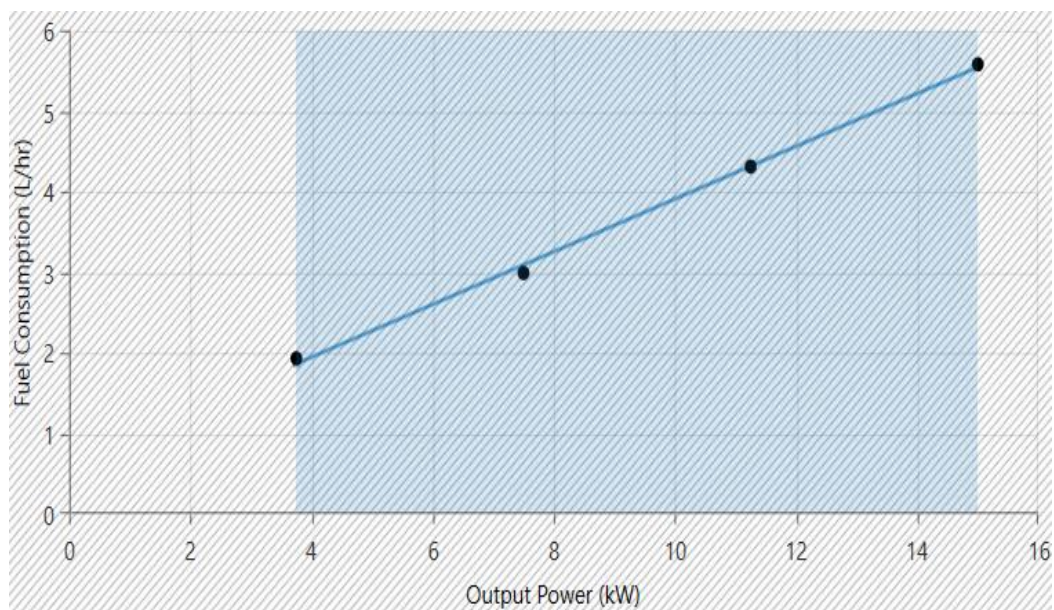


Figura 27: Curva característica consumo de combustible [56]

La eficiencia del generador (Figura 28), es del tipo logarítmica, es decir, a medida que aumenta la potencia del generador a su valor nominal, tiene un mayor aprovechamiento del combustible.

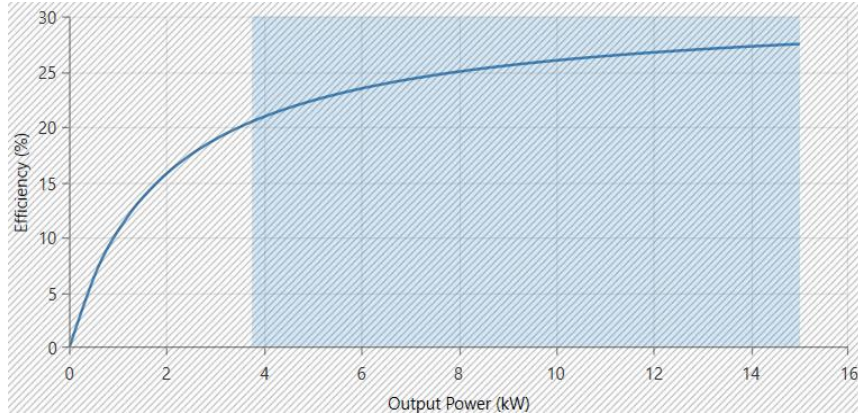


Figura 28: Eficiencia del generador [56]

El conocer estas características del generador, se puede establecer una función de costo y a la vez establecer una relación entre el combustible que ingresa con la potencia generada. De esta manera, para la ecuación 15, a base de los valores correspondientes al consumo del generador, se puede construir un sistema de ecuaciones y obtener los valores de las constantes [57].

$$1.3992 = \alpha_D + (1 \times 5)\beta_D + (1 \times 5)^2\gamma_D$$

$$1.1369 = \alpha_D + (0.75 \times 5)\beta_D + (0.75 \times 5)^2\gamma_D$$

$$0.7871 = \alpha_D + (0.50 \times 5)\beta_D + (0.50 \times 5)^2\gamma_D$$

$$0.5247 = \alpha_D + (0.25 \times 5)\beta_D + (0.25 \times 5)^2\gamma_D$$

Con este sistema de ecuaciones se resuelve, dando como resultado:

$$\alpha_D = 0.3499$$

$$\beta_D = 0.10481$$

$$\gamma_D = 0.02801$$

Con estos valores, se reemplaza en la expresión (ecuación 15) de la cantidad de combustible y permite construir un modelo para el generador diésel [57].

$$q_D(t) = 0.3499 + 0.10481P_D + 0.02801P_D^2$$

- **Límites de unidades de generación despachables**

Se asocia a los límites de las unidades de generación despachables, donde la ecuación (16) define los límites de potencia del generador a diésel, los límites de la energía no suministrada la ecuación (17) y los límites de la energía renovable de vertimiento la ecuación (18) [28].

$$P_{D_min} \leq P_D(t) \leq P_{D_max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{ENS}(t) \leq D(t) \quad (17)$$

$$0 \leq P_V(t) \leq P_S(t) + P_W(t) \quad (18)$$

- **Energía del pack modular de baterías**

Las baterías entregan energía a la microrred durante su proceso de descarga e incrementa la demanda en el proceso de carga, por esta razón es importante modelar el almacenamiento de energía en las baterías mediante las restricciones (19) y (20)

Es necesario conocer la energía del banco de baterías, esto permite conocer la condición inicial del BESS, por lo tanto, se estima conocer el valor de la energía en la primera hora [2].

La ecuación (19) representa la condición inicial de almacenamiento del pack que depende de la energía inicial E_0 de acuerdo al estado de carga de cada batería, de su eficiencia y de la potencia de carga/descarga en el tiempo $t=1$. Por otra parte, la ecuación (20) define la energía restante del horizonte de evaluación (T) el cual depende de la energía anterior E_{t-1} de cada batería del pack y de la eficiencia y potencia correspondiente en cada instante de tiempo t .

$$E(t) = E_0 + [P_B^C(t) \times \eta^C] - \left(\frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \right) \quad (19)$$

La expresión siguiente, muestra la energía calculada para un tiempo restante, donde actúa en modo descarga

$$E(t) = E_{t-1} + [P_B^C(t) \times \eta^C] - \left(\frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \right) \quad (20)$$

La energía de cada batería está limitada por su estado de salud, es decir la capacidad de almacenar y entregar energía de las baterías está representada mediante la restricción (21), donde E_{max} representa la máxima energía que cada batería puede almacenar/entregar para todo t .

$$0 \leq E(t) \leq E_{max} \quad (21)$$

- **Estado de variables binarias BESS**

La potencia de carga y descarga está limitada por la máxima energía que puede almacenar/entregar el banco de baterías, además cada límite está condicionado por una variable binaria que representa el estado de cada una de las baterías $X^C(t)$ y $X^D(t)$ en modo carga y descarga respectivamente. Las restricciones (23) y (24) representan los límites asociados a las variables binarias mientras que la restricción (22) define un solo modo de uso del pack modular de baterías a la vez [28].

$$X^C(t) + X^D(t) \leq 1 \quad (22)$$

$$0 \geq P_B^C(t) \geq -E_{max} \times X^C(t) \quad (23)$$

$$0 \leq P_B^D(t) \leq E_{max} \times X^D(t) \quad (24)$$

- **Estado de carga de las baterías**

El estado de carga (SOC) de cada batería del banco se obtiene mediante la ecuación (25) para cada instante de tiempo t . El estado de carga puede estar limitado por una política operacional de restricción del SOC presentado en la ecuación (26), donde el rango de oscilación depende del máximo y mínimo estado de carga de cada batería [60].

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_{max}} \quad (25)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (26)$$

- **Costo de uso BESS**

El costo de utilizar el banco de baterías se expresa en la restricción (27), donde el numerador representa el costo de inversión C_{I_BESS} de cada batería, mientras que el denominador indica la cantidad total de energía E_{max} durante un instante de tiempo N_{cycles} [28].

$$C_{U_BESS} = \frac{C_{I_BESS}}{E_{max} \times N_{cycles}} \quad (27)$$

Es importante recordar que la función objetivo (ecuación 13), minimiza los costos que podrían encarecer la operación del sistema, sobre todo, el consumo de diésel, de igual manera, el costo que implica el utilizar las baterías, tanto en modo carga como descarga, pues se lo considera un monto de inversión que se sigue deteriorando constantemente.

De igual manera, las restricciones son las encargadas de limitar las condiciones del sistema, el balance de potencia (ecuación 14) es la encargada de que la demanda sea abastecida por las fuentes de generación; los límites de generación (ecuación 16, 17, 18) que, dependiendo del escenario, los sistemas no puedan exceder más allá de sus características propias.

Finalmente, las baterías inicialmente tienen valor sin carga (ecuación 19), con el transcurso de un tiempo llegar a tener una carga completa (ecuación 20), sin embargo, gracias a la ecuación 23 y ecuación 24, se determina que las baterías no pueden ocupar los dos escenarios (carga y descarga) a la vez (ecuación 22).

2.5.3. Implementación del modelo de optimización

2.5.3.1. Flujograma planteado en el modelo de optimización

El código que debe ser implementado en cualquier tipo de software se fundamenta en un flujograma (Figura 29), el cual proporciona información clara y concisa. Es indispensable empezar borrando localidades de memoria, para tener la seguridad que los datos que van a ser importados (datos de demanda, potencia solar, potencia eólica) sean los reales.

Dentro de la estructura del software se debe definir las variables y los parámetros que son considerados en un problema de optimización, una vez plasmado estas sentencias, se debe inicializar todo tipo de variable, es decir, asignar un valor de inicio en el caso que no disponga. Al contar con muchos datos, se debe asignar cada uno de ellos en un string, lo que permite distribuirlos de manera rápida y óptima ocupando localidades de memoria.

De igual manera tanto la función objetivo y las restricciones, deben ser asignadas a un string, lo que ayuda a evaluar de manera simultánea cada dato en un instante de tiempo.

Continuando con el proceso (Figura 29), se realiza la optimización del problema, con la ayuda de las librerías existentes en el software, de esta manera se procede al análisis de los resultados, en caso de no cumplir con los requerimientos se procede a una nueva iteración.

2.1.1.1. Consideraciones de costos en el despacho económico

Dentro de los valores de costos que se necesita para el planteamiento de la optimización se encuentra el valor del combustible, en esta ocasión, se presenta en la Tabla 10, el costo diésel a precio internacional [61].

Tabla 10: Precio internacional del diésel [61]

Diésel	USD dólar
Galones EE.UU.	1.750 USD/gal
Litro	0.462 USD/Litro

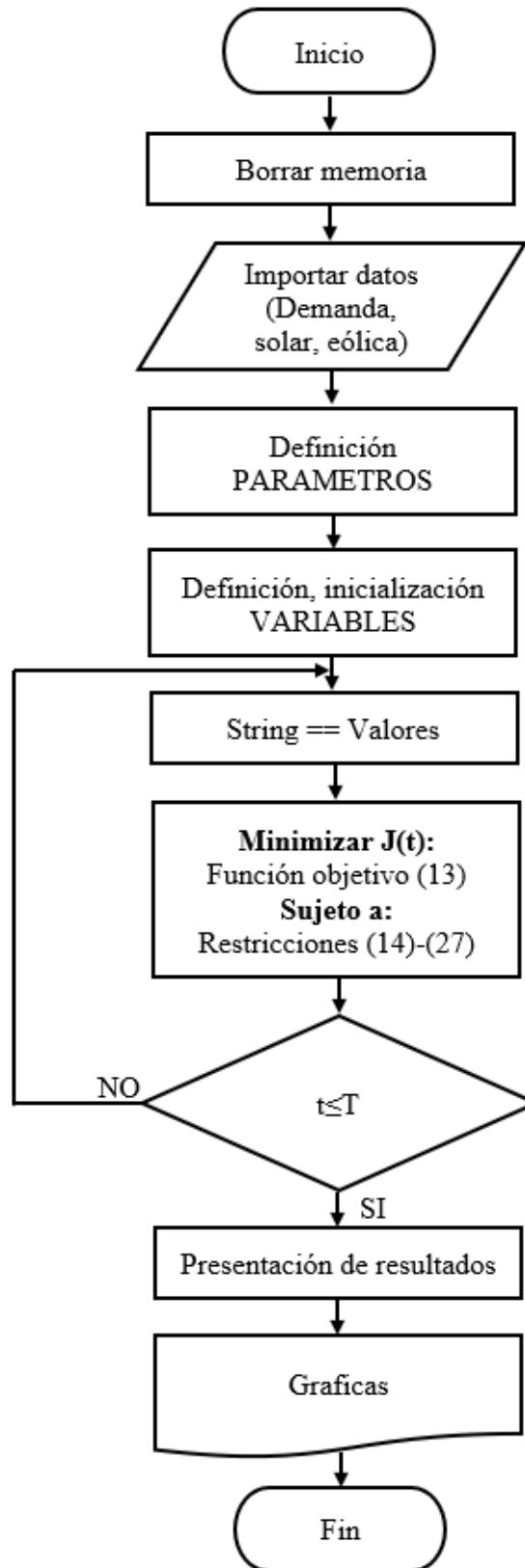


Figura 29: Flujograma de optimización en software

Referente al costo de energía no suministrada, en Ecuador será determinado por la ARCONEL, en función creciente a la magnitud de los déficits, valor que será incorporado en el estudio de costos y comunicado al CENACE. Adicionalmente, este costo permite plantear y detectar escenarios futuros con riesgo de desabastecimiento [62].

En este estudio, el costo de la energía no suministrada se considera de 3 a 10 veces el precio del KWh. Para el cálculo se considera el precio de 0.092 USD/KWh, a razón que en el caso de estudio es la única energía que tiene un costo directo, por lo tanto, el precio determinado es de \$0.92 USD/KWh.

Para el caso de las baterías se puede considerar un precio estimado alrededor de \$150 por cada batería, tomando en cuenta el número total de batería se tiene un valor de \$1500. Adicional, se determina el valor del costo de uso del BESS con la siguiente ecuación 27.

$$C_{UBESS} = \frac{1000}{2.4 \times 800} = 0.5208$$

Con estos valores, se dice que, se tiene una capacidad de almacenamiento de 2.4 KW, los que se almacenaran en 10 baterías de litio de 12V a 800 ciclos.

En la Tabla 11, se presenta los costos de operación que se deben considerar dentro del modelamiento de la microrred aislada, con la finalidad de que el algoritmo limite estas constantes y buscar la mejor respuesta.

Tabla 11: Costos de consideración para la optimización

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Costo de inversión de Baterías	C_{UBESS}	1500	USD
Costo de uso de Baterías	C_{UBESS}	0.52	USD/ciclo
Costo operación del diésel	C_D	1.75	USD/gal
Energía No Suministrada	C_{ENS}	0.92	USD/KW

2.2. Requerimientos de hardware y software

2.2.1. Hardware

Al ser un tema de investigación propuesto, el alcance del proyecto no considera validaciones de manera real. Sin embargo, se deja propuesto los equipos y/o materiales que pueden ser implementados en la estructuración de una microrred.

Por otra parte, el desarrollo de la investigación y sobre todo para la implementación de algoritmos para la obtención de resultados, se utiliza un equipo con las características mínimas siguientes (Tabla 12).

Tabla 12: Especificaciones mínimas de hardware

DESCRIPCION	CARACTERÍSTICAS
Marca	Dell
Modelo	Inspiron 5502/5509
Procesador	11th Gen Intel(R) Core (TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz-1.69 GHz
RAM instalada	8,00 GB (7,73 GB usable)
Tipo de sistema	Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64

2.2.2. Software

En el desarrollo del proyecto se utilizan varios programas computacionales, los cuales tienen distinta finalidad. Microsoft Excel 2019, al ser un programa versátil para el manejo de datos, permitió la obtención, validación y tratamiento de los datos. Es así que, se puede simplificar innumerables datos gracias a la estadística implementada.

El tener un software dedicado a la microrred permite relacionar el modelo propuesto en la investigación y el modelo establecido en el software, por esta razón, Homer PRO, gracias a su extensa librería, permite conocer los equipos existentes en el mercado, hoja de especificaciones, respuestas del equipo, costos y todo lo relacionado a una simulación de una microrred a implementarse.

En lo referente a la implementación del despacho económico propuesto, es necesario disponer de programas computacionales dedicados, en este caso se utilizó MATLAB R2020b, el cual es un entorno de programación para el desarrollo de algoritmos, análisis de datos, visualización y cálculo numérico, que se basa en un lenguaje de cálculo técnico.

Dentro de la investigación propuesta, el software a través de sus funciones, permite realizar la resolución de optimizaciones del tipo no lineales, que mediante iteraciones llegan a un valor cercano a la respuesta.

- **Lenguaje de programación**

MATLAB es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Sus prestaciones se refieren a la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, entre otros.

- **XLSREAD**

Esta función abre el nombre de archivo de una ventana de Excel, lo que permite seleccionar de forma interactiva la hoja de trabajo que se leerá y el rango de datos en esa hoja de trabajo para importar [63].

- **EVAL**

Es una función poderosa y flexible, no siempre es la mejor solución a un problema de programación. Permite la lectura y depuración de datos, así como también la implementación de funciones para programación [63].

- **OPTIMVAR**

Crea un vector de variables de optimización que pueden usar *ctr* para la indexación. El número de elementos de *x* es igual a la longitud del vector *ctr*. La orientación de *x* es la misma que la orientación de *ctr* [63].

- **QUADPROG**

Permite minimizar o maximizar una función objetivo sujeta a límites, igualdad lineal y restricciones de desigualdad. La programación cuadrática es el problema matemático de encontrar un vector *x* que minimice una función cuadrática [63].

Este solver, es dedicado para funciones objetivo lineales con restricciones cuadráticas. Es aplicado únicamente en el enfoque basado de solvers, es decir, a través de un indicador de salida 1, busca un resultado de un mínimo local. Dado que se desarrolla a través de una matriz positiva, se dice, que es de naturaleza convexa y el mínimo es un mínimo global.

Este algoritmo se basa en el método de Newton reflexivo, que sirve para la minimización de una función cuadrática de muchas variables sujetas a límites superiores e inferiores de algunas variables.

El método se aplica a un problema cuadrática general (indefinida) para la cual se requiere un minimizador local sujeto a límites y es particularmente adecuado para el problema a gran escala.

Este método exhibe fuertes propiedades de convergencia, convergencia global y de segundo orden. En el resultado se presentan puntos estrictamente factibles. Proporciona resultados experimentales en problemas moderadamente grandes y escasos basados en solucionadores lineales de gradiente conjugado y Cholesky escasos [64].

2.3. Descripción del caso de estudio

Con todo lo expuesto en este capítulo, finalmente se tiene definido todos los parámetros del problema planteado, es así que, la resolución se basa en la aplicación del despacho económico propuesto.

Para el desarrollo de la microrred, se utiliza datos reales obtenidos de la Empresa Eléctrica Quito, así como también, datos obtenidos de diferentes estaciones meteorológicas existentes en la internet, sin embargo, para tener una referencia más cerca a la realidad el lugar se ubica en las coordenadas X 771027.5 y Y 9960243.7 Zona 17S (Longitud -78.56 Latitud -0.35), en San José de Cutuglahua, ubicado en el cantón Quito de la provincia de Pichincha.

Se analizará las respuestas para un despacho económico de cada hora en diferentes horizontes de programación como es de 24 horas, 48 horas y 168 horas; lo imprescindible es conocer si abastece la demanda por parte de las fuentes de generación, dando prioridad a las fuentes renovables.

2.4. Conclusiones Capítulo II

La propuesta se desarrolla en base a la fundamentación teórica del capítulo 1, por esta razón, la propuesta de la microrred cumple con todos los requerimientos mínimos, entre ellos se encuentran varios tipos de fuentes de generación como son del tipo renovable y no renovable, un punto en común que conecta las energías renovables con un acumulador de energía, que agrupando a toda la energía disponible abastezcan la demanda solicitada.

Los valores de las variables de irradiancia, temperatura, velocidad de viento, entre otras, están dentro de un parámetro acorde a la realidad, lo que permite establecer un dimensionamiento real de los equipos y del sistema.

Todas las consideraciones descritas, permiten plantear un algoritmo de optimización, que está enfocado en el generador a combustión, es decir, minimizar el consumo de diésel, pues esta variable es la que permite reducir el costo operativo del sistema, tomando en cuenta que su función de estudio es del tipo cuadrática.

El establecer una función objetivo y sus restricciones, hacen que se pueda observar el comportamiento de una función de costos, tal es el caso, que dentro del algoritmo entra en una fase de competencia entre las energías renovables y la no renovable.

Se debe considerar que las baterías están descargadas, por lo que, empezaran a tener energía de almacenamiento al momento donde la energía renovable tenga un excedente mayoritario.

La energía eólica es escasa en el sector, por esta razón, aun si existir en gran cantidad es un recurso que se puede utilizar y que se encuentra aportando en la mayoría del día.

Los ciclos de maquina para llegar a tener una optimización conlleva un gran uso de energía, debido a que el solver utilizado, ocupa gran cantidad de memoria, sin embargo, el resultado permite administrar la energía dependiendo de la hora que se encuentre.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACION DE LA PROPUESTA

La fundamentación teórica, metodológica, el planteamiento de la propuesta, entre otros, son recursos que permiten llegar a realizar, aplicar y validar resultados, los cuales serán obtenidos de una manera experimental en la investigación. Por esta razón, la microrred aislada, los métodos de optimización, sobre todo la implementación de una optimización cuadrática da como resultado un análisis de un despacho económico donde el principal factor de análisis es el consumo de combustible en un generador a combustión, considerando que la energía renovable tiene un costo de inversión y operación nulo.

3.1. Análisis de resultados

La presentación de resultados conlleva un debate de ideas, donde se debe analizar de manera técnico-científica los efectos producidos por parte de la investigación. Para analizar las respuestas que el despacho económico mostrará, es importante, recalcar que el estudio se hace mediante datos determinísticos de las fuentes de energías renovables en torno a 24, 48 y 168 horas; así como también la demanda eléctrica.

De igual manera, para conocer el comportamiento de cada horizonte de programación se le contrasta cada uno de los casos en optimización no lineal, con respecto a otro en las mismas condiciones establecidas del tipo lineal; sin embargo, la metodología es similar con la diferencia que a nivel de programación se utiliza un solver que es aplicado justamente a programación lineal.

Los ciclos de máquina que se utiliza al ser una optimización son altos, por esta razón al utilizar el solver para la función no lineal, se requiere de una alta disponibilidad de recurso para la obtención del mejor resultado para encontrar la mejor respuesta o un mínimo local, donde se pueda verificar los resultados y conocer su respuesta en función de una reducción de costo operativo.

3.2. Resultados de diferentes horizontes de programación

3.2.1. Despacho económico no lineal para 24 horas

En este horizonte, se basa principalmente en el análisis del despacho económico de la microrred aislada, el estudio se desarrolla en un día promedio de 24 horas, donde actúan las fuentes de energía renovables, así como también un pack modular de baterías, esto con la finalidad de observar el accionar del generador a combustión donde tiene sus limitaciones, sobre todo considerando su curva característica de consumo de combustible. Bajo estas condiciones de energía renovable se tiene un aporte 54% de energía que se puede aprovechar en el transcurso del día, el generador a diésel, aporta con un 16% lo que minimiza el consumo.

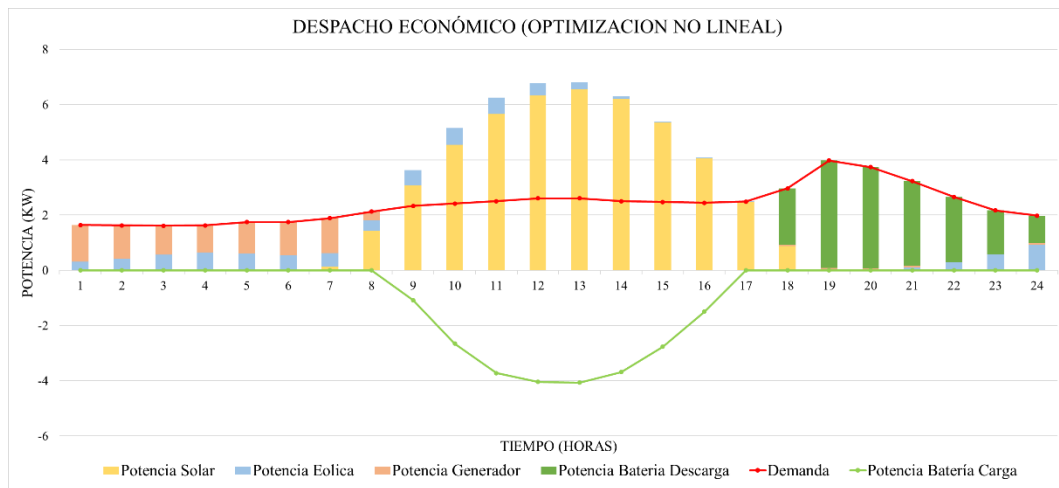


Figura 30: Despacho económico no lineal en un tiempo de 24 horas

Al considerar que la demanda bordea un promedio de 5KW (Figura 30), debe existir la suficiente generación de energía para que no exista desabastecimiento; esto se logra con el aporte de las fuentes de generación que se plantearon. El generador a combustión produce energía durante las primeras horas del día, hasta el punto, donde la energía solar suple en la totalidad a la demanda.

El pack modular empieza su ciclo de carga con la ayuda de las fuentes de energía renovable, lo que permitirá que en un tiempo sea la que abastezca. Es importante notar que el generador en su momento de encendido lo realiza de manera controlada con la finalidad que no exista un daño brusco mecánicamente.

Al existir un exceso de energía renovable, permite que la batería empiece su tema de carga, para que una vez con su totalidad de carga, pase a la etapa de generación, aportando al sistema, de esta manera permite entregar energía a partir de las 18H00, es decir, en el momento donde la energía solar empieza a perder su potencia.

El análisis del comportamiento de la batería (Figura 31), donde se expresa el porcentaje de carga de la batería, hace que, en cierta medida, se cumpla las condiciones establecidas, debido a que, se disminuye la degradación de la batería ya que se llega a una carga casi en su totalidad.

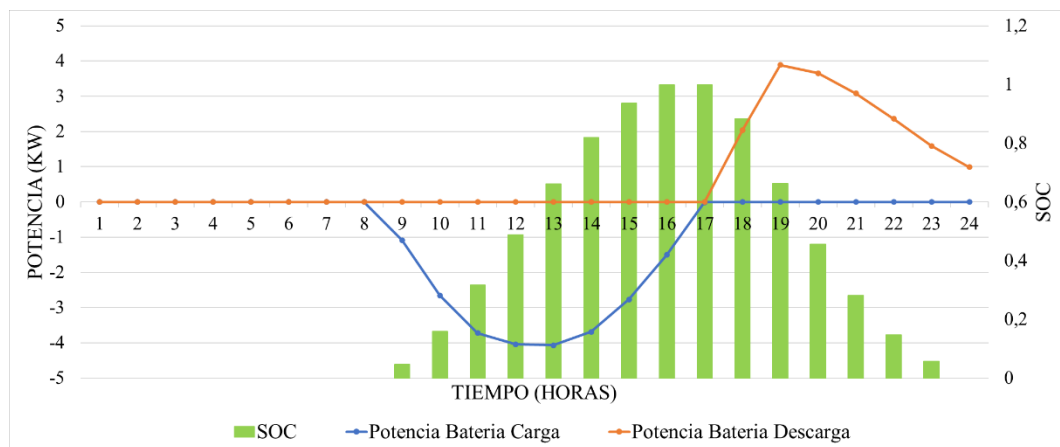


Figura 31: Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas

El dimensionamiento de la batería dentro de la microrred establecida, es un factor importante, porque el sobredimensionamiento ocasiona una inversión considerable a nivel de una perspectiva económica, quedando subutilizada y, muy por el contrario, deteriorándose acortando el periodo de vida útil.

La batería en horas de la mañana actúa como una carga dentro del sistema, pues está en el ciclo de carga, lo que se debe tener relevancia, es que la batería debe llegar a una carga casi en su totalidad para de esta manera proceder actuar como generación de energía.

Es importante considerar que, durante actúa la batería entregando energía al sistema, de cierta manera ayuda a disminuir la operación del generador a combustión, por esta razón, a partir de las 18H00 las baterías empiezan a entregar energía al sistema, permitiendo tener una producción de energía limpia hasta cierto momento donde la energía llegue a quedar desabastecida.

3.2.2. Despacho económico lineal para 24 horas

El recurso eólico desde tempranas horas del día, genera electricidad, sin embargo, este recurso es limitado, por lo que es necesario el encendido del generador a diésel, abasteciendo así la demanda. Las baterías se encuentran descargadas completamente, hasta la hora 9 donde el exceso de energía renovable permite que entre en etapa de carga.

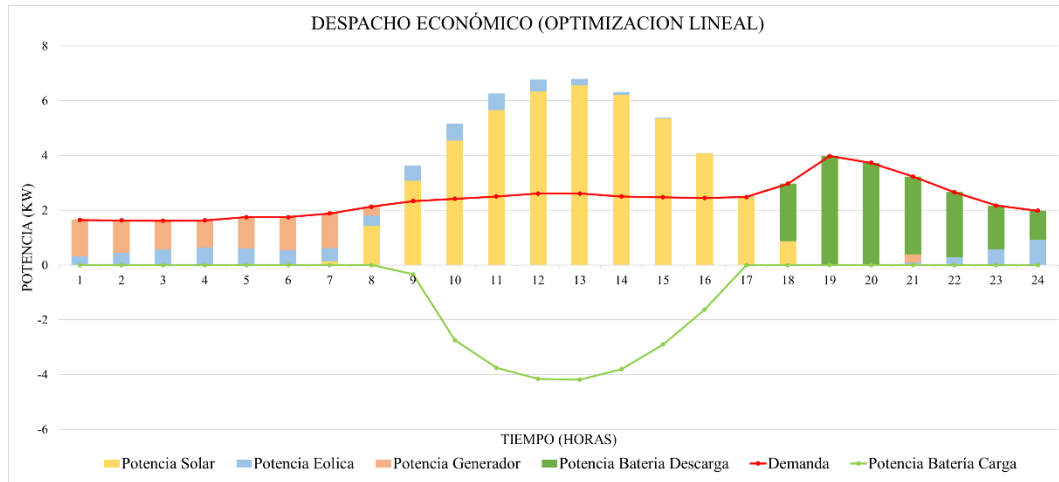


Figura 32: Despacho económico lineal en un tiempo de 24 horas

Continuando con el despacho económico lineal para 24 horas, en la Figura 32, durante todo el día donde existe recurso solar mayoritario, esto hace que las baterías se carguen siendo así una fuente de generación que empezara a partir de las 18 horas.

Sin embargo, en la hora 21, ocurre un caso particular como es el encendido del generador a diésel, que, si bien la finalidad es abastecer la demanda, permite que exista un daño mecánico pues el encendido y apagado se lo realiza de manera inesperada y brusca.

A diferencia de la respuesta no lineal, en este caso las baterías tienden a una carga de manera rápida lo que ocasiona un daño brusco al SOC de las baterías, ya que su degradación de igual manera se aumenta considerablemente.

Las energías renovables aportan en gran porcentaje a la demanda, sin embargo, el generador a diésel se encuentra en pequeñas proporciones y en una hora dando una potencia considerable.

3.2.3. Despacho económico no lineal para 48 horas

El despacho económico a más de minimizar costos en las variables ya descritas, se debe tomar en cuenta el accionar de acuerdo a la realidad, por esto, se observa en la Figura 33, que el generador aporta energía al sistema en ciertas horas del día, durante cortos intervalos de tiempo, gracias a esto ayuda a un cuidado a largo plazo del generador pues las partes mecánicas no se accionan frecuentemente, muy por el contrario entra en una etapa de funcionamiento, actúa aportando al sistema, posterior tiene una etapa de apagado.

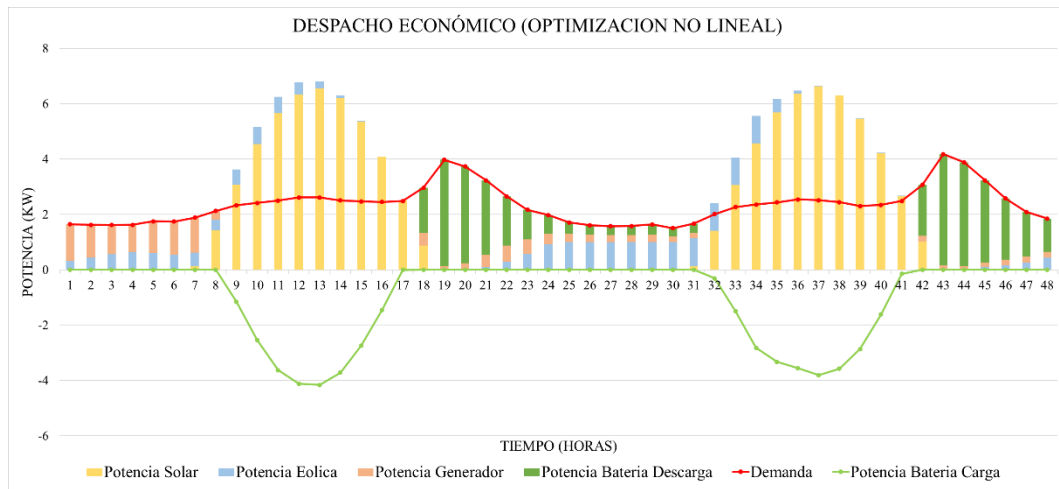


Figura 33: Despacho económico no lineal en un tiempo de 48 horas

La energía eólica en el segundo día, se visualiza que apporto al sistema con gran cantidad de energía, incluso minimiza el uso del generador y es así que permite una carga de las baterías.

Considerando que el generador actúa de manera mínima (Figura 33), es importante conocer el actuar del pack modular, el cual aporta energía al sistema. A diferencia, del caso 1, existe mayor presencia de energía de baterías, lo que minimiza el costo del consumo de combustible.

A pesar que, existe energía de las baterías, se debe considerar que es un costo indirecto, lo cual, la energía no suministrada que aunque no se pueda eliminar, es importante, al momento de un dimensionamiento para implementar un microrred.

El pack modular, en un tiempo inicial, actúa como una carga la cual empieza a captar energía, hasta el punto donde pasa a formar parte de las fuentes de generación

aportando al sistema, es notorio que abastece en la medida que dispone de energía para suplir la demanda existente.

El dimensionamiento de las baterías, debe estar acorde a que, exista una relación entre el exceso de energía renovable, para en cierta manera no se desperdicie energía renovable, o en su defecto entregar al sistema ocasionando así un equilibrio en los gastos económicos.

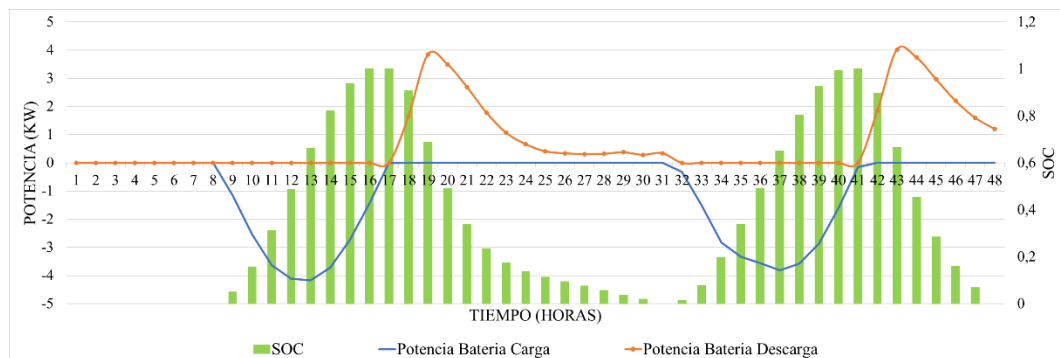


Figura 34: Ciclo de la batería en un tiempo de 48 horas

En la Figura 34, se visualiza la diferencia en el momento en que el segundo día la batería empieza en su modo carga gracias a la energía eólica existente, de esta manera, se cumple todas las condiciones necesarias, para que el sistema a más de que entregue energía a la demanda permite priorizar el uso de energías renovables.

3.2.4. Despacho económico lineal para 48 horas

La demanda que requiere el sistema en cada hora del día, es abastecida por el despacho económico, sin embargo, la optimización origina la mejor respuesta para el uso del recurso energético en un momento establecido.

En la Figura 35, es importante observar la respuesta de la batería en la hora 9, pues tiende a una respuesta rápida para llegar a tener una carga completa, de igual manera, al momento de su descarga lo hace con una respuesta rápida llegando a descargarse completamente en pocas horas.

Es relevante que, dentro del sistema, en la hora 42, el generador se enciende inesperadamente, con la finalidad de abastecer la demanda, debido a que no existe ninguna otra fuente que pueda ayudar al sistema, el comportamiento de las baterías ocasiona una aceleración de la degradación de las mismas.

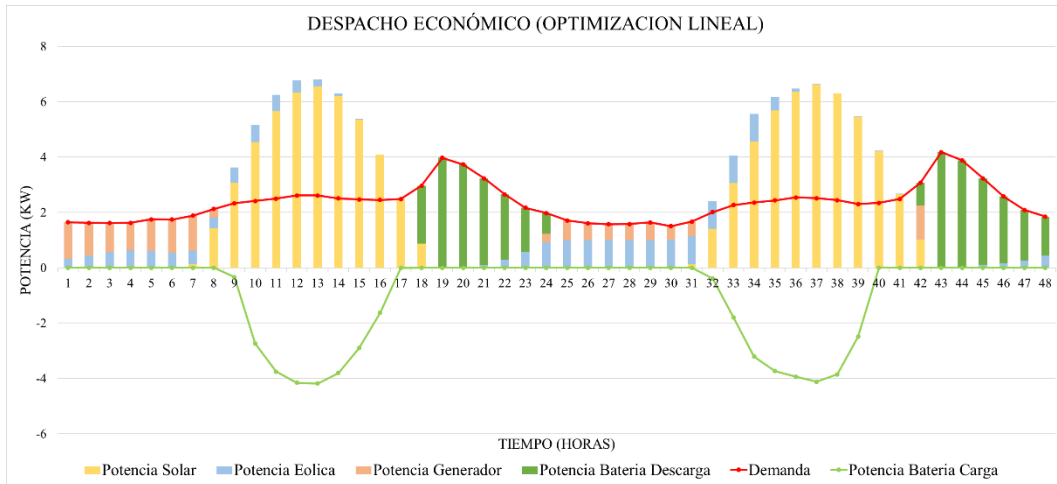


Figura 35: Despacho económico lineal en un tiempo de 48 horas

El recurso eólico junto al exceso de recurso solar, permite un costo operativo mínimo, siendo así que el generador a diésel aporte considerablemente al sistema.

3.2.5. Despacho económico no lineal para 168 horas

Después de un análisis, se debe tomar en cuenta la respuesta dentro de 168 datos (Figura 36), es decir, una semana, es importante verificar el accionar del generador a combustión que, sin duda alguna, actúa sobre todo en horas de la mañana ayudando a suplir la demanda del sistema.

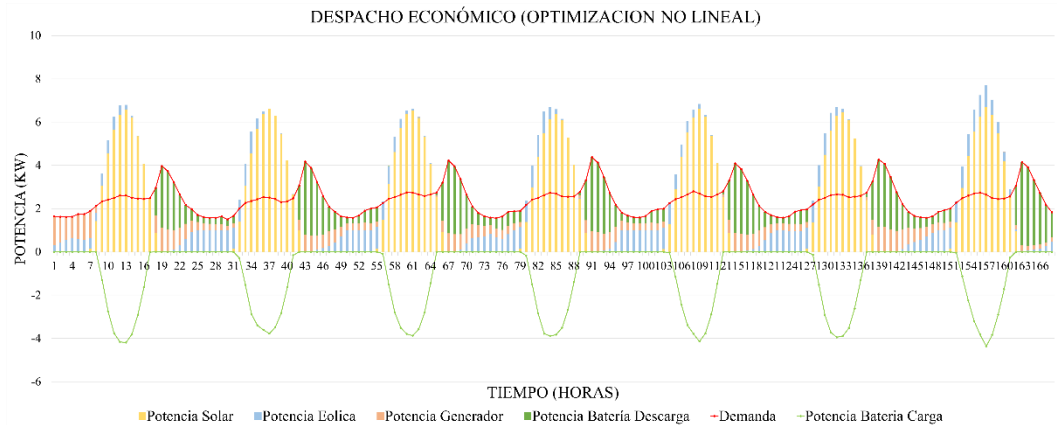


Figura 36: Despacho económico no lineal en un tiempo de 168 horas

El comportamiento de las energías renovables al ser variables que no pueden ser controladas, pues actúan de una manera externa, lo importante es aprovechar su recurso y dentro de las 168 horas se observa que están en su dimensionamiento cuasi óptimo.

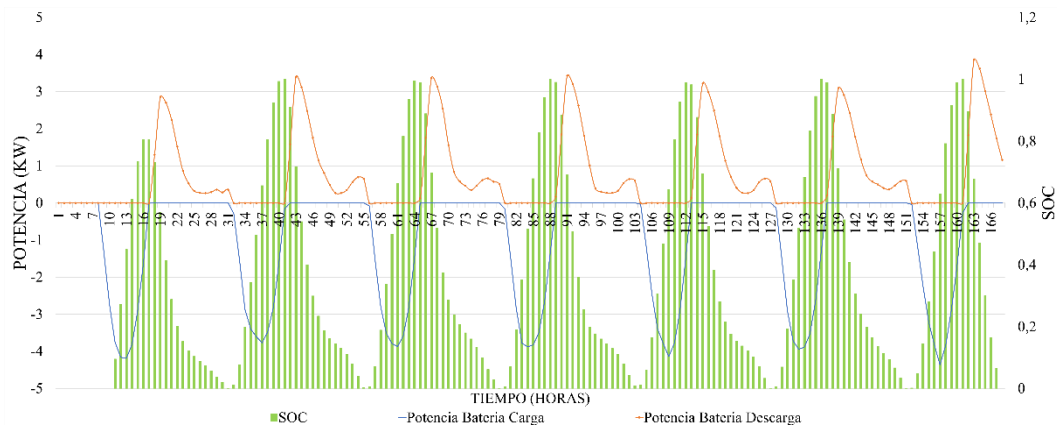


Figura 37: Ciclo de la batería en un tiempo de 168 horas

El ciclo de las baterías (Figura 37), en su etapa de carga llega a un estado completamente cargada en poco tiempo, aliviando el exceso de uso de baterías, por otro lado, en la etapa de descarga lo hace de manera más aliviada ocasionando una mejor respuesta.

3.2.6. Despacho económico lineal para 168 horas

En este caso (Figura 38), las baterías tienden a sufrir una respuesta más desgastante, debido a que en horas de la mañana el generador actúa como una respuesta no convencional dentro de un sistema.

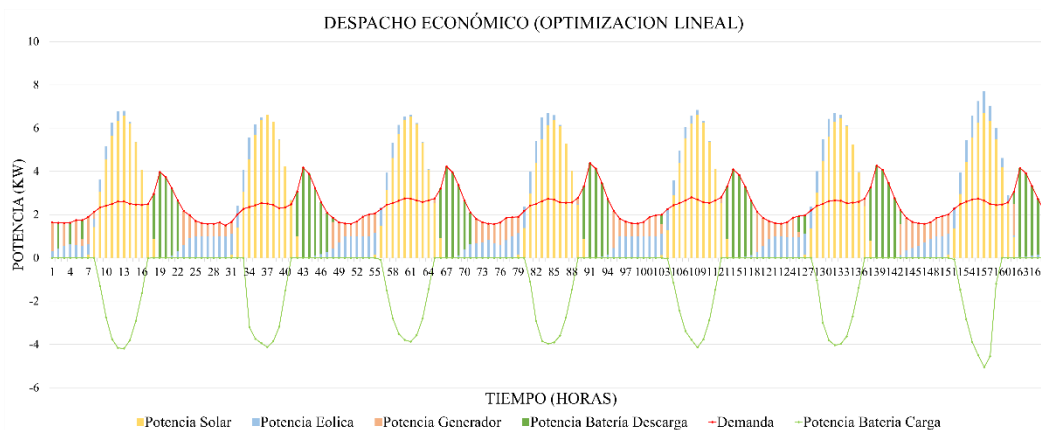


Figura 38: Despacho económico lineal en un tiempo de 168 horas

Sin embargo, durante lo restante de los días de la semana, el generador se enciende frecuentemente, siendo una respuesta rápida, por otro lado, en caso de que no existe fuentes de energías constantemente, es necesario el programar la demanda eléctrica que se requiera para el día siguiente.

3.3. Análisis de costos del despacho económico

El costo que resulta de cada uno de los horizontes propuestos, demuestra la diferencia para cada caso. El algoritmo de optimización no lineal, en su costo operativo tiene un costo menor que al lineal,

Las respuestas dadas en el despacho económico de 24 horas (Tabla 13), está bajo las mismas condiciones establecidas. Naturalmente es practico la utilización de programación lineal, sin embargo, despacho económico no lineal, si da una respuesta con un costo menor.

Tabla 13: Costo total del despacho económico no lineal y lineal

	Costo del despacho económico no lineal (USD)	Costo del despacho económico lineal (USD)
Horizonte 1 24 horas	\$45.3632	\$48.4359
Horizonte 2 48 horas	\$84.7473	\$89.6967
Horizonte 3 168 horas	\$302.8086	\$321.2856

Si bien es cierto, la operación se reduce en poco dinero, la acumulación de estas fracciones hace que bajo un análisis de tiempo se puede apreciar de mejor manera el ahorro de combustible.

El ahorro en el costo operativo en el horizonte 1 (24 horas), es de \$3.07, por esta razón el consumo de combustible es menor dando prioridad a las energías renovables, que, aunque no se tiene un valor de consideración, el ahorro en el recurso energético es importante.

3.4. Conclusiones Capítulo III

MATLAB es un procesador de datos de alto procesamiento, el optimizador que se utiliza, demanda gran cantidad de energía el mismo que procesa varias variables, a su vez que presentan un resultado que muestra el costo mínimo donde el combustible es la variable a optimizar.

La implementación de la función objetivo debe estar delimitada para el número de iteraciones a realizarle, la diferencia se denota en la cantidad de datos, es decir, procesamiento de datos de un día, semana, etc.

La curva de generación, se comporta de tal manera que, la prioridad se obtiene por las energías renovables, e incluso el banco de baterías obtiene energía en modo descarga, para en un tiempo t , empieza a entregar energía al sistema.

El banco de baterías es un componente, donde el recurso económico presenta una gran inversión, por esta razón se debe optar por dimensionar dicho equipo, con la finalidad de que la degradación que se presente sea mínima.

El generador a diésel, en los casos de optimización lineal, llega a tener un encendido inesperado, este acontecimiento permite el deterioro de la parte mecánica, debido a que existe un cambio de estado de manera brusca no acorde a las partes móviles de generador.

CONCLUSIONES GENERALES

La optimización lineal en cierta manera es practica debido a que no existe una complejidad, sin embargo, el aplicar una optimización no lineal, se necesita de mayor recurso computacional, sin embargo, el costo operativo es menor siendo un punto de inflexión en un proceso aplicativo. De todas formas, es importante seleccionar datos con el fin de obtener un resultado acorde a la realidad.

El banco de baterías en todos los casos está en un estado de carga hasta cuando disminuye la energía solar, sin embargo, el costo por el uso de la batería no es tan considerable, sin embargo, permite la respuesta del generador a diésel.

La optimización matemática al convertirse en una solución viable a varios problemas entre ellos de un despacho económico, necesita de un gran recursos y procesamiento de datos, por esta razón, el saber validar datos es importante para obtener un resultado real.

En base al objetivo planteado del trabajo de investigación, se describe una microrred aislada, la cual consta de los elementos básicos entre ellos, fuentes de generación del tipo renovable y no renovable, todas en conjunto, con la finalidad de abastecer una demanda de estudio, por lo tanto, se presenta una microrred con un sistema de gestión donde se prioriza la minimización de recursos energéticos.

Dentro del tema de investigación, las energías renovables, son consideradas que no presentan un costo directo a la función objetivo, por el contrario, el combustible se considera como el elemento principal donde su costo, debe ser manipulado a través de su consumo, ocasionando de esta manera el menor gasto económico, priorizando las energías renovables.

El valor de la energía no suministrada, depende de un análisis en el contexto nacional, lo que ocasiona que exista un gasto no considerable, pero que a su vez produce una inversión del sistema, produciendo un desperdicio de energía.

El sistema de baterías al ser una fuente de acumulación y/o generación, es el elemento más costoso dentro de la microrred, por esta razón, es necesario utilizarla de manera óptima y completa, con la finalidad de que no exista un deterioro a corto plazo.

En varias investigaciones se plantea a la función objetivo como un problema de programación lineal entera mixta, pues linealizan la curva del consumo de combustible, esto permite que se considere la curva en su totalidad y así tratarlo como un problema no lineal.

RECOMENDACIONES

La investigación se desarrolla en torno a una red aislada, pero se debería, considerar una microrred la cual este interconectada a la red principal, con el objetivo de conocer la respuesta de las energías renovables, que como se menciona es un recurso donde únicamente se considera el costo de instalación y mantenimiento.

En la función objetivo se pueden incluir variables adicionales, acordes a la realidad y ser consideradas como variables de holguras, esto con la finalidad de plantear un escenario real, sin embargo, es importante conocer y diferenciar variables con un valor fijo las cuáles pueden ser procesadas y conocer la respuesta en su optimización.

El planteamiento de utilizar energías renovables, debe plantearse en conjunto a un estudio, donde un lugar escogido pueda disponer de energía solar y/o eólica, en cantidades considerables, con el afán de abastecer la demanda. La proyección de los equipos debe estar acorde al crecimiento de la demanda eléctrica.

Es necesario plantear otros temas de estudios futuros, donde se puede plantear un despacho económico por varias metodologías, con la finalidad de conocer la respuesta y el ahorro que presenta el uso de combustible, en caso de ser necesario.

En este estudio se realizó de manera determinística, es decir, con valores ya establecidos, de igual manera se puede plantear trabajos para modelar los datos de las energías renovables, convirtiéndose de esta manera en modelos probabilísticos, lo que se puede predecir el despacho para el día siguiente.

El modelo planteado se basa en estudios ya validados, sin embargo, se puede realizar varios estudios modificando o aumentando variables dentro del modelo de optimización, con la finalidad de abarcar la mayoría de escenarios y así visualizar las respuestas de cada implementación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jornadas de Automática, Ed., *Libro de actas*. Bilbao: Publicaciones de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.
- [2] D. Jiménez, D. Ortiz-Villalba, A. Pérez, y M. E. Orchard, “Lithium-ion Battery Degradation Assessment in Microgrids”, en *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, México, nov. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ROPEC.2018.8661410.
- [3] J. L. Solano Gallegos, “Despacho económico de generación considerando pronóstico de la demanda, fuentes de energía renovables y almacenamiento de energía”, Posgrado, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 2020.
- [4] N. P. Cira Pérez, “Solución eficiente para el despacho económico basada en grafos”, Posgrado, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 2017.
- [5] C. Bordons, F. García-Torres, y L. Valverde, “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable”, *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind. RIAI*, vol. 12, núm. 2, pp. 117–132, abr. 2017, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [6] V. K. Jadoun, V. C. Pandey, N. Gupta, K. R. Niazi, y A. Swarnkar, “Integration of renewable energy sources in dynamic economic load dispatch problem using an improved fireworks algorithm”, *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, núm. 9, pp. 1004–1011, jul. 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0744.
- [7] J. L. Proaño, D. O. Villalba, D. Sáez, y D. O. Quero, “Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids”, en *2016 IEEE 36th Central American and Panamá Convention (CONCAPAN XXXVI)*, San José, Costa Rica, nov. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/CONCAPAN.2016.7942382.
- [8] R. Palma-Behnke *et al.*, “A microgrid energy management system based on the Rolling Horizon Strategy”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, núm. 2, pp. 996–1006, jun. 2016, doi: 10.1109/TSG.2012.2231440.

- [9] D. E. Olivares, J. D. Lara, C. A. Cañizares, y M. Kazerani, “Stochastic-Predictive energy management system for isolated microgrids”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, núm. 6, pp. 2681–2693, nov. 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2469631.
- [10] V. Y. Rajasekhar y G. K. Rao, “Economic load dispatch using Newton’s power flow method: (Using Inverted Jacobean Matrix)”, en *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, ago. 2017, pp. 3063–3068. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390019.
- [11] D. H. Vu, K. M. Muttaqi, A. P. Agalgaonkar, y A. Bouzerdoum, “Intra-hour and hourly demand forecasting using selective order autoregressive model”, en *2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, Australia, sep. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/POWERCON.2016.7754014.
- [12] R. Al-Nahhal, A. F. Naiem, y Y. G. Hegazy, “Economic Load Dispatch Problem using Particle Swarm Optimization Technique Considering Wind Power Penetration”, en *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Porto, Portugal, sep. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/SEST.2019.8849005.
- [13] K. Alqunun y P. A. Crossley, “Rated energy impact of BESS on total operation cost in a microgrid”, en *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, ON, Canadá, ago. 2016, pp. 292–300. doi: 10.1109/SEGE.2016.7589540.
- [14] A. Singh y K. B. Sahay, “Short-Term demand forecasting by using ANN Algorithms”, en *2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, mar. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712265.
- [15] S. Chansareewittaya, “Hybrid differential Evolutionary/Tabu search for economic dispatch and environmental dispatch”, en *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,*

Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, jul. 2018, pp. 9–12. doi: 10.1109/ECTICon.2018.8619978.

- [16] C. M. Díaz García, “Despacho económico de generación termoeléctrica usando métodos de sensibilidad AC”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18120>
- [17] S. P. Cusi Quishpe, “Despacho económico de generación multiobjetivo considerando eficiencia de Pareto en la determinación de los costos ambientales y de producción”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20726>
- [18] J. L. Pizarro Macas, “Despacho económico de potencia reactiva en un sistema de potencia usando el método de Punto Interior”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18440>
- [19] P. M. Mosquera Tello y I. Minchala Ávila, “Operación confiable de una microrred aislada con generador principal diésel, aplicando un sistema de control difuso en el deslastre de sus cargas”, Posgrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [20] P. Pérez Fernández, “Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial”, Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2017.
- [21] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, y M. Benbouzid, “Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects”, *Appl. Energy*, vol. 222, pp. 1033–1055, jul. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.
- [22] A. F. Jaya Carvajal y D. E. Lagla Chasiluisa, “Desarrollo de un modelo matemático de optimización para el despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional”, Pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2021.

- [23] A. P. Chica Gallardo y J. A. Guamán Argudo, “Modelo de estado estacionario de la microrred del laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca”, Pregrado, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2017.
- [24] C. F. Guamán Sánchez, “Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur”, Posgrado, Universidad Politécnica de Valencia, Ecuador, 2017.
- [25] Coordinación de Energías Renovables, Dirección Nacional de Promoción, y Subsecretaría de Energía Eléctrica, “Energías Renovables 2008 - Energía Eólica”, *Secretaría de Energía*, p. 11, 2008.
- [26] V. Quintero, O. Che, E. Ching, O. Auciello, y E. de Obaldía, “Baterías de ion litio: características y aplicaciones”, *Lithium Ion Batter.*, vol. 17, p. 9.
- [27] J. I. P. Valderrama y Y. M. W. Parra, “Sistema de gestión de carga para baterías de Ion-Litio”, p. 61.
- [28] D. L. J. Jiménez, “Gestión óptima de la energía de una nano-red para minimizar la degradación de un pack modular de baterías de Ion-Litio”, p. 70.
- [29] R. Iglesias *et al.*, “Modelado y simulación de una batería de Ion-Litio comercial multicelda”, p. 6.
- [30] M. J. M. Ayora, “Sistema de control heurístico basado en sistemas multi-agentes aplicado a micro-red eléctrica”, p. 47.
- [31] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. García, y N. Alguacil, *Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia*. Ciudad Real, 2002. [En línea]. Disponible en: www.gams.com
- [32] A. Ramos, P. Sánchez, J. M. Ferrer, J. Barquín, y P. Linares, *Modelos matemáticos de optimización*. Madrid: Universidad Pontificia Comillensis, 2010. [En línea]. Disponible en: http://www.doi.icaui.upcomillas.es/intro_simio.htm
- [33] B. Vitoriano y A. Ramos, “Programación matemática”, p. 303, 2010.

- [34] P. Reinoso y W. Fernando, “Despacho económico de potencia diaria aplicado al Sistema Nacional Ecuatoriano”, p. 137, 2011.
- [35] A. Núñez Jiménez, “Despachos económicos”, *Mercado y transporte de la energía eléctrica*, vol. 1. Madrid, p. 12, 2013.
- [36] P. A. Moreno Falcony, “Gestión energética mediante procesos estocásticos para la respuesta a la demanda”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2017.
- [37] “Optimización no lineal”, p. 22.
- [38] Mac Pherson, “Optimización de la unión mediante ajuste a presión”, p. 32.
- [39] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, Quinta. México: McGRAW-HILL / Interamericana de editores, S.A. DE C.V., 2010.
- [40] J. Cegarra Sánchez, *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2011. Consultado: el 6 de mayo de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.ebooks7-24.com/?il=5926>
- [41] A. González, D. Borges, y M. Martínez, “Métodos de estimación de la demanda en sistemas eléctricos de baja tensión”, p. 6.
- [42] N. González y R. Hernán, “Estudio de factibilidad de generación eléctrica mediante energía eólica y energía solar fotovoltaica para el sector de Garauzhí de la parroquia Quingeo perteneciente a la ciudad de Cuenca”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [43] A. C. Alvarado Fajardo y H. Carvajal Osorio, “Diseño, simulación y análisis, de sistema solar FV para suministro eléctrico en zonas rurales”, *Av. Investig. En Ing.*, vol. 11, núm. 1, dic. 2014, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.305.
- [44] “High Power Line SG360M”, Italy, Datasheet, jun. 2019. [En línea]. Disponible en: www.peimar.com
- [45] C. D. Petrel Higueta, “Diseño de sistema solar fotovoltaico aislado e individual en el corregimiento bocas del Atrato-Turbo”, Pregrado, Universidad de

Antioquia, Medellín, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/18523>

- [46] J. L. Gamarra Garboza, “Dimensionamiento de un sistema eólico fotovoltaico para electrificar al centro poblado Siete Techos en Reque-Chiclayo-Lambayeque”, Pregrado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú, 2019.
- [47] N. R. Flores Rivera y M. A. Domínguez Ramírez, “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio”, Posgrado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., México.
- [48] I. Montalvo y J. Cabezas, “Diseño de prototipo de aerogenerador con almacenamiento de energía, monitoreado por un sistema SCADA”, Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2011.
- [49] K. J. H. Rodríguez y M. C. G. Contreras, “Dimensionamiento e implementación de un sistema híbrido eólico-solar fotovoltaico para energía eléctrica en la institución Luis Carlos Galán de Cazucá, Soacha”, Pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2020.
- [50] “AWS HC 650W”, Australia, Datasheet. [En línea]. Disponible en: australianwindandsolar.com
- [51] R. Sánchez Hernández, “Aplicación y dimensionamiento de equipos de un sistema BESS en una central térmica”, Posgrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [52] K. A. Martínez Bravo, “Dimensionamiento óptimo de bancos de batería para microrredes conectadas al sistema de distribución de energía eléctrica, con participación en programas de respuestas de la demanda”, Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2021.
- [53] “MP250-12”.
- [54] M. Serrano Hernández, “Dimensionado de instalaciones solares fotovoltaicas aisladas”, p. 13, 2018.

- [55] C. M. Correa Posada, “Modelo de optimización para las plantas térmicas de generación de ciclo combinado en el despacho económico”, Posgrado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2009.
- [56] “Generac 10KW”.
- [57] D. M. H. Vargas, “Despacho económico y su aplicación en Microrredes Eléctricas”, p. 65.
- [58] F. Martínez Rodrigo, “Herramienta de simulación y análisis de una microrred”, Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2020.
- [59] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, y Thomas J. Overbye, *Power system analysis & design*, Fourth Edition. United States of America: Thomson Learning, 2008. [En línea]. Disponible en: https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/Power%20System%20Transient%20Analysis%20Course/Books/Power%20System%20Analysis%20and%20Design%20by%20Glover%20and%20Sarma_4thed.pdf
- [60] C. D. González, “Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis”, p. 86.
- [61] PetroEcuador, “Precios de venta en terminal para las comercializadoras”, sep. 2022.
- [62] ARCONEL, “Regulación ARCONEL 000/19”.
- [63] J. Akesson, “MPCtools 1.0 — Reference Manual”. enero de 2006.
- [64] T. F. Coleman y Y. Li, “A Reflective Newton Method for Minimizing a Quadratic Function Subject to Bounds on Some of the Variables”, *SIAM J. Optim.*, vol. 6, núm. 4, pp. 1040–1058, nov. 1996, doi: 10.1137/S1052623494240456.

ANEXOS

Anexo 1: Hoja de especificaciones panel solar

PEIMAR
ITALIAN PHOTOVOLTAIC MODULES

- QBE ASSURED ENERGY**
Product Liability - Insured QBE
- PERC TECHNOLOGY***
Passivated Emitter and Rear Cell
- 30 YEAR LINEAR POWER WARRANTY**
ANNO GARANZIA LINEARE PRODUZIONE
- 20 YEAR PRODUCT WARRANTY**
ANNO GARANZIA PRODOTTO

HIGH POWER LINE

SG360M

"MADE IN ITALY" MODULE

Peimar monocrystalline solar panels, produced using a combination of innovative production processes and advanced engineering techniques, provide customers with maximum output and super high performance. This allows fewer panels to be used to generate more energy, ideal if space is restricted or environmental conditions are challenging. Modern design and frames and a very long lifespan ensure this monocrystalline are a great option.

"Thanks to the use of PERC cells, Peimar modules are able to reach even higher efficiencies, as they facilitate the light imprisonment in close proximity to the rear surface and optimise the electron capture.

- POSITIVE POWER OUTPUT TOLERANCE**
- MODULE FIRE PERFORMANCE: CLASS I**
- ANTI-REFLECTIVE GLASS**
- HAILSTORM RESISTANCE**

CELLS

72 MONO

QTY: 72 CELLS
TYPE: MONO 5BB
PERC TECHNOLOGY
DIMENSION: 156x156 mm / 6x6"

FRAME

BACKSHEET

JUNCTION BOX

HIGH POWER LINE

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (STC)*

	SG300M
Nominal Output (Pmax)	300 W
Flash Test Power Tolerance	0-3 W
Voltage at Pmax (Vmp)	38 V
Current at Pmax (Imp)	9.48 A
Open Circuit Voltage (Voc)	46.0 V
Short Circuit Current (Isc)	10.09 A
Maximum System Voltage	1500 V
Maximum Series Fuse Rating	15 A
Module Efficiency	18.34%

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Solar Cells	72 (6x12) monocrystalline PERC
Solar Cells Size	156x156 mm / 6x6"
Front Cover	3.2 mm / 0.12" thick, low iron tempered glass
Back Cover	TPT (Tedlar-PEI-Tedlar)
Encapsulant	EVA (Ethylene vinyl acetate)
Frame	Anodized aluminium alloy, double wall
Frame finishing	Silver
Backsheet finishing	White
Diodes	3 Bypass diodes serviceable
Junction Box	IP67 rated
Connector	MCA or compatible connector
Cables Length	1100 mm / 43.3"
Cables Section	4.0 mm ² / 0.008 in ²
Dimensions	1907x992x40 mm / 75x39x1.57"
Weight	22.5 kg / 49.6 lbs
Max. Load	Certified to 5400 Pa

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

NOCT**	45±2 °C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.46 %/°C
Temperature Coefficient of Voc	-0.32 %/°C
Temperature Coefficient of Isc	0.047 %/°C
Operating Temperature	-40 °C - +80 °C

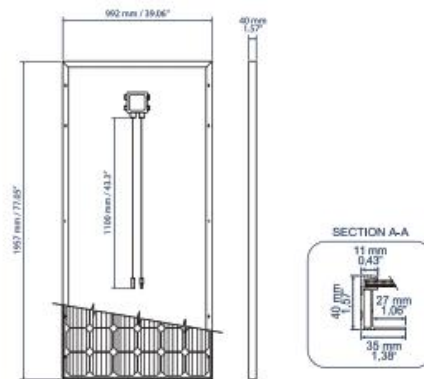
PACKAGING***

Pallet dimensions	2000x1200x1200 mm / 78x47x47"
Pieces per pallet	27
Weight	622 kg / 1371 lbs

CERTIFICATIONS

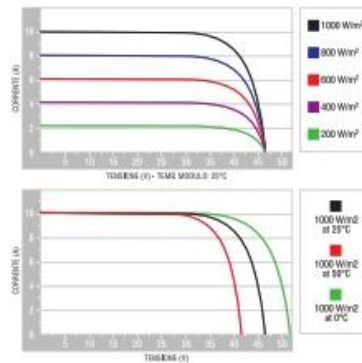
Fire Resistance Rating	1 (UNE 9177)
------------------------	--------------

DIMENSIONS



CURRENT/VOLTAGE CHARACTERISTICS

Values apply to modules: SG300M



*STC: (Standard Test Conditions) Irradiance 1000W/m²; Module Temperature 25°C; Air Mass 1.5

**NOCT: (Nominal Operating Cell Temperature) Sun 800W/m²; Air 20°C; Wind speed 1m/s

***Pallets can be stacked up to five

It is important to point out that all technical specifications, information and figures contained in this document are approximate values. Peimar reserves the right to change the technical specifications, information and figures contained in this document at any time without notice. Rev. 03/2019

PEIMAR
ITALIAN PHOTOVOLTAIC MODULES

Via Dora 13, 20121 Milano, ITALY • www.peimar.com • info@peimar.com

Anexo 2: Hoja de especificaciones aerogenerador

AUSTRALIAN
WIND AND SOLAR

1300 736 458
www.australianwindandsolar.com

AWS HC WIND TURBINE - PERFORMANCE SERIES

AWS Horizontal Control Wind Turbines have the lowest start-up speed in their class, highest efficiency, superior build quality, including cast body, carbon-fibre blades and revolutionary full body passive pitch control. AWS HC Wind Turbines can operate at full capacity in all wind conditions whilst protecting itself in extreme weather conditions. AWS HC Wind Turbines have a 20 year life expectancy.

AUSTRALIAN
WIND AND SOLAR

1300 736 458
sales@australianwindandsolar.com
australianwindandsolar.com

AWS HCP 1.5kW - PERFORMANCE SERIES



AVERAGE WIND SPEED

KMPH	M/S	MPH	MONTHLY
14.5	4.0	9	117 kWh
16	4.5	10	106 kWh
17.7	4.9	11	202 kWh
19.3	5.4	12	288 kWh

TECHNICAL SPECIFICATIONS



Rated Output	1500W
Rated Wind Speed	10.5m/s, 24mph
Peak Output	1700W
Cut In	2.7m/s, 6mph
Yaw System	Passive by Tail Vane
Yaw / Tower Cable	N x 360° Freedom
Generator	PM 3 phase alternator (variable speed)
Insulation Class & Efficiency	Class "H" > 87%
Stator Skew	1 slot pitch
Max Stator Core Temp	180°C
Poles	16
RPM—50Hz/60Hz	375 / 150
Over Speed Limit	525RPM / 70Hz
Rotor Diameter	3.2m / 11ft
Number of Blades	3
Blade Material	Carbon Fibre Composite ~ 0.37
Swept Area	9.2 sq.m / 95 sq.feet
Min Tip Clearance	28cm / 11in
Tip Speed Ratio	8.5
Lateral Thrust (max)	1200nts
Governor-Over Speed Limit	Uptilt tilt (Hydraulic assisted)
Govern Speed	27mph
Gov. Shut down speed/opt	Electro-dynamic Switch
Unit Weight (Tower Top)	34kg
Tower Top Pipe / Yaw Adapt-	P 2.5" Shd 40
Voltage Options	12 to 48 LV / 60—140 HV
Electronic Controller	Included but separate
Warranty	2 years
Operating Life	20 years
Survival Wind Speed	55 m/s
Suggested Routine	Annual inspection

Performance series

AWS HCP 1.5kW wind turbine has a 1.8kW stator, allowing this wind turbine to produce more power than the original AWS



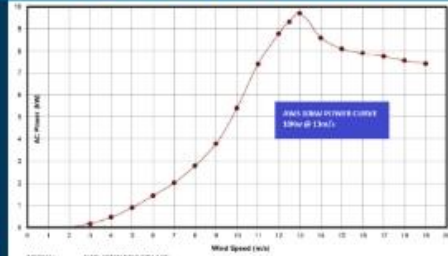
This wind turbine is not recommended for residential roof-top mounting

AWS HCM 3.3kW				AWS HCM 5kW			
							
AVERAGE WIND SPEED				AVERAGE WIND SPEED			
KMPH	M/S	MPH	MONTHLY GENERATION	KMPH	M/S	MPH	MONTHLY GENERATION
14.5	4.0	9	289 kWh	14.5	4.0	9	380 kWh
16	4.5	10	302 kWh	16	4.5	10	500 kWh
17.7	4.9	11	476 kWh	17.7	4.9	11	600 kWh
19.3	5.4	12	508 kWh	19.3	5.4	12	885 kWh
Rated Output	3300W			Rated Output	5100W		
Rated Wind Speed	10.3m/s, 24mph			Rated Wind Speed	11m/s, 25mph		
Peak Output	3050W			Peak Output	5700W		
Cut In	2.7m/s, 6mph			Cut In	2.7m/s, 6mph		
Yaw System	Passive by Tail Vane			Yaw System	Passive by Tail Vane		
Yaw / Tower Cable	N x 360° Freedom			Yaw / Tower Cable	N x 360° Freedom		
Generator	PM 3 phase alternator (variable speed)			Generator	PM 3 phase alternator (variable speed)		
Insulation Class & Efficiency	Class "H" > 87%			Insulation Class & Efficiency	Class "H" > 87%		
Stator Skew	1 slot pitch			Stator Skew	1 slot pitch		
Max Stator Core Temp	180°C			Max Stator Core Temp	180°C		
Poles	16			Poles	16		
RPM—50Hz/60Hz	375 / 450			RPM—50Hz/60Hz	375 / 450		
Over Speed Limit	525RPM / 70Hz			Over Speed Limit	525RPM / 70Hz		
Rotor Diameter	4.03m / 13ft			Rotor Diameter	5.24m / 17.2ft		
Number of Blades	3 standard (6 for extra charge)			Number of Blades	3 standard (6 for extra charge)		
Blade Material	Carbon Fibre Composite ~ 0.37			Blade Material	Carbon Fibre Composite ~ 0.37		
Swept Area	0.4 sq.m / 175 sq.feet			Swept Area	21.4 sq.m / 230 sq.feet		
Min Tip Clearance	36cm / 14in			Min Tip Clearance	36cm / 14in		
Tip Speed Ratio	8.5			Tip Speed Ratio	8.5		
Lateral Thrust (max)	3200nts			Lateral Thrust (max)	4200nts		
Governor-Over Speed Limit	Uptilt tilt (Hydraulic assisted)			Governor-Over Speed Limit	Uptilt tilt (Hydraulic assisted)		
Govern Speed	27mph			Govern Speed	27mph		
Gov. Shut down speed/opt stop	Electro-dynamic Switch			Gov. Shut down speed/opt stop	Electro-dynamic Switch		
Unit Weight (Tower Top)	77kg			Unit Weight (Tower Top)	99kg		
Tower Top Pipe / Yaw Adapter	P 2.5" shd 40			Tower Top Pipe / Yaw Adapter	P 2.5" shd 40		
Voltage Options	12 to 48 LV / 60—140 HV			Voltage Options	48 LV / 60—240 HV / 380—440 EHV		
Electronic Controller	included but separate			Electronic Controller	included but separate		
Warranty	2 years			Warranty	2 years		
Operating Life	20 years			Operating Life	20 years		
Survival Wind Speed	35 m/s			Survival Wind Speed	35 m/s		
Suggested Routine Maintenance	Annual Inspection			Suggested Routine Maintenance	Annual Inspection		

AWS HCM 10kW



POWER CURVE



MODEL: AWS HCM 10kW
 RATED POWER: 10kW @ 12m/s
 PEAK POWER: 10kW @ 12m/s
 CUT IN WIND: 1.5m/s

AVERAGE WIND SPEED

KMPH	M/S	MPH	MONTHLY GENERATION
14.5	9	4.0	660 kWh
19.3	12	5.4	1544 kWh
24	15	6.7	2266 kWh
29	18	8.0	2976 kWh

Rated Output	7700W
Rated Wind Speed	10m/s
Peak Output	10,000W
Cut In Wind Speed	1.5m/s
Cut Off Wind Speed	12m/s
Yaw System	Passive
Rotor Speed Control	Microcontroller guided
Survival Wind Speed	50m/s
Generator	3 phase synchronous generator PM outer rotor 28 pole low loss core
Rotor Diameter	3.6m
Number of Blades	3 or optional 6 blades available at additional cost
Blade Material	Titanium Alloy
Blade Height	3.2m
Swept Area	24.01m ²
Brake System	Electrodynmic
Safety System	Passive yaw steering
Governor-Over Speed Limit	Uptilt tilt (Hydraulic assisted)
Voltage Options	0 to 380VAC
Electronics	Overvoltage and safety controller Ready for grid inverter connection
Electronic Controller	Included but separate
Struts	Galvanised steel
Generator Casing	Steel / stainless steel
Warranty	5 years
Operating Life	20 years
Maintenance	Annual inspection by qualified Electrician

AWS recommends that all towers should be fitted with guy wires. AWS HC Wind Turbines are best suited for rural and commercial applications.



1300 736 458

E: sales@australianwindandsolar.com • W: australianwindandsolar.com

Anexo 3: Hoja de especificaciones baterías

MAX POWER MP250-12

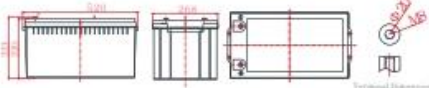


General Features

- > Nanosilica colloidal electrolyte and high tin positive plate alloy design to enhance battery performance
- > Relatively rich electrolyte, high temperature and low temperature performance is superior
- > Long cycle life, excellent deep cycle discharge ability
- > Excellent charge acceptance ability
- > Precision sealing technology
- > Long life



Dimension:520(L)×268(W)×220(H)×223(TH) Unit: mm



MP Series AGM-GEL battery

Applications

- > Solar / wind energy and other new energy storage
- > UPS/EPS
- > Power systems
- > Telecommunications system
- > Emergency lighting, Auto control system
- > Other general purpose

Specification

Nominal Voltage	12V
Nominal Capacity	250Ah
Design life	10 years
Terminal	M8
Approx. Weight	Approx 68.0kg (150.36lbs)
Container Material	ABS
Rated Capacity	250Ah 10Hour Rate (25.0A to 10.8V)
	197Ah 3Hour Rate (65.8A to 10.8V)
	160Ah 1Hour Rate (160A to 10.5V)
Internal resistance	Full charged at 25°C: 2.9 mΩ
Max. Discharge Current	3000A(5S)
Operating Temperature	Discharge: -40~60°C(-40~140°F)
	Charge: -20~50°C(-4~122°F)
	Storage: -20~50°C(-4~122°F)
Charge current:	Max. 62.5A ; Recom.25.0A
Charge Method (25 °C)	Float Charge:13.5-13.8V, recom. 13.5V(-18mV/ °C)
	Equalize charge:13.8-14.1V, recom. 14.1V(-24mV/ °C)
	Cycle charge:14.4-15.0V, recom. 14.4V(-30mV/ °C)
Self discharge	3% of capacity declined per month at 25°C

Constant Current Discharge Characteristics Unit: A (25 °C, 77 °F)

FV/Time	15min	30min	1h	2h	3h	5h	8h	10h	20h
1.60V	459	279	165	94.6	68.7	46.1	30.3	25.9	13.6
1.65V	445	274	164	94.1	67.9	45.6	30.0	25.6	13.5
1.70V	436	270	163	93.4	67.0	45.1	29.8	25.4	13.4
1.75V	421	267	160	92.0	66.3	44.7	29.5	25.1	13.4
1.80V	393	256	156	90.3	65.8	43.5	29.3	25.0	13.3
1.85V	350	233	145	85.7	61.9	41.3	28.1	24.1	13.1

Constant Power Discharge Characteristics Unit: W/cell (25 °C, 77 °F)

FV/Time	15min	30min	1h	2h	3h	5h	8h	10h	20h
1.60V	809	505	312	179	131	87.4	58.8	49.8	26.9
1.65V	794	500	309	178	129	86.9	58.3	49.3	26.7
1.70V	785	500	307	178	128	86.2	58.1	48.8	26.6
1.75V	780	498	305	177	127	85.7	57.6	48.3	26.5
1.80V	738	486	302	176	127	84.8	57.1	47.8	26.4
1.85V	659	446	281	168	121	80.9	55.2	47.0	26.1

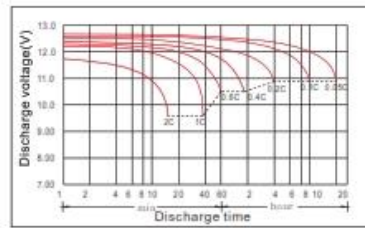
Disclaimer: Manufacturers have the right to self-modify the parameters of the product updates, please keep in touch with manufacturers to obtain the latest information.

MAX POWER[®]

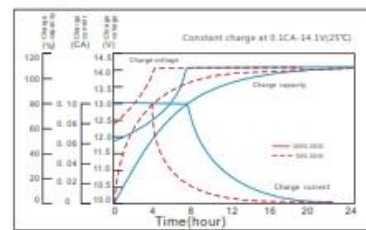
MP250-12

MP Series AGM-GEL battery

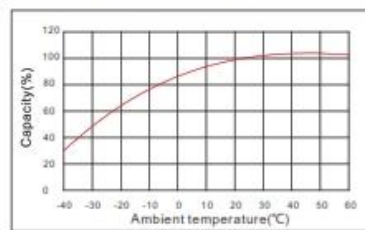
Discharge characteristic



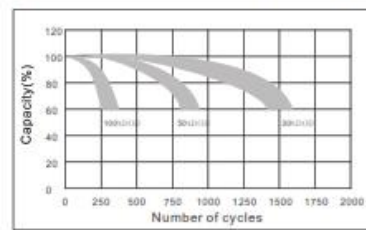
Charging characteristic



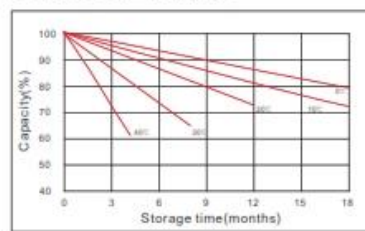
The effect of temperature on capacity



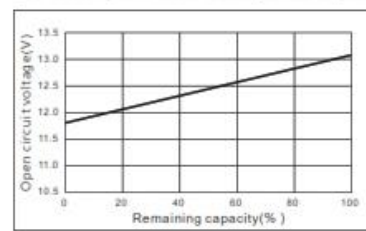
The effect of discharge depth on cycle life



Curves of self-discharge



Curves of open circuit voltage vs. capacity



Anexo 4: Hoja de especificaciones generador a combustión

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency

GENERAC | INDUSTRIAL
 POWER

Standby Power Rating
 10 kW, 13 kVA, 60 Hz

Prime Power Rating*
 9 kW, 11 kVA, 60 Hz



*EPA Certified Prime ratings are not available in the US or its Territories

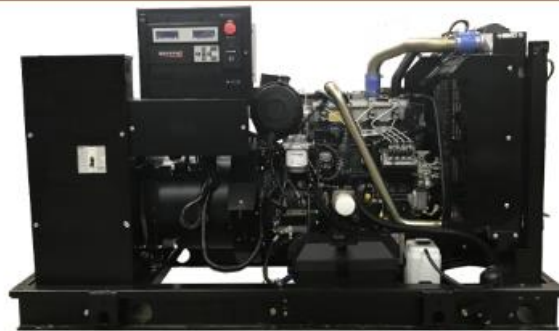


Image used for illustration purposes only

Codes and Standards

Not all codes and standards apply to all configurations. Contact factory for details.

		UL2200, UL6200, UL1236, UL489, UL142
		CSA C22.2, ULC S601
		BS5514 and DIN 6271
		SAE J1349
		NFPA 37, 70, 99, 110
		NEC700, 701, 702, 708
		ISO 3046, 7637, 8528, 9001
		NEMA ICS10, MG1, 250, ICS6, AB1
		ANSI C62.41

Powering Ahead

For over 60 years, Generac has provided innovative design and superior manufacturing.

Generac ensures superior quality by designing and manufacturing most of its generator components, including alternators, enclosures and base tanks, control systems and communications software.

Generac gensets utilize a wide variety of options, configurations and arrangements, allowing us to meet the standby power needs of practically every application.

Generac searched globally to ensure the most reliable engines power our generators. We choose only engines that have already been proven in heavy-duty industrial applications under adverse conditions.

Generac is committed to ensuring our customers' service support continues after their generator purchase.

SPEC SHEET

1 of 6

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency



STANDARD FEATURES

ENGINE SYSTEM

- Oil Drain Extension
- Air Filter Restriction Indicator
- Air Cleaner
- Level 1 Fan and Belt Guards (Open Set Only)
- Stainless Steel Flexible Exhaust Connection
- Factory Filled Oil and Coolant
- Radiator Duct Adapter (Open Set Only)
- Critical Silencer (Enclosed Units Only)
- Engine Coolant Heater

FUEL SYSTEM

- Fuel Lockoff Solenoid
- Primary Fuel Filter

COOLING SYSTEM

- Closed Coolant Recovery System
- UV/Ozone Resistant Hoses
- Factory-Installed Radiator
- Radiator Drain Extension
- 50/50 Ethylene Glycol Antifreeze

ELECTRICAL SYSTEM

- Battery Charging Alternator
- Battery Cables
- Battery Tray
- Rubber-Booted Engine Electrical Connections
- Solenoid Activated Starter Motor

ALTERNATOR SYSTEM

- UL2200 GENprotect™
- Class H Insulation Material
- 2/3 Pitch
- Skewed Stator
- Brushless Excitation
- Sealed Bearing
- Rotor Dynamically Spin Balanced
- Amortisseur Winding (3-Phase Only)
- Full Load Capacity Alternator
- Protective Thermal Switch

GENERATOR SET

- Internal Genset Vibration Isolation
- Separation of Circuits - High/Low Voltage
- Separation of Circuits - Multiple Breakers
- Wrapped Exhaust Piping
- Standard Factory Testing
- 2 Year Limited Warranty (Standby Rated Units)
- 1 Year Limited Warranty (Prime Rated Units)
- Silencer Mounted in the Discharge Hood (Enclosed Units Only)

ENCLOSURE (If Selected)

- Rust-Proof Fasteners with Nylon Washers to Protect Finish
- High Performance Sound-Absorbing Material (Sound Attenuated Enclosures)
- Gasketed Doors
- Upward Facing Discharge Hoods (Radiator and Exhaust)
- Stainless Steel Lift Off Door Hinges
- Stainless Steel Lockable Handles
- RhinoCoat™ - Textured Polyester Powder Coat Paint

FUEL TANKS (If Selected)

- UL 142/ULC S601
- Double Wall
- Normal and Emergency Vents
- Sloped Top
- Sloped Bottom
- Factory Pressure Tested
- Rupture Basin Alarm
- Fuel Level
- Check Valve In Supply and Return Lines
- RhinoCoat™ - Textured Polyester Powder Coat Paint
- Stainless Steel Hardware

CONTROL SYSTEM



Digital H Control Panel- Dual 4x20 Display

Program Functions

- Programmable Crank Limiter
- 7-Day Programmable Exerciser
- Special Applications Programmable Logic Controller
- RS-232/485 Communications
- All Phase Sensing Digital Voltage Regulator
- 2-Wire Start Capability
- Date/Time Fault History (Event Log)
- Isochronous Governor Control
- Waterproof/Sealed Connectors
- Audible Alarms and Shutdowns
- Not in Auto (Flashing Light)

- Auto/Off/Manual Switch
- E-Stop (Red Mushroom-Type)
- NFPA 110 Level I and II (Programmable)
- Customizable Alarms, Warnings, and Events
- Modbus[®] Protocol
- Predictive Maintenance Algorithm
- Sealed Boards
- Password Parameter Adjustment Protection
- Single Point Ground
- 16 Channel Remote Trending
- 0.2 msec High Speed Remote Trending
- Alarm Information Automatically Annunciated on the Display

Full System Status Display

- Power Output (kW)
- Power Factor
- kW Hours, Total, and Last Run
- Real/Reactive/Apparent Power
- All Phase AC Voltage
- All Phase Currents
- Oil Pressure
- Coolant Temperature
- Coolant Level
- Engine Speed
- Battery Voltage
- Frequency

Alarms and Warnings

- Oil Pressure
- Coolant Temperature
- Coolant Level
- Engine Overspeed
- Battery Voltage
- Alarms and Warnings Time and Date Stamped
- Snap Shots of Key Operation Parameters During Alarms and Warnings
- Alarms and Warnings Spelled Out (No Alarm Codes)

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency



CONFIGURABLE OPTIONS

ENGINE SYSTEM

- Oil Heater
- Critical Silencer (Open Set Only)
- Radiator Stone Guard
- Level 1 Fan and Belt Guards (Enclosed Units Only)

FUEL SYSTEM

- NPT Flexible Fuel Line

ELECTRICAL SYSTEM

- 10A UL Listed Battery Charger
- Battery Warmer

ALTERNATOR SYSTEM

- Anti-Condensation Heater
- Tropical Coating
- Permanent Magnet Excitation

GENERATOR SET

- Extended Factory Testing (3-Phase Only)
- 8 Position Load Center
- Pad Vibration Isolation
- Spring Vibration Isolators

CIRCUIT BREAKER OPTIONS

- Main Line Circuit Breaker
- 2nd Main Line Circuit Breaker
- Shunt Trip and Auxiliary Contact
- Electronic Trip Breakers

ENCLOSURE

- Weather Protected Enclosure
- Level 1 Sound Attenuated
- Level 2 Sound Attenuated
- Level 2 Sound Attenuated with Motorized Dampers
- Steel Enclosure
- Aluminum Enclosure
- Up to 200 MPH Wind Load Rating (Contact Factory for Availability)
- AC/DC Enclosure Lighting Kit
- Door Open Alarm Switch
- Enclosure Heater (with Motorized Dampers Only)

WARRANTY (Standby Gensets Only)

- 2 Year Extended Limited Warranty
- 5 Year Limited Warranty
- 5 Year Extended Limited Warranty
- 7 Year Extended Limited Warranty
- 10 Year Extended Limited Warranty

CONTROL SYSTEM

- NFPA 110 Compliant 21-Light Remote Annunciator
- Remote Relay Assembly (8 or 16)
- Oil Temperature Indication and Alarm
- Remote E-Stop (Break Glass-Type, Surface Mount)
- Remote E-Stop (Red Mushroom-Type, Surface Mount)
- Remote E-Stop (Red Mushroom-Type, Flush Mount)
- 100 dB Alarm Horn
- Ground Fault Annunciation
- 120V GFCI and 240V Outlets
- Remote Communication - Modem
- 10A Engine Run Relay
- Damper Alarm Contacts (with Motorized Dampers Only)

FUEL TANKS (Size On Last Page)

- 8 in (203.2 mm) Fill Extension
- 13 in (330.2 mm) Fill Extension
- 19 in (482.6 mm) Fill Extension
- Overfill Protection Valve
- 5 Gallon Spill Box Return Hose
- 5 Gallon Spill Box
- Tank Risers
- 90% Fuel Level Switch and Alarm
- 12" Emergency Vent
- Fire Rated Stainless Steel Fuel Hose
- Fuel Drop Tube

ENGINEERED OPTIONS

ENGINE SYSTEM

- Coolant Heater Isolation Ball Valves
- Fluid Containment Pan

CONTROL SYSTEM

- Spare Inputs (x4) / Outputs (x4)
- Battery Disconnect Switch

ALTERNATOR SYSTEM

- 3rd Breaker System

GENERATOR SET

- Special Testing

FUEL TANKS

- UL2085 Tank
- Stainless Steel Tanks
- Special Fuel Tanks
- Vent Extensions

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency



APPLICATION AND ENGINEERING DATA

ENGINE SPECIFICATIONS

General

Make	Perkins
EPA Emissions Compliance	Stationary Emergency
EPA Emissions Reference	See Emission Data Sheet
Cylinder #	4
Type	In-Line
Displacement - in ³ (L)	135 (2.22)
Bore - in (mm)	3.3 (84.0)
Stroke - in (mm)	3.9 (100.0)
Compression Ratio	23.3:1
Intake Air Method	Turbocharged
Cylinder Head	Cast Iron
Piston Type	Aluminum
Crankshaft Type	Forged Steel

Engine Governing

Governor	Electronic Isochronous
Frequency Regulation (Steady State)	±0.5%

Lubrication System

Oil Pump Type	Gear Driven
Oil Filter Type	Full-Flow Cartridge
Crankcase Capacity - qt (L)	9.3 (10.6)

Cooling System

Cooling System Type	Closed Recovery
Fan Type	Pusher
Fan Speed - RPM	1,980
Fan Diameter - in (mm)	18.0 (457.2)

Fuel System

Fuel Type	Ultra Low Sulfur Diesel Fuel
Fuel Specifications	ASTM
Fuel Filtering (Microns)	5
Fuel Inject Pump	Distribution Injection Pump
Fuel Pump Type	Engine Driven Gear
Injector Type	Mechanical
Fuel Supply Line - in (mm)	0.31 (7.94) ID
Fuel Return Line - in (mm)	0.19 (4.76) ID

Engine Electrical System

System Voltage	12 VDC
Battery Charger Alternator	Standard
Battery Size	See Battery Index 01E19705BY
Battery Voltage	12 VDC
Ground Polarity	Negative

ALTERNATOR SPECIFICATIONS

Standard Model	K8025124Y21
Poles	4
Field Type	Revolving
Insulation Class - Rotor	H
Insulation Class - Stator	H
Total Harmonic Distortion	<5% (3-Phase Only)
Telephone Interference Factor (TIF)	< 50

Standard Excitation	Synchronous Brushless
Bearings	Single Sealed
Coupling	Direct via Flexible Disc
Load Capacity - Standby	100%
Prototype Short Circuit Test	Yes
Voltage Regulator Type	Digital
Number of Sensed Phases	All
Regulation Accuracy (Steady State)	±0.25%

SPEC SHEET

4 of 6

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency



OPERATING DATA

POWER RATINGS

Standby		
Single-Phase 120/240 VAC @1.0pf	10 kW	Amps: 42
Three-Phase 120/208 VAC @0.8pf	10 kW	Amps: 35
Three-Phase 120/240 VAC @0.8pf	10 kW	Amps: 30
Three-Phase 277/480 VAC @0.8pf	10 kW	Amps: 15
Three-Phase 346/600 VAC @0.8pf	10 kW	Amps: 12

MOTOR STARTING CAPABILITIES (skVA)

skVA vs. Voltage Dip					
120/240 VAC 1Ø	30%	277/480 VAC 3Ø	30%	208/240 VAC 3Ø	30%
A0025044N21	12	K0025124Y21	36	K0025124Y21	26

FUEL CONSUMPTION RATES*

Fuel Pump Lift- ft (m)	Diesel - gph (Lph)	
	Percent Load	Standby
3 (1)	25%	0.7 (2.5)
	50%	0.8 (3.0)
	75%	0.9 (3.4)
	100%	1.1 (4.0)

* Fuel supply installation must accommodate fuel consumption rates at 100% load.

Total Fuel Pump Flow (Combustion + Return) - gph (Lph)	16.6 (63.0)
--	-------------

COOLING

Standby	
Coolant Flow	gpm (Lpm) 48.9 (56.2)
Coolant System Capacity	gal (L) 2.5 (9.5)
Heat Rejection to Coolant	BTU/hr (kW) 53,900 (16)
Inlet Air	cfm (m ³ /min) 2,800 (79)
Maximum Operating Ambient Temperature	°F (°C) 122 (50)
Maximum Operating Ambient Temperature (Before Derate)	See Bulletin No. 0199280550
Maximum Additional Radiator Backpressure	in H ₂ O (kPa) 0.5 (0.12)

COMBUSTION AIR REQUIREMENTS

Standby	
Flow at Rated Power - cfm (m ³ /min)	76.2 (2.2)

ENGINE

Standby	
Rated Engine Speed	RPM 1,800
Horsepower at Rated kW**	hp 15.8
Piston Speed	ft/min (m/min) 1,181 (360)
BMEP	psi (kPa) 51.7 (356.5)

EXHAUST

Standby	
Exhaust Flow (Rated Output)	cfm (m ³ /min) 110.0 (3.1)
Maximum Allowable Backpressure (Post Turbocharger)	inHg (kPa) 1.5 (5.1)
Exhaust Temperature (Rated Output)	°F (°C) 420 (215.5)

** Refer to "Emissions Data Sheet" for maximum bHP for EPA and SCADA/D permitting purposes.

Derate - Operational characteristics consider maximum ambient conditions. Derate factors may apply under atypical site conditions.
 Please contact a Generac Power Systems Industrial Dealer for additional details. All performance ratings in accordance with ISO3046, BS5514, ISO8528, and DIN6271 standards.
 Standby - See Bulletin 0187500SSB
 Prime - See Bulletin 0187510SSB

SPEC SHEET

SD010 | 2.2L | 10 kW
INDUSTRIAL DIESEL GENERATOR SET
 EPA Certified Stationary Emergency

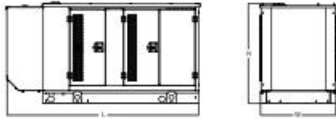


DIMENSIONS AND WEIGHTS*



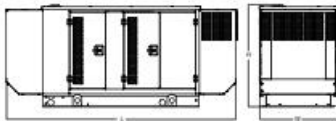
OPEN SET

Run Time - Hours	Usable Capacity - Gal (L)	L x W x H - in (mm)	Weight - lbs (kg)	
			Steel	Aluminum
No Tank	-	76.0 (1,930) x 37.4 (950) x 44.6 (1,138)	1,456 - 1,641 (661 - 745)	
49	54 (204)	76.0 (1,930) x 37.4 (950) x 57.8 (1,466)	1,936 - 2,121 (879 - 963)	
120	132 (500)	76.0 (1,930) x 37.4 (950) x 69.8 (1,773)	2,166 - 2,351 (983 - 1,067)	
172	190 (719)	76.0 (1,930) x 37.4 (950) x 79.3 (2,014)	2,380 - 2,565 (1,081 - 1,165)	
191	211 (799)	76.0 (1,930) x 37.4 (950) x 81.8 (2,078)	2,375 - 2,560 (1,078 - 1,162)	
272	300 (1,136)	92.9 (2,360) x 37.4 (950) x 85.3 (2,167)	2,438 - 2,623 (1,106 - 1,190)	



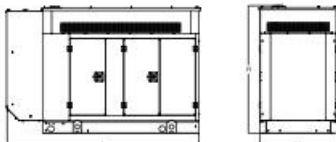
WEATHER PROTECTED ENCLOSURE

Run Time - Hours	Usable Capacity - Gal (L)	L x W x H - in (mm)	Weight - lbs (kg) Enclosure Only	
			Steel	Aluminum
No Tank	-	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 49.5 (1,258)		
49	54 (204)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 62.5 (1,588)		
120	132 (500)	106.0 (2,692) x 38.0 (965) x 84.0 (2,134)	372 (169)	241 (109)
172	190 (719)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 84.0 (2,134)		
191	211 (799)	76.0 (1,930) x 38.0 (965) x 86.5 (2,198)		
272	300 (1,136)	92.9 (2,360) x 38.0 (965) x 90.0 (2,287)		



LEVEL 1 SOUND ATTENUATED ENCLOSURE

Run Time - Hours	Usable Capacity - Gal (L)	L x W x H - in (mm)	Weight - lbs (kg) Enclosure Only	
			Steel	Aluminum
No Tank	-	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 49.5 (1,258)		
49	54 (204)	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 62.5 (1,588)		
120	132 (500)	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 74.5 (1,893)	505 (229)	338 (153)
172	190 (719)	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 84.0 (2,134)		
191	211 (799)	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 86.5 (2,198)		
272	300 (1,136)	112.5 (2,857) x 38.0 (965) x 90.0 (2,287)		



LEVEL 2 SOUND ATTENUATED ENCLOSURE

Run Time - Hours	Usable Capacity - Gal (L)	L x W x H - in (mm)	Weight - lbs (kg) Enclosure Only	
			Steel	Aluminum
No Tank	-	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 49.5 (1,258)		
49	54 (204)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 62.5 (1,588)		
120	132 (500)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 74.5 (1,893)	510 (231)	341 (155)
172	190 (719)	106.0 (2,692) x 38.0 (965) x 84.0 (2,134)		
191	211 (799)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 86.5 (2,198)		
272	300 (1,136)	94.8 (2,409) x 38.0 (965) x 90.0 (2,287)		

* All measurements are approximate and for estimation purposes only. Specification characteristics may change without notice. Please contact a Generac Power Systems Industrial Dealer for detailed installation drawings.