



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA
EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA
RENOVABLE NO CONVENCIONAL**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en
Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autores:

Jaya Carvajal Angel Fernando

Lagla Chasiluisa Diego Efrain

Tutor Académico:

M.Sc. Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo

LATACUNGA – ECUADOR

2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros **JAYA CARVAJAL ANGEL FERNANDO** y **LAGLA CHASILUISA DIEGO EFRAIN** declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL**”, siendo el M.Sc. Ing. **JIMÉNEZ JIMÉNEZ DIEGO LEONARDO** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....
Jaya Carvajal Angel Fernando
C.C. 0504025735

.....
Lagla Chasiluisa Diego Efrain
C.C. 0503154510



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL”, de **JAYA CARVAJAL ANGEL FERNANDO** y **LAGLA CHASILUISA DIEGO EFRAIN**, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, agosto 2021

El Tutor

.....
M.Sc. Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo.
C.C. 0503493702



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes **JAYA CARVAJAL ANGEL FERNANDO** y **LAGLA CHASILUISA DIEGO EFRAIN** con el título de Proyecto de titulación “**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL**”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2021

Para constancia firman:

.....
Ing. Quinatoa Caiza Carlos Ivan
C.C. 0503287864

.....
Ing. Guamán Cuenca Wilian Patricio
C.C. 0603578956

.....
Ing. Salazar Achig Edgar Roberto
C.C. 0502847619

AGRADECIMIENTO

Desde el fondo de mi corazón le agradezco a Dios por darme la fortaleza, el apoyo y su respaldo para poder terminar mi carrera. Fuiste incondicional en los momentos más difíciles de este camino, todo te lo debo a Ti.

A mis padres Miguel y Gloria que han sido la base, el fundamento en mi vida después de Dios. Reconozco que lo han entregado todo sin reservas, nunca podré pagarles lo que han hecho por mí.

A Cristian mi hermano mayor, te considero como un padre; te respeto, te admiro mucho. No me olvido que tú me diste el dinero para comprarme la laptop que tanta falta me hacía para hacer mis deberes y que aún la tengo.

A mis hermanos menores, Dennise, Benjamín, David los amo mucho, fueron mi inspiración, mi motor para no desmayar, el reto para ser un ejemplo de ustedes, aguardo la esperanza que ustedes hagan lo mismo.

A mis abuelitos Miguel y Hortensia. A mis tíos/as. Hilda, Oswaldo, Mercedes, Ramiro, Rosario, Wilson, Gladys. A mis primos Edwin, Dayana. gracias por sus oraciones, por sus rodillas. A la familia Bone-Tigse: Isaac, Mélida, Karina, Karol, Kimberly que me brindaron su cariño, apoyo y me han hecho formar parte de su familia.

A Ti Karina que fuiste un regalo que vino del cielo que hiciste de mis días los más felices, fuiste mi amiga, mi compañera, mi paño de lágrimas. En los momentos más difíciles de mi vida me apoyaste, no lo olvidaré nunca.

A mi amigo Diego Lagla compañero de tesis, mis amigos de la Universidad, Eddy Toapanta, Carlos Jami, Bryan Villacis, Jefferson Sangucho, Daniel Taco, Adrián Andagana, Marco Tipán, Ismael Alomoto.

Al Ing. Diego Jiménez e Ing. Carlos Quinatoa, quienes con sus acertadas recomendaciones supieron guiarnos en la culminación de este proyecto de Investigación.

Angel Jaya

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a YAHVEH por permitirme culminar el presente proyecto de titulación y con ello el fin de mis estudios de pregrado, expreso mis infinitos y sinceros agradecimientos a mis padres, María Chasiluisa Lagla y Edmundo Marcelo Lagla, quienes con gran esfuerzo supieron formarme como hombre de perseverancia y valores y estuvieron apoyándome en diversas dificultades.

Mi agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi que me abrió las puertas para emprender mis estudios de tercer nivel, mis sentimientos de gratitud a la Carrera de Ingeniería Eléctrica mención Sistemas Eléctricos de Potencia y los docentes que me han formado profesionalmente y con valores.

Agradezco a mis compañeros, amigos y familiares que me han ayudado y motivado a seguir adelante durante esta travesía universitaria, a mi compañero, Ángel Jaya, quien con paciencia y esmero depositó su confianza en mi persona para realizar este trabajo de titulación

Al Ing. Diego Jiménez que con su valerosa tutoría y exigencia nos ha guiado para realizar el presente trabajo de la mejor manera, de igual forma agradezco al Ing. Carlos Quinatoa por brindarnos su incondicional ayuda.

Diego Lagla.

DEDICATORIA

*“No temas, porque yo estoy contigo; no te desalientes, porque yo soy tu Dios. Te fortaleceré, ciertamente te ayudaré, sí, te sostendré con la diestra de mi justicia. He aquí, todos los que se enojan contra ti serán avergonzados y humillados; los que contienden contigo serán como nada y perecerán....
“Isaías 41: 10-11.*

“Camina con Dios y estarás condenado a un éxito rotundo en esta vida y la próxima”

**A Dios.
A mis padres Miguel y Gloria.
A mi familia**

DEDICATORIA

“Porque no nos ha dado YAHVEH espíritu de cobardía, sino de poder, de amor y de dominio propio. ... 2° Timoteo 1:7” D.C.

A mis padres María y Marcelo.

RESUMEN:

Hoy en día en los sistemas de potencia se está implementado el uso de Energías Renovables no Convencionales (ERNC) tales como la solar y la eólica con el propósito de reducir las emisiones de CO₂ producidas al generar energía eléctrica a través de plantas a base de combustibles fósiles.

Una de las desventajas al usar este tipo de energía no convencional, es la aleatoriedad de la velocidad del viento y la radiación solar, lo que hace difícil programar anticipadamente un despacho económico óptimo. Para lo cual es imprescindible la utilización de algoritmos de alta velocidad. El presente trabajo se basa en el desarrollo de un modelo matemático para la generación óptima de potencia, con el fin de minimizar costos operativos y el consumo de combustible fósil (diésel) en una Microred aislada.

El objetivo principal es el desarrollo de un modelo matemático de optimización para el despacho económico de un sistema conformado por: ERNC (solar y eólica), Generación a diésel, un Sistema de almacenamiento (Baterías) y Demanda eléctrica, que son evaluados en un periodo de tiempo de 168 horas (1 semana), para resolver este problema de optimización se utilizó Programación Lineal Entera Mixta (MILP).

El modelo matemático planteado, es evaluado por medio del programa de optimización FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE y un estudio de caso, en el cual se observa que las tecnologías de generación eléctrica cubren la demanda satisfactoriamente con los siguientes porcentajes: energía solar 60,27%, generación diésel 10,48%, BESS 26,84% y la energía eólica un 2,41%.

Palabras Clave: Microred aislada, Optimización, Despacho Económico, Energía Solar, Energía Eólica, Combustible fósil, Baterías, FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE, MILP.

ABSTRACT

THEME:

“DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL OPTIMIZATION MODEL FOR ECONOMIC DISPATCH THROUGH NON-CONVENTIONAL RENEWABLE ENERGY PENETRATION”

Authors:

Jaya Carvajal Angel Fernando

Lagla Chasiluisa Diego Efrain

Today in power systems the use of Non-Conventional Renewable Energies (NCRE) such as solar and wind is being implemented in order to reduce the CO₂ emissions produced by generating electricity through fuel-based plants fossil.

One of the disadvantages of using this type of unconventional energy is the randomness of wind speed and solar radiation, which makes it difficult to program an optimal economic dispatch in advance. For which the use of high-speed algorithms is essential. The present work is based on the development of a mathematical model for optimal power generation, in order to minimize operating costs and the consumption of fossil fuel (diesel) in an isolated Microgrid.

The main objective is the development of a mathematical optimization model for the economic dispatch of a system made up of: NCRE (solar and wind), diesel generation, a storage system (batteries) and electricity demand, which are evaluated in a period time of 168 hours (1 week), to solve this optimization problem we used Mixed Integer Linear Programming (MILP).

The mathematical model proposed is evaluated through the FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE optimization program and a case study, in which it is observed that the electricity generation technologies cover the demand satisfactorily with the following percentages: solar energy 60,27%, diesel generation 10,48%, BESS 26,84% and wind energy 2,41%.

Keywords: Isolated Microgrid, Optimization, Economic Dispatch, Solar Energy, Wind Energy, Fossil Fuel, Batteries, FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE, MILP.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los señores egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE POTENCIA** de la **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**, **Jaya Carvajal Angel Fernando, Lagla Chasiluisa Diego Efrain**, cuyo título versa “**DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO MEDIANTE PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL.**”, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma. Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer usodel presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, agosto del 2021.

Atentamente,



Mg. Emma Jackeline Herrera Lasluisa
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS UTC
C.C 0502277031



ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	El problema:.....	2
2.1.1.	Situación Problemática:	2
2.1.2.	Formulación del problema:	2
2.2.	Objeto y campo de acción.....	2
2.3.	Beneficiarios:	3
2.3.1.	Beneficiarios directos	3
2.3.2.	Beneficiarios indirectos	3
2.4.	Justificación:	3
2.5.	Hipótesis	4
2.6.	Objetivos:.....	4
2.6.1.	General:.....	4
2.6.2.	Específicos:.....	4
2.7.	Sistema de tareas.....	5
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
3.1.	Antecedentes	6
3.2.	Microrred aislada	13
3.2.1.	Características de la microrred	13
3.2.2.	Aplicación de las microrredes	14
3.2.3.	Microrredes de corriente continua	15
3.2.4.	Microrredes en corriente alterna	16
3.2.5.	Estructura y elementos de la Microrred	17
3.2.5.1.	Fuentes de energía renovable	18
3.2.5.2.	Energía fotovoltaica	19
3.2.5.3.	Energía eólica	20
3.2.6.	Fuentes de energía convencional	21
3.2.6.1.	Generador diésel.....	21
3.2.6.2.	Microturbina.....	22
3.2.7.	Sistemas de almacenamiento de energía.....	22

3.2.7.1. Bateria de Ion-litio	23
3.2.8. SOC de la Bateria	25
3.3. Técnicas de optimización para la gestión de energía en la microrred	27
3.3.1. Optimización.....	27
3.3.1.1. Función objetivo.....	27
3.3.1.2. Variables.....	27
3.3.1.3. Restricciones	27
3.4. Problema de programación lineal	30
3.4.1. Forma general de un problema de programación lineal	31
3.4.2. Método Simplex.....	33
3.5. Modelo de optimización	33
3.5.1. Etapas en el desarrollo de un modelo de optimización.....	34
3.6. Linealización de una función.....	36
3.6.1. Convexidad.....	37
3.6.2. Optimización convexa	38
3.7. Análisis de Algoritmos	39
3.7.1. Metodología.....	40
3.7.2. Reglas prácticas	41
3.7.3. Relaciones de ocurrencia	42
3.8. Aplicación del Despacho Económico a la microrred.....	42
3.8.1. Despacho económico	42
3.8.2. Despacho económico convencional.....	44
3.8.3. Despacho económico no convencional.....	45
3.9. Centrales de Generación a base de Energías Renovables.....	45
3.9.1. Generación hidráulica.....	46
3.9.2. Generación eólica	47
3.9.3. Generación Solar-fotovoltaica	48
3.10. Variables en las ERNC	49
3.10.1. Velocidad del viento	49
3.10.2. Radiación Solar.....	49

3.11. Demanda Eléctrica	50
3.11.1. Demanda eléctrica diaria	51
4. MATERIALES Y MÉTODOS	55
4.1. Métodos de investigación	55
4.2. Materiales e Instrumentos	55
4.2.1. Página web de Meteorología meteoblue (https://www.meteoblue.com/).....	55
4.2.2. Software	56
4.2.3. Datos de demanda diaria.....	57
4.2.4. Datasheets	57
4.2.5. Generación diésel.....	57
4.2.6. Artículos científicos	57
4.3. Modelo Matematico.....	57
4.3.1. Formulación Matemática	57
4.3.2. Función Objetivo	58
4.3.3. Balance de Potencia	59
4.3.4. Generación diésel.....	60
4.3.5. Consumo del diésel $q(t)$	60
4.3.6. Costos de arranque y apagado del generado diésel.....	61
4.3.7. Banco de Baterías (BESS)	61
4.3.8. Estado de carga (SOC).....	62
4.3.9. Costo de uso del BESS (C_{U_BESS})	63
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	64
5.1. Datos de demanda horaria.....	65
5.2. Generación Solar Fotovoltaica.	65
5.3. Generación Eólica.....	67
5.4. Banco de baterías (BESS).....	69
5.5. Generación a diésel.....	71
5.6. Costos de la microrred	74
5.6.1. Costos de generación diésel.....	74
5.6.2. Costo de encendido y apagado del generador diésel.	74

5.6.3. Costo de energía no suministrada (CENS)	75
5.6.4. Costos de excedente de potencia de ERNC (PSH)	75
5.6.5. Resumen de costos y parámetros	75
5.7. Resultados del Despacho Económico.	76
5.7.1. Despacho Económico realizado para el día 1 y el día 7	76
5.7.2. Análisis de carga y descarga de la batería	78
5.7.3. Análisis de Excedente de Potencia (Vertimiento)	80
5.7.4. Análisis de consumo de combustible diésel.	80
5.8. Validación de modelo matemático	82
5.8.1. Comparación de resultados 1	82
5.8.2. Comparación de resultados 2	83
5.8.3. Comparación de resultados 3	86
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
6.1. Conclusiones	87
6.2. Recomendaciones	88
7. BIBLIOGRAFÍA	89
8. ANEXOS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Diagrama de una Micro-red con base en ERNC [17].	13
Figura 3.2: Clasificación de las microrredes [18].	14
Figura 3.3. Esquema de una microrred de CC [21].	15
Figura 3.4 Esquema de una microrred de CA [21].	16
Figura 3.5. Unidades de la microrred [25].	18
Figura 3.6. Aplicación energía fotovoltaica [27].	19
Figura 3.7. Aplicación energía eólica [27].	20
Figura 3.8. Generador diésel [27].	21
Figura 3.9. Elementos de una microturbina [29].	22
Figura 3.10. Sistema de almacenamiento de energía [31].	23
Figura 3.11. Capacidad / Ciclos de descarga en función de la DoD [36].	26
Figura 3.12. Método gráfico, región solución [40].	33

Figura 3.13. Aproximación lineal de la función $y = h(x)$ [42].	37
Figura 3.14: Gráfica de una función convexa en el intervalo $[a; b]$ [44].	38
Figura 3.15. Complejidad de los algoritmos [47]	41
Figura 3.16. Curva Demanda Diaria [59].	51
Figura 3.17. Curva Residencial [59].	52
Figura 3.18. Curva Comercial [59].	53
Figura 3.19. Curva Industrial [59].	53
Figura 3.20. Curva Alumbrado Público [59].	54
Figura 4.1. Página de meteorología meteoblue	55
Figura 4.2. Entorno del programa FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.	56
Figura 5.1. Curva de demanda eléctrica diaria	65
Figura 5.2. Curva de potencia solar fotovoltaica	67
Figura 5.3. Curva de generación de potencia eólica	69
Figura 5.4. Curva de consumo del generador diésel [1]	71
Figura 5.5. Despacho de potencia para 24 horas día 1	76
Figura 5.6. Despacho de potencia para 24 horas día 7	77
Figura 5.7. Despacho de potencia para una semana (168 horas)	78
Figura 5.8. Graficas de carga y descarga del BESS para un periodo de 24 horas	79
Figura 5.9. Graficas de carga y descarga del BESS para un periodo de 168 horas	79
Figura 5.10. Vertimiento de energía.	80
Figura 5.11. Curva de Potencia vs Consumo diésel	81
Figura 5.12. Costo vs Consumo diésel	81
Figura 5.13. Despacho económico de microrred de un nodo [16].	82
Figura 5.14. Despacho económico de 48 horas que muestra el comportamiento del BESS en microrredes aisladas[10].	84
Figura 5.15. Ciclo de uso de BESS durante una semana (168 horas)[10].	85
Figura 5.16. Gestión de potencia con mayor peso solar eólica [62].	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Ejemplos típicos de cargas AC en el hogar [21].	17
Tabla 3.2. Datos técnicos de una batería de Litio para microrred [33]	25
Tabla 3.3. Expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos [38].	29
Tabla 3.4. Formulación matemática de algunos problemas de optimización [38].	30

Tabla 3.5. Parámetros de la función característica [46].....	40
Tabla 3.6. Conjuntos u órdenes de complejidad [46]	40
Tabla 3.7. Relaciones de recurrencia habituales [46]	42
Tabla 5.1. Datos de potencia estimada	64
Tabla 5.2. Datos de energía del BESS estimada.....	64
Tabla 5.3 Parámetros para dimensionar potencia solar fotovoltaica	66
Tabla 5.3 Datos potencia solar fotovoltaica	66
Tabla 5.4. Parámetros para dimensionar potencia eólica	67
Tabla 5.5. Datos de potencia eólica	68
Tabla 5.6. Datos de la Batería de litio	70
Tabla 5.7. Valores de la curva del generador diésel	71
Tabla 5.8. Valores de m y b de la curva de consumo	72
Tabla 5.9. Valores de b y c	72
Tabla 5.10. Precio internacional del diésel.....	74
Tabla 5.11. Precios de encendido y apagado del generador diésel.....	74
Tabla 5.12. Valores del BESS	75
Tabla 5.13. Costos asociados.....	75
Tabla 5.14. Datos de Demanda eléctrica	77
Tabla 5.15. Datos de aporte de potencia.....	77

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título:

Desarrollo de un modelo matemático de optimización para el despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional

Fecha de inicio:

Lunes 5 de abril del 2021.

Fecha de finalización:

Miércoles 4 de agosto del 2021

Lugar de ejecución:

Latacunga, Cotopaxi, Ecuador

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de Potencia

Proyecto de investigación vinculado:

Optimización de despacho económico en microrredes

Equipo de Trabajo:

Tutor: M.Sc. Ing. Diego Leonardo Jiménez Jiménez,

Estudiantes: Jaya Carvajal Ángel Fernando,

Lagla Chasiluisa Diego Efrain.

Área de Conocimiento:

07 ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713

Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. EL PROBLEMA:

2.1.1. Situación Problémica:

El despacho económico a través de la penetración de energía renovable no convencional asigna a las unidades de generación eólica y solar la generación óptima en cada periodo de tiempo, permitiendo minimizar el costo operativo total de una micro red aislada.

En la última década se ha incrementado de manera exponencial la utilización de las energías renovables con el fin de reducir el consumo de combustibles fósiles debido a su gran impacto ambiental y su alto costo, por lo que las energías renovables no convencionales (ERNC) como la eólica y solar son utilizadas para generación de energía eléctrica en las microrredes.

El problema del despacho económico en una micro red aislada que utiliza las ERNC (eólica y solar), es planteado de forma estocástica debido al carácter aleatorio del viento, la radiación solar y la demanda; sin embargo, a través de un adecuado pronóstico de las variables, se hace posible llevar el problema a una forma determinista y resolverlo mediante un proceso de optimización a través de una función objetivo y unas restricciones que se deben cumplir entre ellos el balance y límites de potencia, en consecuencia el problema será resuelto con Programación Lineal Entera Mixta (MILP).

En la actualidad existen pocos trabajos en nuestro país que profundicen en el estudio de optimización de despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional, aplicado en casos de estudio real en zonas rurales específicas.

2.1.2. Formulación del problema:

¿Es posible desarrollar un modelo matemático que permita optimizar un despacho económico basado en ERNC?

2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Modelo matemático de optimización para el despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional

El campo de acción para el proyecto:

330000 Ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.02 Aplicaciones Eléctricas.

30000 Ciencias Tecnológicas / 3322 Tecnología Energética/ 3322.02 Generación de Energía.

330000 Ciencias Tecnológicas / 3322 Tecnología Energética / 3322.05 Fuentes no Convencionales de Energía.

330000 Ciencias Tecnológicas / 1203 Ciencia de Los Ordenadores / 1203.26 Simulación

2.3. BENEFICIARIOS:

2.3.1. Beneficiarios directos

Estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.3.2. Beneficiarios indirectos

Estudiantes e investigadores que enfocan su estudio a las ERNC y la optimización del despacho económico en micro redes.

2.4. JUSTIFICACIÓN:

El siguiente tema es elaborado por su gran interés práctico, pues significa un aporte en el estudio de la generación de energía eléctrica a través de ERNC en las micro redes aisladas. Por lo que este proyecto está destinado al desarrollo de un modelo matemático que permita programar un despacho económico óptimo debido a que la principal desventaja de este tipo de energía es la aleatoriedad de la velocidad del viento y la radiación solar lo que hace que sea inexacta la programación anticipada del despacho económico.

La importancia de la presente investigación radicará en la búsqueda de información que permita conocer la importancia de realizar un despacho económico óptimo en una microrred aislada y las repercusiones que generan la utilización de centrales de generación eléctrica a base de hidrocarburos tales como la emisión de CO₂ a la atmosfera, por lo cual el trabajo se guiará tanto en una investigación teórica y de campo, donde se analizarán los datos reales de una zona específica como la radiación solar y la velocidad del viento, con el propósito de evaluar la eficacia del modelo matemático de optimización de despacho económico desarrollado.

La utilidad de este proyecto de investigación servirá para encontrar puntos de operación de una microrred aislada que satisfaga los aspectos técnicos y operativos al mínimo costo, con el fin de contribuir a una operación adecuada y correcta planificación de la misma. Por lo que el presente proyecto de investigación es factible de desarrollar ya que no requiere un gasto excesivo de dinero en el desarrollo del modelo matemático de optimización.

Este proyecto de investigación, nos permite aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera para usarlo en beneficio de la universidad y la sociedad.

2.5. HIPÓTESIS

Desarrollar un modelo matemático de optimización que permita resolver un problema de despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional, para de esta manera obtener los puntos de operación óptimos en el sistema que satisfagan los aspectos técnicos y operativos al mínimo costo de la micro red.

2.6. OBJETIVOS:

2.6.1. General:

Desarrollar un modelo matemático de optimización mediante penetración de energía renovable no convencional para el despacho económico de una micro red aislada.

2.6.2. Específicos:

Realizar una búsqueda de información sobre el despacho económico y su modelación matemática en el contexto de las ERNC.

Plantear un problema de optimización que permita resolver el despacho económico de una micro red aislada.

Simular y evaluar los resultados del modelo matemático mediante un estudio de caso en base a datos reales.

2.7. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
<p>Realizar una búsqueda de información sobre el despacho económico y su modelación matemática en el contexto de las ERNC.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Investigación bibliográfica de trabajos referentes a la aplicación de modelos matemáticos de optimización para el despacho económico con ERNC. - Recopilación de información técnica de las ERNC utilizadas en unas micro redes aislada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información, definición, unidades de cálculo y antecedentes referentes a modelos matemáticos de optimización en las micro redes. - Datos técnicos de una micro red aislada 	<ul style="list-style-type: none"> -Libros -Tesis, -Papers -Revistas tecnológicas -Normativas -Informes Técnicos
<p>Plantear un problema de optimización que permita resolver el despacho económico de una micro red aislada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Procesamiento de los datos obtenidos de la investigación bibliográfica. - Diseño de un modelo matemático para la optimización del despacho económico de una micro red, tomando en cuenta la función objetivo y las restricciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo matemático de optimización para calcular el despacho económico mediante la penetración de energía renovable no convencional. 	<ul style="list-style-type: none"> -Material bibliográfico -Microsoft Excel -FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE
<p>Simular y evaluar los resultados del modelo matemático mediante un estudio de caso en base a datos reales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de software para programar el modelo matemático de optimización para el despacho económico en la micro red - Realización de un estudio de caso en una zona específica. - Validación de resultados obtenidos del modelo matemático en base a datos reales del estudio de caso 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulación del modelo matemático de optimización para el despacho económico. - Obtención de datos de radiación solar, velocidad del viento y carga - Comparación los resultados obtenidos del modelo matemático de optimización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Microsoft Excel - FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE - Pagina web de meteorología (meteoble)

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

Según la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARC) en su informe de Balance Nacional de Energía Eléctrica, publica que la generación eléctrica del país está conformada por el 58,45% de centrales hidráulicas, 39,25% de centrales térmicas y apenas en un 2,3% de generación a base de energías renovables, las cuales suministran de energía eléctrica a las distintas cargas, por lo cual se ha visto necesario impulsar el aumento de generación en base de energías renovables no convencionales, para así reducir la emisión de gases de efecto invernadero producido por las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles. Además la utilización de energías renovables en los últimos años han sido una alternativa de solución para suministrar electricidad a zonas aisladas que no pueden conectarse a una red de distribución eléctrica, siendo la energía eólica y solar las más utilizadas en las micro redes, por lo cual es necesario contar con un modelo de despacho económico el cual necesariamente deberá analizar las restricciones de la micro red y la característica de los costos de las unidades de generación ya sean estas eólicas, fotovoltaicas entre otras.

Para el análisis de despacho económico mediante Penetración de Energía Renovable no Convencional existen diversos métodos que permiten determinar el costo de generación de las unidades generación Eólicas, Fotovoltaicas entre otras unidades de energías renovables, para que se pueda despachar de forma óptima la energía necesaria en una micro red. A continuación, se hablará de diversas investigaciones basadas en de despacho económico mediante Penetración de Energía Renovable no Convencional. Donde el modelo y la metodología son evaluadas por medio de un sistema de prueba.

En el año 2013 en el tema “A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy” se presenta un sistema de gestión de energía (EMS) el cual se basa en una estrategia de horizonte rodante (RH) aplicado a las micro redes en base a energías renovables. Donde cada paso de decisión puede resolver un problema de optimización con enteros mixtos basado en modelos de pronóstico. Por lo que el EMS puede proporcionar puntos de ajuste en línea para cada unidad de generación y señales para los consumidores en función de un mecanismo de gestión de la demanda (DSM). Dicho proyecto es implementado para una microrred compuesta por paneles fotovoltaicos, dos aerogeneradores, un generador diésel y un sistema de almacenamiento de energía como son las baterías. En el estudio de caso se propone un esquema de información de pronóstico coherente y un marco de comparación económica

entre el RH y el compromiso de unidad estándar (UC). Dando a conocer que los pronósticos de energía solar y eólica se basan en modelos fenomenológicos con datos actualizados [1].

Carlos Batlle publica para el Banco Interamericano de Desarrollo donde manifiesta que las nuevas fuentes de energías renovables, tales como el sol o el viento, presentan una serie de características, como la variabilidad temporal y geográfica, los cuales representan retos importantes al convertirse en una opción de suministro de energía eléctrica. Por lo que los impactos relevantes en la operación de los sistemas eléctricos, pueden ir desde requerir una mayor reserva de generación en el sistema que garantice la seguridad operativa y los cambios de la planificación de la red de transporte eléctrica. Además, se menciona que los sistemas eléctricos existentes en Latinoamérica son mayoritariamente de producción hidroeléctrica, por lo que los problemas en la integración de recursos intermitentes son menores. Sobre todo, cuando se tiene centrales hidroeléctricas con significativa capacidad de almacenamiento. Generando que la integración de las fuentes renovables ocurran sin muchos impactos relevantes en la operación. Por lo que la penetración de energías renovables plantea retos para el futuro desarrollo de la generación. Dado a su carácter disperso y distribuido, provocando que estas tecnologías planteen enormes retos para el desarrollo de las redes eléctricas, de alta y baja tensión. Al mismo tiempo, la proliferación de generación de pequeño tamaño en las redes de distribución plantea la necesidad de redefinir no sólo los procedimientos de operación de las redes, sino también los criterios de expansión de las mismas y sobre todo ello, de la regulación que los dirige [2].

En el trabajo de investigación “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable” se centra en los temas de la operación óptima de las microrredes, las cuales son conjuntos de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento de energía, aislados o conectados a una red eléctrica, que puede ser gestionada de manera coordinada para suministrar electricidad de manera fiable. Por lo que se aborda la problemática y las soluciones de control tanto para la gestión del reparto de la carga entre los distintos generadores y almacenamiento como para la integración de la microrred en el mercado eléctrico. En esta publicación se presenta los diseños de controladores para el Control Predictivo Basado en Modelo (Model Predictive Control, MPC) para casos que incluyen diversas fuentes renovables, como energía solar y eólica, respaldados con almacenamiento híbrido con hidrogeno, permitiendo gestionar el balance de energía en distintas escalas de tiempo. Presentándose así los estudios de caso de una micro red, así como los estudios de planificación para el mercado eléctrico [3].

Para Noviembre del 2015, Ángela Patricia Clavijo Reyes en su trabajo de titulación manifiesta que la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica, son procesos que se realizan a diario que permiten el avance y la sostenibilidad de las ciudades actuales, que responden a la demanda de energía que crece día a día con los avances tecnológicos y con el crecimiento de la población, lo que hace necesario encontrar nuevas formas de generación que no afecten el medio ambiente y que constituyan una fuente inagotable de recursos. Presentándose así diversos desafíos al utilizar las energías renovables como es el despacho de estas unidades, teniendo en cuenta los aspectos técnicos y comerciales de cada generador para poder entregar energía mediante una planeación periódica. Lo cual permite analizar el concepto de micro red eléctrica, en la cual se integran los generadores y los consumidores en estaciones cercanas, presentado así diversos beneficios como es la Disminución de pérdidas de potencia en la red de distribución, Mejora la capacidad de la red, Regulación de voltaje y frecuencia, Reducción las emisiones de CO₂ y la mejora de la operación y control del sistema. Para lo cual en el trabajo se plantea Modelar y simular el despacho de energía eléctrica en una micro red mediante un problema de optimización de costos tal que se maximice la utilidad total de la red [4].

En el trabajo de investigación “Despacho económico en micro redes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales” se muestran los resultados de diversas simulaciones de posibles despachos económicos para un sistema con penetración de energías renovables, tomando en cuenta las variaciones que puedan generarse de la velocidad del viento y de radiación solar en diferentes horas del día. En el artículo se realiza una prueba y se valida una metodología que ayude a minimizar el costo total de un sistema eléctrico a partir del uso del método de punto interior, donde se utiliza la función `fmincon` de MatLab. La cual ayuda a determinar diversos resultados tomando en cuenta las restricciones del sistema de potencia con una sintaxis de función lineal [5].

En el año 2017 los señores Nelson González, Carlos Cusguen, Eduardo Mojica y Fabio Pavas realizan la revisión de varias técnicas de control usadas en microrredes eléctricas, enfocados en los métodos usados para el modo de operación en modo isla de una microrred que son utilizadas mayormente en zonas rurales. Presentándose así la gestión de despacho como una estrategia de control que pueda impactar la calidad de energía del sistema de la micro red, donde es necesario asociar el concepto de capacidad de atención (Hosting Capacity), ya que dicho concepto tiene que ver con las restricciones que puede tener el sistema en cuanto a la cargabilidad dada una generación. El estudio se aplica a un caso específico, con el fin de

incrementar las estrategias sustentables en el uso de los recursos de energía eléctrica, lo cual beneficia a una zona aislada del departamento de Cundinamarca - Colombia” [6].

Los investigadores Víctor A. Gómez, Cesar Hernández & Edwin Rivas realizan un estudio en el cual analizan el modelado de una red de distribución como un mercado energético, el cual se transfirió de una estructura monopolística a un escenario de libre competencia. En este artículo evalúa el escenario de una red que hace la transición de la oferta centralizada a distribuida. Además, se comparan las características del mercado energético, como el precio y la cantidad, donde se considera la generación distribuida y centralizada, teniendo en cuenta los crecientes niveles de penetración de las energías renovables no convencionales. Donde se muestra que a medida que aumenta el nivel de penetración, el precio de la energía disminuye, aunque lentamente debido a la elasticidad precio-demanda de la energía. Concluyéndose que la estructura del mercado de la energía va cambiando debido a las nuevas tecnologías de generación de energía y generación distribuida, requiriéndose nuevos métodos que ayuden a optimizar el despacho de dichas unidades con el fin de reducir costos operativos [7].

En el año 2017 se publica el trabajo de investigación “Aplicación de Costos de Incertidumbre Analíticos de Energía Solar, Eólica y Vehículos Eléctricos en el Despacho Optimo de Potencia” realizado por los investigadores Juan Arévalo, Fabian Santos & Sergio Rivera, en el cual se declara que las fuentes de energía renovables juegan un importante rol para contrarrestar el impacto ambiental de las fuentes de energía tradicional. Así, los operadores del sistema deben contar con herramientas de análisis que le permitan incorporar estas formas de energía. Ya que en los últimos años en los sistemas eléctricos de potencia se ha empezado a incorporar recursos de energía renovable y vehículos eléctricos, los cuales introducen incertidumbre al sistema debido a la estocasticidad de los recursos primarios y los patrones de conducción de los vehículos. El principal resultado de la investigación es la aplicación de los costos analíticos de incertidumbre. Permitiendo así modificar la función de costos de un despacho económico tradicional. Concluyéndose que el modelo propuesto constituirá una alternativa de toma de decisiones que los operadores de los sistemas de potencia pueden considerar en la operación del sistema que es capaz de considerar las incertidumbres de las fuentes primarias de la energía renovable [8].

Los investigadores Jorge Alarcón, Sergio Rivera & Francisco Santamaria, analizan el efecto de las plantas de generación fotovoltaica y eólica tanto en el precio del mercado eléctrico y en el despacho de potencia cuando estas utilizan dos estrategias de negociación diferentes. Por lo que en la primera estrategia asume que las plantas en base a energías renovables compiten

libremente con las demás plantas generadoras en el mercado de energía, basados en un precio de oferta. En la segunda se prioriza el despacho de las energías renovables, para posteriormente despachar las demás unidades por orden de mérito. En lo cual se plantea un caso ideal que puede ser resuelto usando una técnica de optimización denominada “replicator dynamics”, que es una técnica basada en la teoría de juegos. Demostrando resultados que indican que, en competencia perfecta, las plantas eólicas y fotovoltaicas no logran despachar toda la potencia generada, pero esto no afectan de manera significativa la potencia y utilidad marginal de otras unidades generadoras. Por su parte, dar beneficios a las energías renovables garantiza el despacho de la potencia disponible, pero afecta la participación de otros competidores en el mercado e incrementa la utilidad marginal y el precio [9].

Los investigadores Diego Jiménez; Diego Ortiz Villalba; Aramis Pérez & Marcos E. Orchard en su trabajo de investigación declaran que el sistema de almacenamiento de energía de batería basado en iones de litio (BESS) determina un papel importante en la resolución de problemas de suministro de energía en micro redes debido a las características de rendimiento, como alta potencia, alta eficiencia, baja auto descarga y larga vida útil. En consecuencia, presentan una metodología capaz de analizar el proceso de degradación de las baterías de iones de litio BESS cuando se utilizan en una microrred. Para evaluar la degradación de BESS, es necesario realizar un despacho económico, que incorpore el uso de un BESS en las micro redes. Entendiéndose que el despacho económico es formulado como un problema de optimización (MILP) que permite al BESS abastecer la demanda eléctrica durante un período de ocho horas de autonomía energética por día [10].

En el año 2018 Jáuregui Gissela [11] formula una función objetivo con las correspondientes restricciones, lo cual permite minimizar los costos de las Redes Eléctricas inteligentes REI mediante una gestión óptima de recursos energéticos. Donde la función objetivo incluye costos de generación convencional, generación con fuentes renovables no convencionales, encendido/apagado de máquinas térmicas, almacenamiento de energía con baterías y respuesta a la demanda. Para resolver el problema matemático de despacho se desarrolla una metodología de solución basada en programación dinámica, la cual permitirá visualizar el impacto de la implementación secuencial del almacenamiento energético y la respuesta a la demanda en las redes eléctrica.

Gissela Belén Arguello Escobar en su trabajo de titulación denominado “Óptima Respuesta a la Demanda y Despacho Económico de Energía Eléctrica en Micro Redes basados en Árboles de Decisión Estocástica” el cual enfoca el estudio de las micro redes aisladas, que se conforman

específicamente por fuentes de generación eólica, solar, hidráulica con sistemas de almacenamiento de energía como son las baterías y por un grupo electrógeno (generador a diésel) como soporte. Donde se desarrolla una metodología basada en programación dinámica probabilística (PDP), permitiendo así el estudio estocástico de los recursos renovables, la respuesta a la demanda (RD) y el impacto económico que una micro red. Diseña un modelo de programación la cual tiene como función objetivo minimizar los costos de energía sujeta a sus restricciones de disponibilidad de las energías renovables como son la eólica y fotovoltaica, que permitan satisfacer una demanda diaria. Habiendo mencionado lo anterior en dicho trabajo de investigación se presenta el árbol de escenario que es el encargado de optimizar costos, basados en los datos de entrada que corresponden a la aleatoriedad del recurso a utilizarse [12].

En [13] el Sr. Jairo Jamaica analiza las características de un sistema compacto donde la generación de energía eléctrica en base de recursos renovables se encuentra cercano al consumo eléctrico, entendiéndose así que las microrredes se destacan en su operación modo "isla" o conectada con la red eléctrica pública permitiendo flujo de potencia bidireccional. El funcionamiento óptimo y económico para estos sistemas son factores importantes que se deben tener en cuenta. Por lo que la propuesta de estrategias del presente trabajo de operación se basa en el problema del flujo óptimo de potencia aplicado a una micro red conectada a la red con recursos distribuidos, la cual corresponde a un problema de minimización del costo de generación de acuerdo a las restricciones de operación y de confiabilidad del sistema considerando la posibilidad de exportación e importación de potencia de la red local.

En este trabajo de investigación [14] realizado por los investigadores Jidong Wang & Fan Yangcada, parte del sistema híbrido de energía eólica / solar / batería se analizó en detalle junto con una función objetivo que combina el costo total de propiedad y la probabilidad de pérdida de suministro eléctrico. Para resolver los problemas con no linealidad, complejidad y enorme computación desarrollaron un algoritmo mejorado de optimización de enjambres de partículas (PSO), que integra la lista de tabú para ampliar el rango de búsqueda e introduce la operación de "reinicio" y "perturbación" para mejorar la capacidad de búsqueda global. Los resultados de la simulación indican que el algoritmo propuesto es más estable y proporciona mejores resultados en la resolución de la asignación de la capacidad del sistema de energía híbrido eólico / solar / batería autónomo en comparación con el algoritmo PSO estándar.

José L. Bernal-Agustín presenta, por primera vez, un diseño triple multiobjetivo de sistemas híbridos aislados minimizando, simultáneamente, el coste total a lo largo de la vida útil de la instalación, las emisiones contaminantes (CO₂) y la carga insatisfecha. Utilizó un algoritmo

evolutivo objetivo (MOEA) y un algoritmo genético (GA) para encontrar la mejor combinación de componentes del sistema híbrido y estrategias de control. Como ejemplo de aplicación, un complejo PV-viento-diesel-hidrógeno-batería El sistema ha sido diseñado, obteniendo un conjunto de posibles soluciones (Pareto Set). Los resultados obtenidos demuestran la utilidad práctica del método de diseño desarrollado [15].

En el trabajo de investigación realizado por Jacqueline Llanos Proaño, Diego Ortiz Villalba, Doris Saez & Daniel Olivares Quero, presentan un modelado y simulación de despacho económico realizado en una microrred. En donde desarrollan un algoritmo flexible para obtener el funcionamiento óptimo de una microrred. Las simulaciones realizadas consideran dos tipos de topologías: una microrred de un nodo y una microrred radial de múltiples nodos. Además en este trabajo de investigación se indica la importancia de ingresar restricciones y tiempos de operación para el generador diésel con el propósito de disminuir los tiempos de encendido y apagado y alargar la vida útil de este. El despacho económico se formula como un problema de optimización de programación lineal de enteros mixtos[16].

3.2. MICRORRED AISLADA

Una microrred aislada es un sistema de micro energía que consta de varias fuentes de energía renovable no convencional (ERNC), un sistema de almacenamiento (Baterías), y generación convencional como generadores diésel los cuales pueden actuar como generación principal o auxiliar, para alimentar a las cargas locales [17].

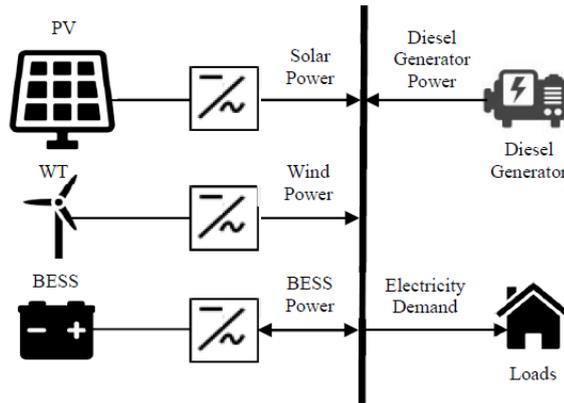


Figura 3.1: Diagrama de una Micro-red con base en ERNC [17].

3.2.1. Características de la microrred

Debido al aumento de conciencia sobre el cambio climático, y desde un punto de vista socioeconómico, las microrredes tienden a ser sistemas de energías sostenibles. En las que la principal fuente de generación es la energía renovable, acompañada de sistemas de generación eficientes [18].

Una microrred está compuesta de diferentes elementos de generación distribuida y cargas que demandan energía. La microrred generalmente está conectada a la red de suministro a través de un punto de conexión [19]. Para poder controlar, medir y alcanzar los objetivos cada unidad de generación cuenta con un sistema de electrónica de potencia, esto aparece tanto en microrredes conectadas a la red como en microrredes en modo isla [20].

En una microrred conectada a la red se puede sacar beneficio de la compra y venta de energía con la red principal. Una de las principales ventajas de una microrred es cuando aparece una perturbación en la red principal. En este caso, la microrred es capaz de pasar a modo isla para proteger los elementos de ésta. La microrred tiene la capacidad de alimentar las cargas críticas, esto se consigue a través de unos modelos de programación, los cuales se desarrollarán en los siguientes capítulos [20].

Existen diferentes criterios para clasificar una microrred. Se pueden clasificar según [18]:

- Tipo de potencia: AC/DC.
- Tipo de supervisión: la microrred puede tener un controlador central, en este caso tiene una supervisión centralizada. O puede tener un controlador local, en este caso tiene una supervisión descentralizada.
- Modo de operación: en isla o con conexión a la red.
- Aplicación: se puede dividir en uso privado (residencial, comercial o industrial) o uso público (municipal, empresa de servicio público o militar)

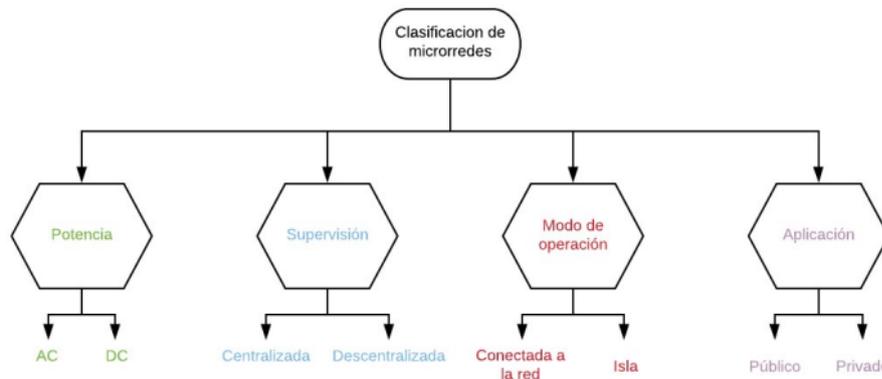


Figura 3.2: Clasificación de las microrredes [18].

La optimización de las microrredes puede realizarse mediante diferentes estrategias, las cuales se desarrollarán más adelante. Estas estrategias de optimización pretenden incrementar la eficiencia energética, la fiabilidad, reducir las pérdidas del sistema, reducir la emisión de gases contaminantes, reducir el consumo de energía y reducir el coste operacional de los elementos de generación [18].

3.2.2. Aplicación de las microrredes

Las microrredes se pueden aplicar a diferentes sectores como son el sector doméstico y sector económico.

En el sector doméstico se implementan para abastecer de energía eléctrica a las viviendas convencionales y hoy en día a las Near Zero Energy Building NZBE, más conocidas como las viviendas de consumo energético casi nulo.

Técnicamente hablando una NZEB consiste en una casa que cumpla con un nivel de eficiencia energética muy alto y un consumo de energía casi nulo, o muy bajo, el cual debe en su mayoría proceder de fuentes renovables.

En el sector económico se aplica al sector primario, secundario, terciario y cuaternario. El sector primario en el cual forman parte actividades de transformación de recursos naturales en productos primarios no elaborados, generalmente son utilizados como materia prima en otros procesos industriales.

El sector secundario abarca las actividades artesanal e industrial de la manufactura, mediante las cuales se convierte los productos del sector primario en nuevos productos. El sector terciario ofrece servicios a la sociedad tanto el campo comercial, turístico, sanitario y educativo.

Finalmente, el sector cuaternario en el que se incluye actividades especializadas de investigación, desarrollo, innovación e información

Aplicaciones adicionales son las relacionadas con la generación distribuida ya que con las microrredes se mantiene una generación continua, funcionando conjuntamente con las redes eléctricas convencionales; de igual manera se puede generar solo en punta ya que el precio de la energía es alto en este período.

3.2.3. Microrredes de corriente continua

La corriente continua (CC) se usa en sistemas de distribución de la industria para alimentar cargas electrónicas de alta sensibilidad, en las infraestructuras de telecomunicaciones y transmisiones punto a punto para largas distancias, un esquema se presenta en la figura siguiente

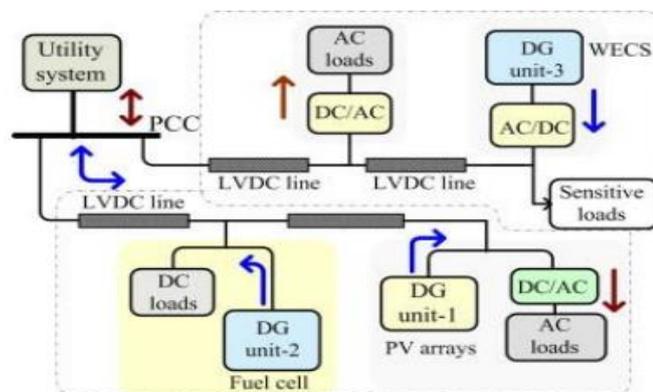


Figura 3.3. Esquema de una microrred de CC [21].

En muchos casos la energía producida por generadores de corriente continua debe convertirse en corriente alterna para sincronizarse con la red eléctrica convencional y ésta nuevamente en CC para algunas aplicaciones; estas conversiones implican pérdidas de energía [22].

La red de distribución en corriente continua aumenta la eficiencia en lo referente a la entrega de energía a la red de distribución y una mejor calidad de la energía.

Aunque también las redes de CC presentan problemas como la sincronización de los generadores, de igual manera hay problemas en las elevadas corrientes de arranque de transformadores, motores y generadores.

Se determina algunas ventajas del uso de microrredes de CC como bajas pérdidas, la no existencia de potencia reactiva ni corrección del factor de potencia, la falta de armónicos y no se necesita cambiar los conductores en algunos casos. Por otro lado, también existen desventajas como el uso de sistemas de protección más complejos, no hay puntos de cruce por cero y se necesitan niveles de tensión más altos.

3.2.4. Microrredes en corriente alterna

Una de las principales características de las microrredes de Corriente Alterna (CA), es la conexión directa con la red eléctrica convencional [23]. La ventaja principal es la alimentación eléctrica a las cargas en forma directa, considerando también que el acoplamiento de una microrred de CA es menos costoso en términos económicos ya que se requiere un menor tamaño de convertidor AC-DC, para manejar los flujos de energía entre la red de suministro eléctrico y la red de corriente continua, esto se puede visualizar en la siguiente figura.

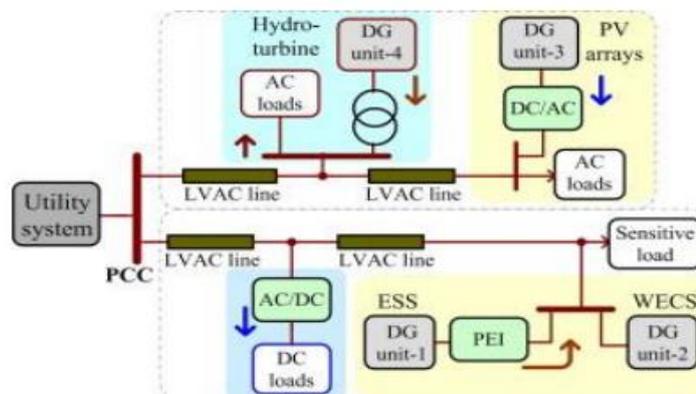


Figura 3.4 Esquema de una microrred de CA [21].

En condiciones normales el funcionamiento de una microrred de CA, consiste en alimentarse de fuentes locales si la demanda de potencia de carga es menor que la potencia producida por las unidades de generación de la microrred, considerando también que el exceso de energía puede ser exportada al sistema principal.

En la siguiente tabla se presenta algunos ejemplos de cargas típicas alimentadas por CA en el campo del hogar

Tabla 3.1. Ejemplos típicos de cargas AC en el hogar [21].

Ítem	Cargas de CA	Rangos de voltaje (V)	Rangos de corriente (A)	Rangos de potencia
1	Horno microondas	240	-	8,3 KW
2	Lava vajillas	120	11	-
3	Tostadora	120	-	1050 W
4	Cafetera	120	-	1100W
5	Secadora de ropa	240	-	5600 W
6	Cocina eléctrica	240	-	8,8 W
7	Refrigerador	120	8,3	-
8	Lavadora de ropa	120	7	-

En la mayoría de los casos las microrredes de CA funcionan a voltajes y frecuencias aplicados en la mayoría de los sistemas de distribución convencionales ya que estos tienen una gran flexibilidad.

Por lo tanto, se recalca que las microrredes de CA basadas en fuentes de energías renovables y no renovables, son de gran aplicación en áreas remotas, edificios, industria, de tal manera que se asegura el suministro de energía mejorando la eficiencia y confiabilidad en la infraestructura del sistema eléctrico.

3.2.5. Estructura y elementos de la Microrred

Los sistemas tradicionales de producción de energía tienen una estructura definida en la que sus elementos se pueden considerar generadores, que son los encargados de suministrar energía,

el sistema de transmisión de energía y el sistema de distribución, que se encarga de satisfacer la demanda de las cargas. Este modelo está cambiando a un sistema que es capaz de generar y consumir su propia energía [24].

La arquitectura de las microrredes puede variar, normalmente incluyen fuentes de energía renovable, fuentes de energía controlables y sistemas de almacenamiento de energía. Las microrredes pueden estar conectadas a la red principal de suministro u operar de modo aislado.

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

La estructura de la microrred que se va a estudiar en este Trabajo de Fin de Grado está compuesta por turbina eólica, una planta fotovoltaica, una microturbina, un generador diésel y un sistema de almacenamiento de energía

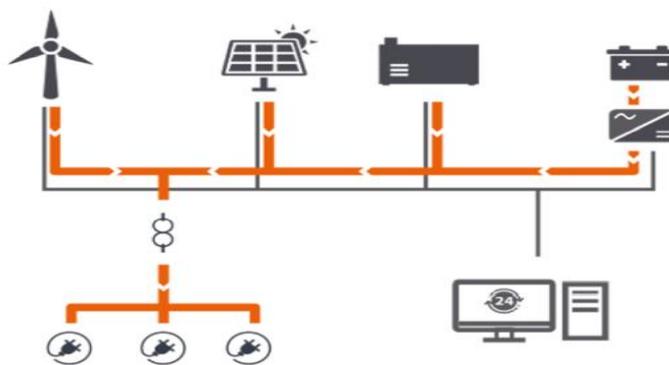


Figura 3.5. Unidades de la microrred [25].

Entre las tecnologías más utilizadas en las microrredes se encuentran las fuentes de energía renovable, las fuentes de energía convencional y los elementos de almacenamiento.

3.2.5.1. Fuentes de energía renovable

Son las fuentes de energía que se obtienen de recursos naturales renovables, que no emiten emisiones de gases contaminantes y que producen energía de forma indefinida e inagotable. Son fuentes de energía variables ya que dependen de las condiciones meteorológicas. Algunos tipos de fuentes de energía renovable pueden ser la energía fotovoltaica, eólica, hidráulica o termosolar entre muchas otras. En este Trabajo de Fin de Grado se va a considerar solo la energía fotovoltaica y la energía eólica.

3.2.5.2. Energía fotovoltaica

Se obtiene por la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica. 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.

Cuando se conecta un hilo entre las dos capas del semiconductor, los electrones energizados circulan y crean una corriente eléctrica [26].

Actualmente es la tecnología menos contaminante puesto que es sencilla y no necesita de combustibles, únicamente necesita radiación solar.



Figura 3.6. Aplicación energía fotovoltaica [27].

La tecnología de la energía renovable se basa en agrupar diferentes celdas fotovoltaicas para generar energía eléctrica. Una de las ventajas de la energía fotovoltaica es que es modular, por lo tanto, se pueden agrupar diferentes módulos según el tamaño del sistema deseado. Esta energía eléctrica tiene varios usos:

- Suministro de energía a una microrred
- Inyección de energía eléctrica en las redes eléctricas.
- Aplicaciones específicas como puede ser suministrar energía a un satélite o recarga de vehículos eléctricos.

Los aspectos a tener en consideración en el momento del diseño de la microrred son los siguientes[26] :

- Geometría solar: hay que considerar la ubicación de la instalación fotovoltaica

- **Inclinación y orientación de los paneles:** es necesario una correcta instalación de la planta fotovoltaica teniendo en cuenta la inclinación y orientación de los paneles, para no perder así eficiencia o que los paneles creen sombras entre sí.
- **Componentes:** es importante la adecuada elección de los componentes de la instalación fotovoltaica

3.2.5.3. Energía eólica

Esta tecnología utiliza la energía eólica para convertirla en energía eléctrica. Para esta transformación se utilizan las turbinas eólicas. La generación eólica ha experimentado una enorme mejora desde sus inicios hasta la actualidad, siendo 12 kW la potencia máxima conseguida por los primeros molinos y en torno a 9 MW con tecnología offshore [28].



Figura 3.7. Aplicación energía eólica [27].

Actualmente existen dos tipos de generación de energía eólica: mediante un generador síncrono o a través de un generador asíncrono, la más común es la obtenida mediante generadores asíncronos controlados por convertidores [26].

Una de las ventajas que tiene este tipo de tecnología es que es fácilmente escalable al tamaño de la microrred, pudiendo elegirse pequeñas turbinas eólicas.

En el momento del diseño de la instalación eólica es necesario considerar los siguientes aspectos:[26]

- **Potencia del viento:** es la cantidad de potencia que el viento es capaz de proporcionar a la turbina, por lo tanto, es importante la correcta ubicación de la instalación eólica.
- **Potencia máxima aprovechable:** se define como la máxima potencia que el molino es capaz de captar del viento, se rige por la ley de Betz, que formula que el generador solamente es capaz de captar como máximo entorno a un 59 % de la potencia del viento.

Características físicas de los generadores: en el momento de la elección de un generador debe considerarse el rendimiento, la altura, el diámetro de las palas y otros factores que influyen en la transformación de energía eléctrica.

- Rosa de los vientos: define la velocidad y dirección del viento, por lo tanto, es un factor clave en el momento del diseño de la instalación eólica

3.2.6. Fuentes de energía convencional

Las fuentes de energía convencionales utilizan combustibles para generar energía, por lo tanto, se tiende a minimizar la utilización de este tipo de tecnologías. Existen diferentes tipos de fuentes de energía convencionales, pero destacan dos tecnologías: el generador diésel y la microturbina.

3.2.6.1. Generador diésel

Son motores de combustión interna en los que los gases de combustión empujan a un émbolo, el cual hace girar un cigüeñal en un movimiento de rotación, produciendo así energía mecánica. Esta energía será posteriormente transformada en energía eléctrica [26].



Figura 3.8. Generador diésel [27].

Son capaces de responder ante las variaciones del sistema y pueden suministrar un flujo constante de energía al contrario de las energías renovables que dependen de las condiciones meteorológicas.

Se utilizan en sistemas de cogeneración como pueden ser hospitales y también en sistemas como las microrredes. Los motores diésel se conectan a la red a través de generadores síncronos.

Los principales inconvenientes del motor diésel son las emisiones de NOx y el rendimiento, alcanzando entorno al 50 %.

3.2.6.2. Microturbina

Están compuestas por una turbina, un generador, un compresor y un recuperador, todo ello montado en un único eje. Al igual que los generadores diésel, son capaces de responder ante variaciones del sistema, garantizando el suministro de energía demandada. Sus principales ventajas son su tamaño compacto, escaso número de partes móviles y escasa emisión de ruido. El principal inconveniente de las microturbinas es la emisión de gases contaminantes, por lo que se tiende a optimizar el uso de las mismas.

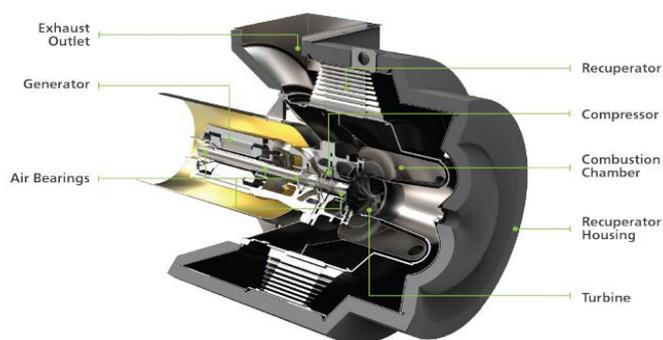


Figura 3.9. Elementos de una microturbina [29].

Es posible instalar un sistema de cogeneración, del que se obtiene calor y electricidad. Aprovechando así la energía térmica aparte del objetivo principal que es generar energía. Con este sistema de cogeneración se incrementa el aprovechamiento de la energía en el combustible [26].

3.2.7. Sistemas de almacenamiento de energía

En Se instalan en el sistema para poder almacenar energía, en este caso las unidades de almacenamiento actuarían como cargas en el sistema ya que estarían absorbiendo energía de la microrred. Los elementos de almacenamiento también pueden ser utilizados como generadores, ya que pueden ceder la energía almacenada al sistema y así contribuir a satisfacer la demanda. Son objeto de estudio debido a la baja capacidad que tenemos actualmente. Algunos ejemplos son los supercondensadores, las baterías químicas, almacenaje de aire comprimido y la batería inercial [30].



Figura 3.10. Sistema de almacenamiento de energía [31].

Para la elección del tipo de batería se debe de tener en cuenta diferentes aspectos [24]:

- La capacidad de la batería, esta característica define cuánta energía puede almacenar.
- Los límites de carga y descarga de la batería.
- El máximo límite de descarga, esta característica define el porcentaje de la batería que puede ser descargado respecto a la capacidad total.

Un nuevo término, como es el estado de carga, es relevante en las baterías. Se define como la energía existente en los elementos de almacenamiento en un momento en concreto. Por lo tanto, existe un rango en el que se debe operar, este rango lo marca las características físicas de los elementos.

El estado de carga es dinámico y cambia con el sistema, los elementos de almacenajes se cargan y se descargan, por lo tanto, influye la eficiencia de carga y descarga [24].

Como las baterías pueden ceder o absorber energía, desde la perspectiva del sistema pueden consumir o aportar potencia. Lo que haría que fuesen generadores o cargas, por lo tanto, hay que tener en cuenta que según las características físicas del elemento existe un rango de potencia máxima que puede ceder o absorber a la microrred.

3.2.7.1. Batería de Ion-litio

La batería de Ion – litio son consideradas una nueva tecnología, la cual ofrece una densidad de energía de 3 veces a la de una batería plomo-ácido. Esta gran mejora viene dada por su bajo peso atómico 6,9 vs 209 para la de plomo[32].

Además, 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[32].

Ventajas de las Baterías de litio:

- Baja tasa de auto descarga,
- Alta potencia, puesto que el perfil de voltaje de las baterías de iones de litio es más constante que el de las baterías de plomo-ácido.
- Ahorro de energía y reducción de emisiones de CO₂ gracias a un grado de rendimiento de hasta un 20% superior a las baterías de plomo-ácido.
- Recuperación más eficiente.
- Su vida útil es tres veces más que los acumuladores de energía convencionales.
- La garantía se estima en un tiempo de 5 años dependiendo del fabricante.

Desventajas de las Baterías de litio

- Son más costosas (al menos dos veces más que una batería de plomo ácido)
- Son muy sensibles a altas temperaturas ya que esto genera una rápida degradación de la batería que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión.
- Requieren la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que limita su utilización para otras aplicaciones.

Actualmente, las baterías de litio son utilizadas como sistemas de almacenamiento de energía para diversos sistemas eléctricos, automóviles y dispositivos electrónicos.

A continuación, se presenta los datos técnicos de una batería de litio de 2000 ciclos que son utilizadas en los sistemas de almacenamiento de energía para microrredes.

Tabla 3.2. Datos técnicos de una batería de Litio para microrred [33]

Product Name :	LiFePO4 Battery (12V 100AH)		
Certification:	CE/UL/MSDS/ROHS/ISO9001/UN38.3		
Nominal Voltage	12.8V	Nominal Capacity	100AH
Charge Voltage	14.6±0.2V	Charger Current	40A
Max. Charge Current	70A	Charge Cut-off Voltage	15.6±0.2V
Operating Temperature	Charging:0~45°C Discharging:-20~60°C		
Cycle life	2000 Cycles(100%DOD)		
	5000 Cycles(80%DOD)		
Environmental	Charge Temperature	0 °C to 45 °C (32F to 113F) @60±25% Relative Humidity	
	Discharge Temperature	-20 °C to 60 °C (-4F to 140F) @60±25% Relative Humidity	
	Water Dust Resistance	IP56	
Mechanical	Cell & Method	3.2V25Ah 4S4P	
	Plastic Case	ABS	
	Dimensions (in./mm.)	330*173*220mm / Customized	
	Weight (lbs./kg.)	13.5KG	
	Terminal	T11	

3.2.8. SOC de la Batería

En [34] se menciona que el SOC es uno de los parámetros más importantes para las baterías, pero su definición presenta muchos problemas diferentes. En general, el SOC de una batería se define como la relación entre su capacidad actual () y la capacidad nominal (). La capacidad nominal la proporciona el fabricante y representa la cantidad máxima de carga que se puede almacenar en la batería. El SOC se puede definir de la siguiente manera:

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q(t)}{Q(n)} \quad (3.1)$$

Donde:

Q(t) : Capacidad actual

Q(n) : Capacidad nominal

a. Estado de carga (SoC) :

Es el nivel de carga de una batería eléctrica en relación con su capacidad. Las unidades de SoC son puntos porcentuales (0% = vacío; 100% = lleno). Una forma alternativa de la misma

medida es la profundidad de descarga (DoD), la inversa de SoC (100% = vacío; 0% = lleno) [34].

b. Depth of Discharge (DOD)

Según [35] la profundidad de descarga DoD, (Depth of Discharge) se define como la relación entre la capacidad (Ah) entregada por una batería durante un ciclo de descarga de la misma y la capacidad que ésta tiene. Los ciclos (considerados cuando se realiza una carga y una descarga) son el factor más influyente para el cálculo del envejecimiento de la batería.

Las expansiones y contracciones físicas en la batería van produciendo micro grietas y micro obturaciones en el cátodo y ánodo lo cual hace que poco a poco, en función del ciclado producido, la batería vaya perdiendo propiedades. Lo ideal sería suavizar estos ciclos para que la batería vea prolongada su vida [35].

Suponiendo constantes todos los demás parámetros: Temperatura, tiempo y ratio C y un estado de carga determinado, el debilitamiento de la batería es proporcional a la DoD.

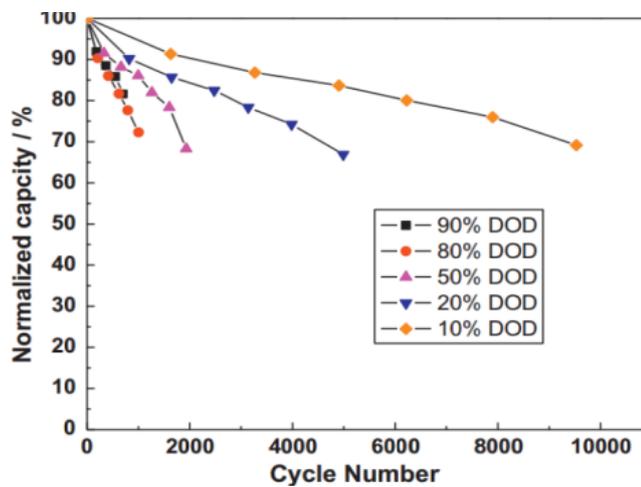


Figura 3.11. Capacidad / Ciclos de descarga en función de la DoD [36].

En la figura 2.5 se puede observar cómo varía la cantidad de ciclos de carga y descarga a los que puede ser sometida una batería de litio en función de la profundidad de cada una de éstas. A medida que va aumentando la profundidad DoD, disminuye el número de ciclos a los que puede ser sometida la batería y viceversa, con profundidades menores, podremos realizar mayor número de ciclos de carga y descarga [35].

3.3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA EN LA MICRORRED

Con el propósito de garantizar la estabilidad de la microrred y un funcionamiento fiable de la misma, y para considerar aspectos económicos y ambientales, la optimización depende de disminuir el consumo de combustibles fósiles, la gestión de las unidades de almacenamiento y las cargas. En las herramientas de control de las microrredes es necesario considerar una función de coste y unas determinadas restricciones[37].

3.3.1. Optimización

El Consiste en la selección de una alternativa mejor de un conjunto de alternativas posibles. Es un concepto que va estrechamente ligado a toda investigación operativa, sin embargo, determinadas técnicas propias de la investigación operativa se recogen con el nombre de optimización o programación matemática.

De acuerdo a [38] Los problemas de optimización se componen principalmente de estos tres elementos:

3.3.1.1. Función objetivo

Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de funciones objetivo se pueden mencionar: la minimización de los costes variables de operación de un sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, la minimización del cuadrado de las desviaciones con respecto a unos valores observados, la minimización del material utilizado en la fabricación de un producto, etc.

3.3.1.2. Variables

Son las decisiones que se pueden tomar para influir en el valor de la función objetivo. Se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales. En el caso de un sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas.

3.3.1.3. Restricciones

Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, las potencias máxima y mínima de operación de un grupo de generación.

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones.

Según [38] existen algunos tipos de problemas de optimización que alteran ligeramente este esquema:

a. Sistemas de ecuaciones lineales – no lineales

No existe una función objetivo como tal. Únicamente interesa encontrar una solución factible a un problema con un conjunto de restricciones.

b. Optimización sin restricciones

Se trata de encontrar el conjunto de valores de las variables que determinan el mínimo/máximo de una función. Algunas de las técnicas que se verán en programación no lineal son para optimización sin restricciones.

c. Optimización multiobjetivo

Existe más de una función objetivo. El problema que se plantea es cómo tratar varias funciones objetivo a la vez, teniendo en cuenta que el óptimo para un objetivo no lo es para otro, son objetivos en conflicto entre sí.

Hablando de los métodos de optimización se los puede clasificar en: métodos clásicos (que son los que naturalmente se explican en los libros de optimización) y métodos heurísticos (que aparecieron conjuntamente a la inteligencia artificial). Dentro de los primeros se encuentra la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, etc. En el segundo grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (Genéticos entre otros), el método del recocido simulado (simulated annealing) o las búsquedas heurísticas (método tabú, búsqueda aleatoria, etc.). De forma general y aproximada se puede decir que los métodos clásicos buscan y garantizan un resultado óptimo, mientras que los métodos metaheurísticos tienen mecanismos específicos para alcanzar un óptimo global, aunque no sea garantizado su alcance.

En la tabla 3.3 se muestran las expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos. Los problemas se diferencian por el carácter de las funciones que intervienen (lineales o no lineales) y de las variables (reales/continuas o enteras/discretas).

Tabla 3.3. Expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos [38].

Programación lineal (linear programming) 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 (mixed integer linear programming) MILP	$\min_x c^T x + d^T y$ $Ax + By = b$ $x, y \geq 0$ $x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l$ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m$
Programación cuadrática (quadratic programming) 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 (non linear programming) NLP	$\min_x f(x)$ $g(x) = 0$ $h(x) \leq 0$ $l \leq (x) \leq u$ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ $g, h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$
Programación multiobjetivo (multiobjective programming)	$\min_x (f_1(x), \dots, f_k(x))$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$ $f, (x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

En [38] se menciona que existen decisiones que no pueden ser representadas 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) o binarias (como localización de plantas o almacenes). Estos problemas se denominan, genéricamente, de programación lineal entera mixta, son problemas lineales donde algunas o todas las variables son enteras. Los problemas lineales con variables pueden clasificarse en: PIP

(pure integer programming) si todas las variables son enteras, BIP (binary integer programming) si todas son binarias o MIP (mixed integer programming) si algunas son enteras o binarias y el resto continuas.

En casos particulares, pero muy frecuentes, de variables enteras son las variables binarias (0/1), ya que permiten modelar condiciones de asignación o condiciones lógicas. Por otra parte, toda variable entera x se puede expresar como suma de variables binarias y_i , donde $x = \sum_{i=0}^N 2^i y_i$ siendo u una cota superior de x , $0 \leq x \leq u$, y estando u comprendida en el intervalo de $2^N \leq u \leq 2^{N+1}$.

La formulación matemática de algunos problemas de optimización especiales por no incluir alguno de los componentes se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 3.4. Formulación matemática de algunos problemas de optimización [38].

Optimización no lineal sin restricciones	$\min_x f(x)$ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$
Ajuste no lineal mínimo cuadrático	$\min_x f(x) = \sum_{i=1}^N F_i^2(x)$ $F_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$
Problema mixto complementario (mixed complementary problem) MCP	$xF(x) = 0$ $x \in \mathbb{R}^n$ $F: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

3.4. PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN LINEAL

Un problema de programación lineal es un problema de optimización en el que:

- Se debe maximizar (o minimizar) una función lineal de las variables de decisión que se llama función objetivo
- Los valores de las variables deben satisfacer un conjunto de restricciones lineales

Frecuentemente se encuentra que en el problema de programación lineal aparecen también restricciones de signo para las variables, del tipo $x_i \geq 0$. En realidad, estas restricciones son un tipo de restricciones lineales.

3.4.1. Forma general de un problema de programación lineal

La forma más general de un problema de programación lineal será:

Maximizar (o minimizar)

$$c_1x_1 + \dots + c_nx_n \tag{3.2}$$

Sujeto a:

$$a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \sim b_1 \dots \tag{3.3}$$

$$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \sim b_m \dots \tag{3.4}$$

$$a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \sim b_m \dots \tag{3.5}$$

$$x_1, \dots, x_n \geq 0 \text{ (que pueden aparecer o no)} \tag{3.6}$$

donde el símbolo \sim puede denotar a \geq, \leq o $=$

Dentro de los modelos lineales, cabe destacar tres categorías en función del tipo de las variables de decisión: [39]

- a. Programación Lineal (PL):** La función objetivo y las restricciones son funciones lineales, y las variables de decisión ($x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$) pueden adoptar de valores reales.
- b. Programación Lineal Entera (PLE):** La función objetivo y las restricciones son funciones lineales, y las variables de decisión ($x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$) únicamente pueden adoptar de valores enteros. Dentro de la PLE se debe destacar un caso particular, Programación Lineal Binaria (PLB), donde las variables únicamente pueden tener valor 0 o 1. Por lo general la PLE suele suponer una mayor dificultad en la resolución.
- c. Programación Lineal Entera Mixta (PLEM):** Este caso se trata de una combinación de los dos casos citados anteriormente. Cabe destacar que el programa matemático empleado en este trabajo pertenece a esta categoría. Mientras que por un lado disponemos de variables que representan el flujo de energía que adoptan valores reales,

por otro lado, disponemos de las variables como por ejemplo el número de paneles solares que será un entero o incluso binarias como es el caso de la variable que determina si se establece conexión entre dos puntos.

[40] señala que, en los modelos de optimización lineal, tanto la función objetivo f y las restricciones g, h son funciones lineales.

Y que George B. Dantzig en el año de 1947 formula, el problema general de optimización lineal y presenta el **Método Simplex** para su resolución.

Sea el modelo de optimización:

Maximizar

$$z = 3x_1 + 5x_2 \quad (3.7)$$

Sujeto a:

$$x_1 \leq 4 \quad (3.8)$$

$$2x_2 \leq 12 \quad (3.9)$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 12 \quad (3.10)$$

$$3x_1 + 2x_2 \leq 18 \quad (3.11)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (3.12)$$

Considerando un espacio bidimensional, en la Fig 3.12, se muestra la región solución -región factible-, delimitado por las restricciones. Una forma de visualizar la técnica, es emplear el método gráfico, que consiste en encontrar la región solución, dado por las acotaciones de las restricciones. En forma general, los puntos de intersección de las restricciones lineales -vértices del poliedro-, son los candidatos para ser solución del problema planteado.

En un espacio n -dimensional, la función objetivo, es un hiperplano y las restricciones son otros hiperplanos, entonces la región de intersección será la solución factible.

La región factible, en este caso, es un poliedro formado por los hiperplanos definidos por las restricciones en el espacio dimensional n .

El método simplex, consiste en probar todos los puntos candidatos - intersecciones-, si satisface la condición de optimalidad entonces el punto de intersección en cuestión, será la solución.

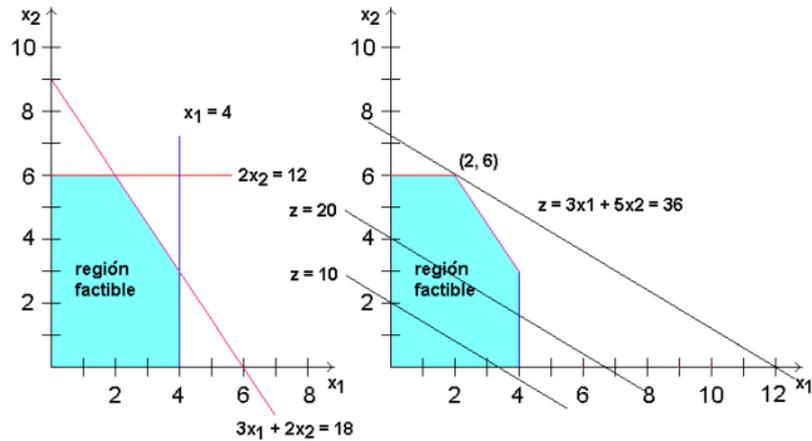


Figura 3.12. Método gráfico, región solución [40].

3.4.2. Método Simplex

Es un método analítico de solución de problemas de programación lineal, capaz de resolver modelos más complejos que los resueltos mediante el método gráfico sin restricción en el número de variables [41].

El Método Simplex es un método iterativo que permite ir mejorando la solución en cada paso. La razón matemática de esta mejora radica en que el método consiste en caminar del vértice de un poliedro a un vértice vecino de manera que aumente o disminuya (según el contexto de la función objetivo, sea maximizar o minimizar), dado que el número de vértices que presenta un poliedro solución es finito siempre se hallará solución.

3.5. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Un modelo es, en definitiva, una herramienta que ayuda a tomar decisiones. Razón por lo cual sus resultados deben ser inteligibles y útiles. Modelar se puede entender de manera simultánea como ciencia y como arte. Es una ciencia pues está basada en un conjunto de procesos estructurados: análisis y detección de las relaciones entre los datos, establecimiento de suposiciones y aproximaciones en la representación de los problemas, desarrollo o uso de algoritmos específicos de solución. Cada persona imprime su estilo en el modelo mismo y en la especificación, en el desarrollo y en la documentación. Características tales como elegancia

o simplicidad pueden atribuirse a un modelo. El desarrollo de un modelo es una creación hecha con ayuda de ciencias básicas o herramientas de apoyo [38].

Entre los beneficios explícitos o implícitos, tanto para el modelador como para el experto, derivados del proceso de modelado además del modelo en sí mismo, se pueden mencionar:

- a) Ayuda a establecer un diálogo con intercambio de información entre el modelador y el experto
- b) Organiza los datos, la información disponible sobre el sistema
- c) Organiza, estructura y mejora la comprensión del sistema
- d) Internaliza la estructura organizativa de la empresa
- e) Permite compartir supuestos y resultados entre el modelador y el experto
- f) Proporciona un entorno ágil para el análisis y la sensibilidad

3.5.1. Etapas en el desarrollo de un modelo de optimización

Las etapas que componen el ciclo de vida de un modelo son las siguientes:

Identificación del problema

Consiste en la recolección y análisis de la información relevante para el problema, en el intercambio de información entre el modelador y el experto, en establecer una relación muy estrecha y coordinada entre ambos.

Aquí es donde se establecen y documentan los supuestos realizados que en etapas posteriores deberán ser validados.

Esta etapa es fundamental para que las soluciones proporcionadas, las conclusiones obtenidas sean útiles, las decisiones adoptadas sean correctas. Los datos suelen ser vitales para conseguir un realismo o aplicabilidad en las soluciones. A menudo representan el cuello de botella del proceso de modelado.

Especificación matemática y formulación

Escritura matemática del problema de optimización, definiendo sus variables, sus ecuaciones, su función objetivo, sus parámetros. En esta etapa se analiza el tamaño del problema, la estructura de la matriz de restricciones, su tipo (LP, MILP, NLP). Es una etapa de creación donde se debe prestar especial atención a la precisión en la formulación y a la escritura de las ecuaciones que describen el problema. Hay que tener en cuenta, además, que existen diversas alternativas de modelado (especialmente en programación entera) que afectan de

manera fundamental en la resolución del mismo, existiendo un desarrollo cada vez mayor en la reformulación de problemas.

Resolución

Se trata de implantar un algoritmo de obtención de la solución numérica (muy próxima a la matemática) óptima o cuasióptima. El algoritmo puede ser de propósito general (método simplex) o específico. Puede haber diferentes métodos de solución de un problema o diferentes implantaciones de un mismo método. El tiempo de resolución de un problema también puede depender drásticamente de cómo esté formulado. La solución óptima debe ser suficientemente satisfactoria, debe ser una guía de actuación para el experto.

Verificación, validación y refinamiento

Esta etapa es para la eliminación de los errores en la codificación, es decir, conseguir que el modelo haga lo que se desea (depurar y verificar). Es necesario comprobar la validez de las simplificaciones realizadas a través de los resultados obtenidos, incluso contrastando éstos con situaciones reales ya transcurridas (validar). Esta etapa de verificación, validación, comprobación da lugar a nuevas necesidades de modelado para mejorar la capacidad de representación de la realidad, a nuevos refinamientos indicados por el usuario.

Interpretación y análisis de los resultados

Aquí se proponen soluciones. Permite conocer en detalle el comportamiento del modelo al hacer un análisis de sensibilidad en los parámetros de entrada, estudiar diferentes escenarios plausibles de los parámetros, detectar soluciones alternativas cuasióptimas pero suficientemente atractivas, comprobar la robustez de la solución óptima.

Implantación, documentación y mantenimiento

Ésta es una etapa fundamental del desarrollo de un modelo para garantizar su amplia difusión. La documentación ha de ser clara, precisa y completa. El manual de usuario debe incluir la especificación técnica funcional, matemática e informática. El propio código debe incluir una buena documentación para facilitar la tarea del mantenimiento. Piénsese que la mayor parte del ciclo de vida de un modelo no está en el desarrollo sino en la fase de uso y mantenimiento. En esta etapa se incluye también la tarea de formación para los usuarios del modelo.

3.6. LINEALIZACIÓN DE UNA FUNCIÓN

El reemplazar un sistema no lineal por su aproximación lineal se denomina linealización. Una motivación para la linealización es que el comportamiento dinámico de muchos sistemas no lineales dentro de un rango de variables puede ser aproximado a modelos de sistemas lineales. Siendo ese el caso, podemos usar técnicas bien desarrolladas de análisis y síntesis de sistemas lineales para analizar un sistema no lineal. Cabe destacar que se debe tener mucho cuidado cuando se realiza el análisis de sistemas linealizados ya que la intención no es introducir errores al analizar sistemas no lineales [42].

Consideremos el caso de un sistema (elemento no lineal) con una variable de estado x y una variable de salida y que están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$y = h(x), \quad (3.13)$$

donde la función $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ es continua y diferenciable; esto es $h \in C^1$. Consideremos x_0 como el punto de operación. Si expandemos h en la serie de Taylor alrededor del punto x_0 se obtiene:

$$y = h(x), \quad (3.14)$$

$$= h(x_0) + \frac{dh(x_0)}{dx}(x - x_0) + \text{terminos de alto orden} \quad (3.15)$$

La linealización de $h(x)$ alrededor del punto x_0 consiste en reemplazar h por una aproximación lineal de la forma:

$$y = h(x_0) + \frac{dh(x_0)}{dx}(x - x_0) \quad (3.16)$$

$$y = y_0 + \frac{dh(x_0)}{dx}(x - x_0) \quad (3.17)$$

Donde $y_0 = h(x_0)$. Si $\tilde{y} = y - y_0$ y $\tilde{x} = x - x_0$. Luego, podemos reescribir (3) como:

$$\tilde{y} = \frac{dh(x_0)}{dx} \tilde{x}, \quad (3.18)$$

y sobre un rango pequeño de \tilde{x} , la línea (3) es una buena aproximación de la curva $y = h(x)$ en la vecindad del punto de operación x_0 , ver Fig. 3.13 para una ilustración de la aproximación.

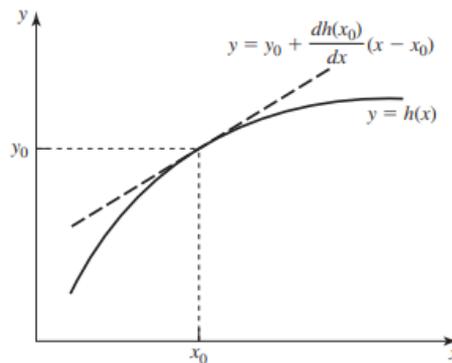


Figura 3.13. Aproximación lineal de la función $y = h(x)$ [42].

$$F(x) \approx f(x_0) + \frac{df}{dx}(x_0) * (x - x_0) \quad (3.19)$$

3.6.1. Convexidad

El estudio de la convexidad, permite realizar la búsqueda de los óptimos de las funciones, dado que cuando se verifica la convexidad del conjunto de oportunidades se pueden diseñar métodos de resolución eficientes para los problemas de optimización [43]

Según [44] existe dos tipos de curvatura de una función: Donde la función es convexa en un intervalo $[a; b]$ si el conjunto que está por encima de la gráfica es convexo visto desde abajo.

Observamos que una recta es a la vez convexa y cóncava, pero como no está curvada no hay confusión ninguna.

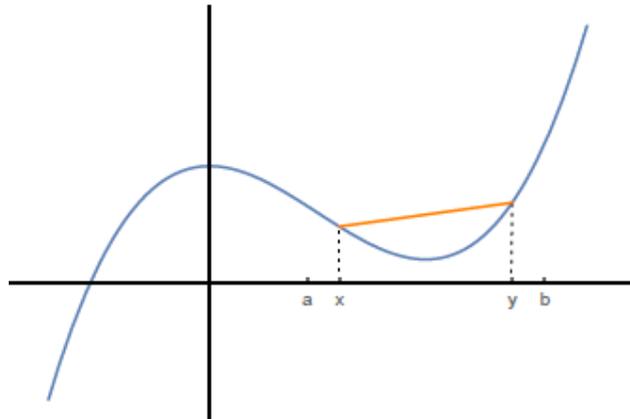


Figura 3.14: Gráfica de una función convexa en el intervalo $[a; b]$ [44].

3.6.2. Optimización convexa

Cuando se detalla de un problema de optimización [45] en general, es decir, sin especificar que sea convexo, queremos minimizar una función $f_0(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ que será la *función objetivo*, con una serie de restricciones indicadas por las funciones $f_i(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Esto lo expresamos de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ll} \text{minimizar} & f_0(x) \\ x & f_i(x) \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ \text{sujeto a} & h_i(x) = g_i \quad i = 1, \dots, p \end{array} \quad (3.20)$$

Se procede a buscar un vector óptimo x^* que pueda cumplir las restricciones correspondientes de la función $f_1(x^*) \leq b_1, \dots, f_m(x^*) \leq b_m, h_1(x^*) \leq g_1, \dots, h_p(x^*) \leq g_p$ y cuya función objetivo $f_0(x^*)$ sea el mínimo de los valores obtenidos con cualquier otro vector que cumpla las restricciones [45].

La función objetivo $f_0(x)$ es el coste determinado para x , y las funciones $f_i(x)$ y $h_i(x)$ son los límites del conjunto de los valores de x a elegir. La solución permite la elección de x que supone un coste mínimo dentro de los requerimientos del problema[45].

Para que el problema sea de optimización convexa se requiere que la función objetivo y las restricciones sean convexas, es decir, deben satisfacer la siguiente expresión [45].

$$f(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f(x) + \beta f(y) \quad (3.21)$$

Se obtiene restricciones en forma de desigualdad y en forma de igualdad.

En el caso de las igualdades, se requiere que las funciones $h_i(x) = a_i^T x - b_i$ sean afines.

Al cumplirse las condiciones descritas, se puede desarrollar un método muy eficiente para resolver el problema de optimización con el concepto de convexidad [45].

3.7. ANÁLISIS DE ALGORITMOS

La resolución de cualquier problema exige un algoritmo o método de resolución y a su vez su codificación en una computadora. El componente del algoritmo es absolutamente esencial, pero la codificación puede muchas veces pasar a nivel de anécdota [46].

Donde el algoritmo es la serie de pasos que llevan a resolver un problema de la mejor manera; mientras que la codificación hace referencia a un algoritmo escrito en un lenguaje de programación [46].

a) El tamaño:

Según [46] cada problema puede ser determinado con una medida N de su tamaño (por número de datos) para así hallar respuestas en función de dicho N . El concepto exacto que mide N depende de la naturaleza del problema.

b) Recursos

Para efectos prácticos debemos procurar los recursos físicos necesarios para que un programa se ejecute. Los parámetros más usuales son el tiempo de ejecución y la cantidad de memoria (RAM). Generalmente se usa la siguiente notación [46].

- $T(n)$ – tiempo de ejecución en función del tamaño n del problema
- $E(n)$ – espacio (RAM) en función del tamaño n del problema el cual casi siempre se centra en el tiempo de ejecución.

c) Tiempo de ejecución

Una medida que suele ser útil conocer es el tiempo de ejecución de un programa en función de N , lo que denominaremos $T(N)$.

Los programas reales incluyen alguna sentencia condicional, haciendo que las sentencias efectivamente ejecutadas dependan de los datos concretos. Esto hace que más que un valor $T(N)$ posea un rango de valores[46]:

$$T_{min}(N) \leq T(N) \leq T_{max}(N) \quad (3.22)$$

Los extremos son habitualmente conocidos como "caso peor" y "caso mejor". Entre ambos se hallará algún "caso promedio" o más frecuente.

d) Asíntotas

Por una parte, se requiere analizar la potencia de los algoritmos independientemente de la potencia de la computadora o de la habilidad del programador que realice la codificación. Este análisis es de interesa cuando el algoritmo se aplica a problemas grandes [46].

3.7.1. Metodología

Para enfocar la comparación de algoritmos es conveniente averiguar la función f(n) que caracteriza los recursos requeridos por un algoritmo en función de tamaño n de los datos a procesar [46].

Tabla 3.5. Parámetros de la función característica [46].

Parámetro a medir	N
Recursos de interés	Tiempo de ejecución = f(N)
	Memoria necesaria = f(N)
Analizar	f(n)

Se debe seleccionar una serie de conjuntos de referencia para diferentes situaciones que se puedan presentar. Habitualmente estos conjuntos se denominan O [46].

Tabla 3.6. Conjuntos u órdenes de complejidad [46]

Funciones de referencia		Conjuntos u órdenes de complejidad	
f(n) = 1	Constante	O (1)	Orden constante
f(n) = log (n)	Logaritmo	O (log n)	Orden logaritmo
f(n) = n	Lineal	O (n)	Orden lineal
f(n) = n × log(n)		O (n log n)	
f(n) = n²	Cuadrática	O (n²)	Orden cuadrático
f(n) = n^a	Polinomio (de grado a > 2)	O (n^a)	Orden polinomial (de grado a > 2)
f(n) = aⁿ	Exponencial (a > 1)	O (aⁿ)	Orden exponencial (a > 1)
f(n) = n!	Factorial	O (n!)	Orden factorial

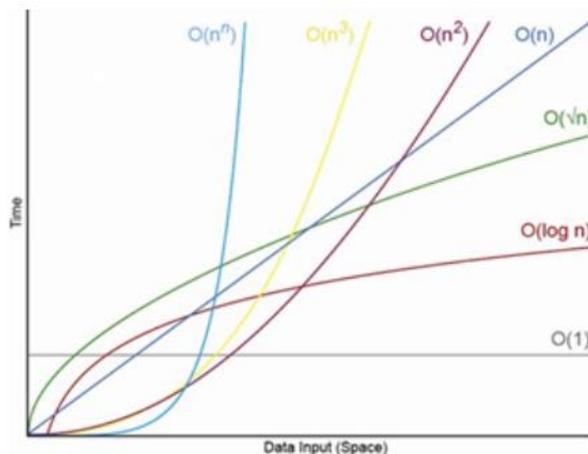


Figura 3.15. Complejidad de los algoritmos [47]

3.7.2. Reglas prácticas

Aunque no hay una receta que funcione para calcular la complejidad de un algoritmo, si es posible tratar sistemáticamente una gran cantidad de ellos, basándose en que suelen estar bien estructurados y siguen pautas uniformes[46].

Los algoritmos bien estructurados combinan las sentencias de algunas de las siguientes formas

a) Sentencias sencillas

Se refieren a las sentencias de asignación, entrada/salida. La mayoría de las sentencias de un algoritmo requieren un tiempo constante de ejecución[46].

b) Secuencia

La complejidad de una serie de elementos de un programa es del orden de la suma de las complejidades individuales[46].

c) Decisión (if)

La condición suele ser de $O(1)$, complejidad a sumar con la peor posible, bien en la rama THEN, o bien en la rama ELSE.

d) Bucles

En los bucles con contador explícito se puede distinguir dos casos: que el tamaño N forma parte de los límites o que no. Si el bucle se realiza un número de veces, independiente de N , entonces la repetición sólo introduce una constante multiplicativa que puede absorberse[46].

e) Llamadas a procedimientos

La complejidad de llamar a un procedimiento se da por la complejidad del contenido del procedimiento en sí. El coste de llamar es una constante que podemos obviar inmediatamente dentro de los análisis asintóticos[46].

3.7.3. Relaciones de ocurrencia

Durante el cálculo de la complejidad de un algoritmo en general aparecen expresiones recursivas para estimar el tiempo que se tarda en procesar un problema de un cierto tamaño N [46].

Tabla 3.7. Relaciones de recurrencia habituales [46]

Relación	Complejidad	Ejemplos
$T(n) = T(n/2) + 0(1)$	$0(\log n)$	Búsqueda binaria
$T(n) = T(n - 1) + 0(1)$	$0(n)$	Búsqueda lineal Factorial Bucles for, while
$T(n) = 2T(n/2) + 0(1)$	$0(n)$	Recorrido de árboles binarios: preorden, en orden ,post orden
$T(n) = 2T(n/2) + 0(n)$	$0(n \log n)$	Ordenación rápida (quick sort)
$T(n) = T(n - 1) + 0(n)$	$0(n^2)$	Ordenación por selección Ordenación por burbuja
$T(n) = 2T(n - 1) + 0(1)$	$0(2^n)$	Torres honei

3.8. APLICACIÓN DEL DESPACHO ECONÓMICO A LA MICRORRED

3.8.1. Despacho económico

El despacho económico se define como la distribución de carga en las diferentes estaciones de generación, sabiendo que como objetivo principal es la disminución de costos al momento de suministrar energía, basados en los términos de confiabilidad y calidad [48].

Obtener una adecuada aplicación de los recursos energéticos para la generación en el SEP, permite obtener un despacho donde se está considerando las restricciones que se puedan presentar durante los diferentes periodos de tiempo.

En[49] el despacho económico asignamos la cantidad de potencia a las diferentes unidades que se encuentre en la parte de generación tomando en cuenta el tiempo determinado en el que se encontrara suministrando energía, para cubrir la demanda dispuesta y con ellos minimizar los costos. Una vez determinada la potencia designada a cada central sea convencional o no

convencional, se designa el tiempo de suministro que se encontrara acoplado al SEP, mientras que ingresa otro tipo de generación o un similar, cada una de las centrales que ingresen o se desacoplen tienen independencia de funcionamiento como en costos, ya que depende de la energía primaria que usen.

Los costos que ingresan en el despacho son variados pero los que se minimizan es el consumo del combustible, y las pérdidas que se puede ocasionar en el sistema. Por lo que se debe considerar la respuesta máxima de la demanda, donde se incluye todas las pérdidas y los límites técnicos de los generadores. Entre otras restricciones son los límites de capacidades de transmisión en las líneas y el medio ambiente al momento de obtener nuestra energía primaria.

Los modelos de costo de las unidades que intervienen en el SEP están descritos a continuación [49].

$$C(PGi) = a_i + b_i PGi + c_i PGi^2 \quad (3.23)$$

Dónde:

PGi : Potencia del generador de salida i [Mw], [p.u].

a_i, b_i, c_i : Coeficientes de costos de combustible.

Despacho económico con su primera aproximación sin considerar pérdidas

$$\min F = \sum_{i=1}^n C_i(P_{gi}) \quad (3.24)$$

$$\text{suje}to \ a \left(P_D - \sum_{i=1}^n (P_{Gi}) \right) \quad (3.25)$$

Donde:

PGi : Potencia del generador de salida i [Mw], [p.u].

PD : Potencia demanda

Considerando las pérdidas del Despacho económico

$$\min F = \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) \quad (3.27)$$

$$\text{sujeto a } \left(P_D + P_L - \sum_{i=1}^n (P_{Gi}) \right) = 0 \quad (3.28)$$

P_{Gi} : Potencia del generador de salida i [Mw], [p.u].

P_D : Potencia demanda.

P_L : Pérdidas en las líneas.

3.8.2. 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. El despacho Económico convencional está conformado de centrales que utiliza combustibles fósiles o hidroeléctricas de gran tamaño para poder generar electricidad. Al momento de analizar los recursos que intervienen en este tipo de despacho se considera aspectos técnicos, geográficos y económicos [48].

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.

El despacho en las centrales térmicas describe sus variables de forma directa en los costos de combustibles, es representada como funciones cuadráticas y describe restricciones operativas del sistema mas no en un futuro. El despacho en las centrales hidrotérmicas tiene restricciones con características dinámicas ya que pueden ocasionar en el futuro algunos cambios, siempre tomando en cuenta un plan a mediano y corto plazo[48].

Entre las características más relevantes de en un despacho convencional, son los grandes inconvenientes que tienen contra el medio ambiente ya que generan un gran impacto con los gases y todas las partículas que emiten, provocando daños a la atmosfera[48].

3.8.3. 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 [50].

El despacho económico no convencional esté ligado de forma directa a la disponibilidad de sus energías y a su geografía para aprovechar de mejor manera el recurso, entre sus dificultades se encuentran los recursos que no tienen embalse por lo que presenta variaciones considerables y a su vez la dificultad de transporte a diferencia de los combustibles fósiles [51].

Al momento que la generación eléctrica centralizada tiene picos de consumo muy grandes, y es complicado la participación de las ERNC, sumando los costos altos de inversión y muchos de los mercados son muy competitivos. Pero cada vez ingresan con mayor determinación real de costos, ahí es cuando comienza a tener ventajas con los despachos convencionales y por todos los beneficios que brindan al sistema y al medio ambiente. En Europa ocupa una posición muy importante la penetración de este tipo de despacho donde aprovechan sus puntos máximos de generación en el día [50].

3.9. CENTRALES DE GENERACIÓN A BASE DE ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables en el transcurso de los años comienzan a incrementar en el mundo, por lo que es amigable con el medio ambiente y el costo de la energía primaria es gratuita. Las energías renovables se definen de la siguiente manera: como a la energía que se adquiere de todas las fuentes naturales que pueden existir y con una característica esencial que son inagotables, por la cantidad o por su capacidad de producirse o regenerarse por medios naturales [50].

Las energías renovables se clasifican en: Energías renovables convencionales (ERC) y no convencionales (ERNC), entre las ERC están tomadas en cuenta las centrales hidráulicas de

gran tamaño. Por su gran desarrollo ya en el mundo, como una forma de extraer energía eléctrica, tomando en cuenta la potencia que es diseñada se considera renovable, como no convencional. Entre las ERNC encontramos a la generación solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, geotérmicas, mareomotriz, biomasa y las centrales hidroeléctricas pequeñas [50].

3.9.1. Generación hidráulica

La generación hidráulica es la energía que proviene de la energía estática y potencial del agua, este recurso proviene de nevados, lluvia, y ríos donde son captados por represas para ser direccionados, donde la fuerza del agua mueve turbinas produciendo energía mecánica y esta a su vez a energía eléctrica. A partir de la revolución industrial surgió la producción en gran escala. Conociendo su gran aporte con el medio ambiente por su reducción de contaminación [52].

La generación hidráulica genera energía eléctrica a un costo promedio bajo en comparación a la generación que involucra combustibles, el recurso que se utiliza es el agua que se encuentra almacenada en un embalse. Por esa razón ingresa a un problema de obtención de recursos primarios para su generación ya que involucra incertidumbres en el tiempo, por sus diferentes periodos temporales en los que puede variar en el año [52].

Conociendo que las centrales hidroeléctricas presentan embalses de regulación donde acumulan agua en todos los periodos de lluvia para los periodos de sequía. Centrales con embalses pequeños donde acumulan agua los fines de semana y días de vacaciones para días normales; también hay las centrales donde hay una regulación diaria y acumulan agua durante el día y son usados en horas donde sube la demanda.

La generación hidráulica puede producir una potencia nominal considerando diferentes análisis de rendimiento y se la puede describir como [52].

$$p = g \times \rho \times \eta_t \times \eta_g \times hl \times q \times 10^{-3} \quad (3.29)$$

p : potencia generada [MW].

g : Aceleración de la gravedad [m/s].

ρ : peso específico del agua [Kg/m³].

η_t : rendimiento de la turbina [%].

η_g : rendimiento del generador [%].

hl : Altura del salto líquido [m].

q : Caudal turbinado [m³/s]

3.9.2. Generación eólica

La generación eólica se describe como la energía que su nacimiento es producido del movimiento del viento [50]. Este movimiento es producido por las diferentes presiones que se encuentran en la tierra en sus diferentes lugares, de presiones altas a una menor. Para la generación eléctrica mediante el viento se realiza un estudio de una zona específica donde se obtiene un movimiento del viento constante, donde se instalan las torres con aerogeneradores para convertir esta energía renovable en energía eléctrica apta para cubrir una cierta demanda. La Generación eólica produce potencia a través de sus turbinas eólicas y se la puede describir mediante la siguiente ecuación [12].

$$P = \frac{1}{2} (\rho \times A \times u^3) \quad (3.30)$$

P : Potencia.

ρ : Densidad del aire.

A : Área cubierta por el viento.

u : Velocidad del viento

Los cálculos de la potencia de generación eléctrica por un aerogenerador se pueden describir entre dos límites como describe las curvas típicas de potencia de un aerogenerador, fuera de esos límites la potencia es cero [53].

$$P(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_{rated} \times \frac{(v - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_{rated} & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

(v) : Potencia del viento.

P_{rated} : Potencia nominal [W].

v_{ci} : Velocidad del viento de inicio.

v_{co} : Corte de Velocidad del viento.

v_r : Velocidad del viento nominal.

3.9.3. Generación Solar-fotovoltaica

La generación fotovoltaica se describe como la transformación de forma directa de la radiación solar mediante paneles que contienen celdas en paralelo o serie a electricidad [50]. Los paneles fotovoltaicos son excitados por la radiación solar por la que los electrones de un dispositivo semiconductor generan un diferencial de potencial (voltaje); dependiendo de la conexión de las celdas se obtiene mayor o menor diferencial de potencial. Mediante las diferentes características del fabricante el panel fotovoltaico se puede determinar la potencia.

Podemos describir la generación fotovoltaica mediante la ecuación que se describe en [54], donde la potencia de una celda fotovoltaica se puede expresar como:

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{(NOCT - 20)}{800} * G \quad (3.32)$$

T_{cell} : temperatura de la celda [°C].

T_{amb} : temperatura del ambiente [°C].

$NOCT$: Condición de temperatura nominal [°C]

G : Irradiación Solar [W/m²]

$$P_{ph} = P_{stc} = \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \alpha(T_{cell} - 25)] \right\} \quad (3.33)$$

P_{ph} : Potencia de salida de la celda.

P_{stc} : Potencia bajo condiciones estándar de prueba [W].

G : Irradiación Solar [W/m²].

α : Coeficiente de potencia – temperatura [%/°C].

T_{cell} : temperatura de la celda [°C]

También podemos describir la potencia que van a entregar las centrales de generación como [55].

$$P_{pv} = \left[P_{pv,st} * \frac{G}{1000} * [1 - C_i * (T_j - 25)] \right] * N_{PVs} * N_{PVp} \quad (3.34)$$

$P_{pv,st}$: Potencia Nominal de cada módulo.

C_i : Coeficiente de temperatura [°C].

T_j : Temperatura de la celda [°C].

N_{PVs} : Número de módulos en serie.

N_{PVp} : Número de módulos en Paralelo.

T_{amb} : temperatura del ambiente [°C].

$$T_j = T_{amb} + \frac{G}{800} * (NOCT - 20) \quad (3.35)$$

3.10. VARIABLES EN LAS ERNC

3.10.1. Velocidad del viento

El viento es originado por la rotación y traslación de la tierra, y por efectos de la radiación del sol que genera diferencias de temperaturas, por lo que también diferentes presiones. La velocidad del viento nos ayuda a producir energía eólica, por lo que bien administrada es un recurso muy útil, por lo que obtener un lugar con velocidades del viento regulares es donde se aprovecharía de mejor forma este recurso renovable.

3.10.2. Radiación Solar

Se les conoce a las radiaciones electromagnéticas que son producidas por el sol, esta energía producida por el astro rey se transmite por medio de la radiación solar [56]. Se describe a continuación los diferentes términos que están relacionado según [57].

Radiación directa: Radiación recibida del sol sin ser dispersada por ningún componente de la atmosfera, no es afectada en su dirección.

Radiación difusa: Radiación recibida del sol afectada por la atmosfera, es afectada su dirección por reflexión o difusión.

Radiación solar Total: Suma de la radiación difusa y directa.

Irradiancia (G): Podemos describirlo como la potencia que incide en toda la superficie terrestre donde puede ser descrita como cualquier radiación electromagnética [W/m²]

Irradiación (H): Es la irradiancia evaluada por una unidad de tiempo específica (hora o día).

Ángulo de incidencia: Es el ángulo formado por la radiación directa con la normal de la superficie donde choca.

3.11. DEMANDA ELÉCTRICA

La demanda eléctrica es variante en el tiempo por lo que debe ser considerada para que sea lo más exacta, ya que por medio de diferentes métodos matemáticos siempre hay una incertidumbre proporcionada en cualquier lapso de tiempo. Esta incertidumbre aumenta cuando se realiza un análisis de predicción. Se toma en cuenta que existen diferentes métodos de predicción. En este caso podemos analizar la demanda mediante predicción con curvas estandarizadas como se muestra en la figura 3.16 [52].

Las curvas de demanda pueden variar dependiendo de un día convencional (laboral) a un fin de semana, por lo que debemos considerar los diferentes grupos de consumo de energía; como es el comercial, residencial o industrial. Los diferentes grupos de consumo varían durante un día y estación del año. Existe un mayor consumo de energía en los meses de invierno comparándolo con los meses de verano por lo que se pueden describir estadísticamente con años pasados. La Demanda diaria nacional, tomando en cuenta el tipo de día, se puede reflejar mediante el consumo del usuario[58].

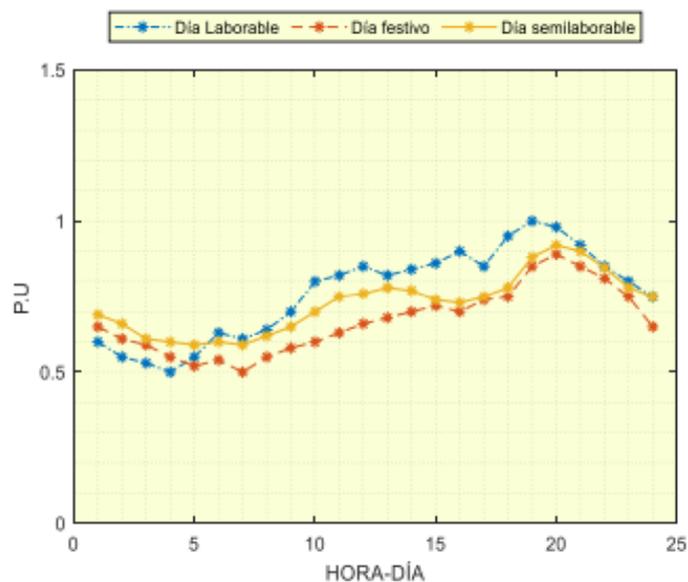


Figura 3.16. Curva Demanda Diaria [59].

Estos días son considerados mediante las curvas de manda del S.N.I, tomando en cuenta como día laborable normal un lunes, un día semi laborable el sábado y un día festivo el domingo.

3.11.1. Demanda eléctrica diaria

En la demanda diaria hay diferentes factores que afectan directamente como son las condiciones meteorológicas, calendario, variables económicas, diferentes eventualidades no predecibles y otros factores que implican un cambio en el consumo eléctrico [58].

Para tomar en cuenta el comportamiento de la demanda debemos conocer algunas definiciones. Error absoluto: Diferencia de valores reales con los valores proyectados [60].

Error relativo: División del error absoluto sobre el valor real.

Nivel de confianza: La probabilidad donde el resultado este en el valor promedio, sabiendo cuáles son sus límites de las curvas registradas.

Coefficiente de correlación: Define el grado de dependencia lineal entre las curvas que se proyecta con las reales.

Coefficiente de no correlación: Es el factor opuesto al de correlación ya que define la distorsión entre la curva real y que se proyecta.

Niveles de demanda: Es el valor que promedio de las demandas por hora analizadas en el periodo de un día. Tomando en cuenta los parámetros siguientes:

Demanda baja 5-9h.

Demanda media 11-17h

Demanda alta 18-23h.

Existen diferentes curvas que nos ayudan a caracterizar las cargas en los diferentes sectores de consumo, dependiendo de la región del país, a continuación, unas graficas de carga [60].

Las empresas distribuidoras caracterizan el consumo diario, y se ve reflejado a continuación.

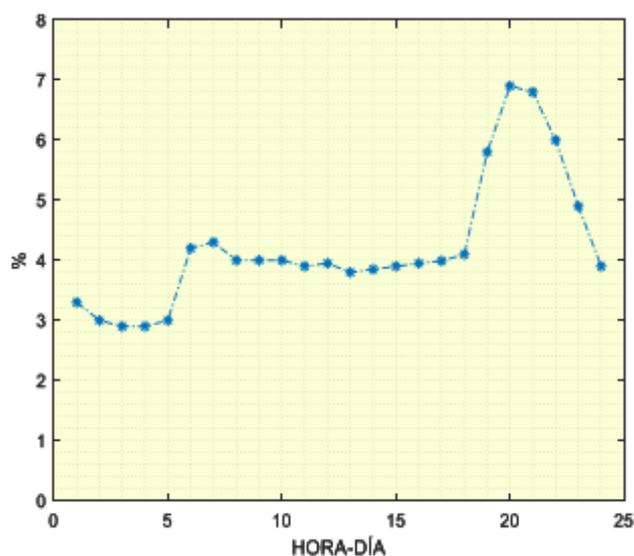


Figura 3.17. Curva Residencial [59].

La curva residencial (Figura 3.18) describe un mayor consumo en la noche rodeando el horario de 19:00 a 23:00. Esta curva puede tener pequeñas variaciones por el comportamiento repentino de la demanda.

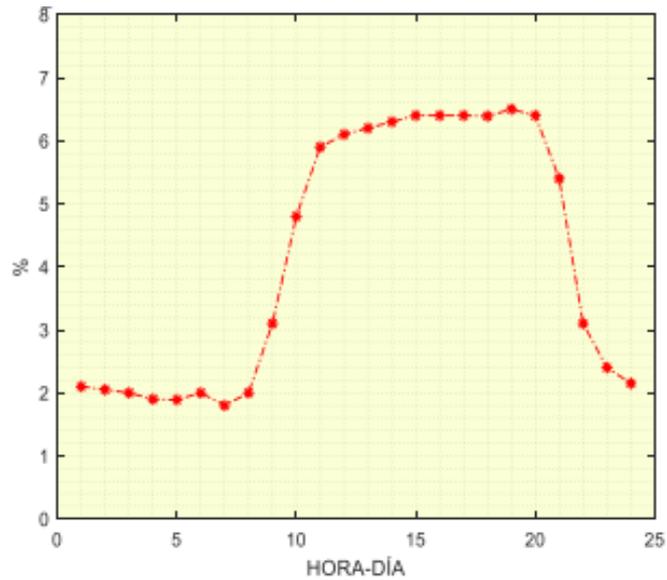


Figura 3.18. Curva Comercial [59].

La curva comercial (Figura 3.19.) describe el consumo más alto entre las 09:00 a 21:00. Esta curva representativa es más frecuente en las grandes ciudades.

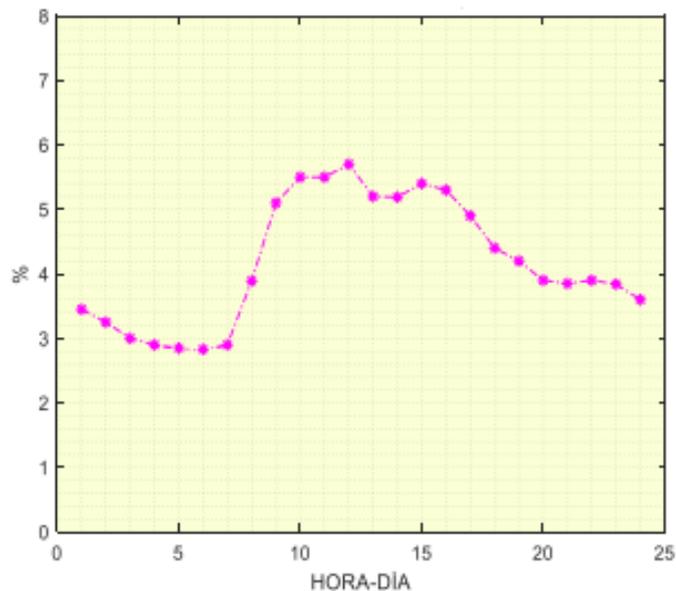


Figura 3.19. Curva Industrial [59].

En la curva industrial (Figura 3.20) su mayor consumo entre las 08:00 a 20:00, considerando que hay industrias que tienen consumo a doble turno en la noche.

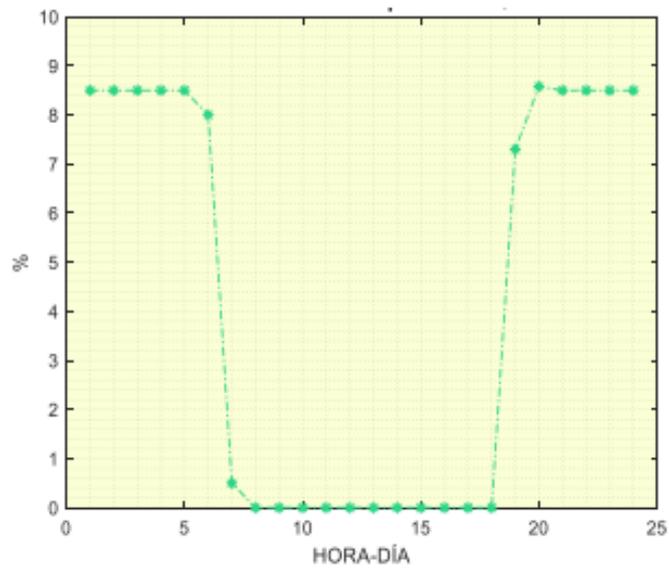


Figura 3.20. Curva Alumbrado Público [59].

El comportamiento del alumbrado público (Figura 3.26.) es muy particular ya que cualquier empresa distribuidora la puedes describir de la misma forma en todo el año, con su consumo en la noche y madrugada a partir de las 18:00 a 6:30.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para realizar el presente proyecto de investigación se requiere aplicar el método de investigación deductivo, este método se utilizara para el análisis de las metodologías y procedimientos para el desarrollo del modelo matemático de optimización para el despacho económico (ED) de una microrred aislada, además con la ayuda del método descriptivo se realizará la recolección, tabulación y posterior análisis de los resultados del ED, a través de páginas web de meteorología se obtiene datos de irradiación solar y velocidad del viento que permiten dimensionar potencia solar fotovoltaica y potencia eólica, mediante una investigación bibliográfica que se apoya teóricamente de información de fuentes como textos, libros, guías, folletos, revistas, artículos y tesis permitirá el desarrollo y simulación del modelo matemático de optimización para el ED de una microrred aislada, finalmente a través de un estudio de caso real permitirá analizar y validar los resultados del modelo matemático.

4.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS

4.2.1. Página web de Meteorología meteoblue (<https://www.meteoblue.com/>)

Meteoblue es un servicio de meteorología diseñado por la Universidad de Basilea, Suiza, en cooperación con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos y los Centros Nacionales de Predicción Ambiental.

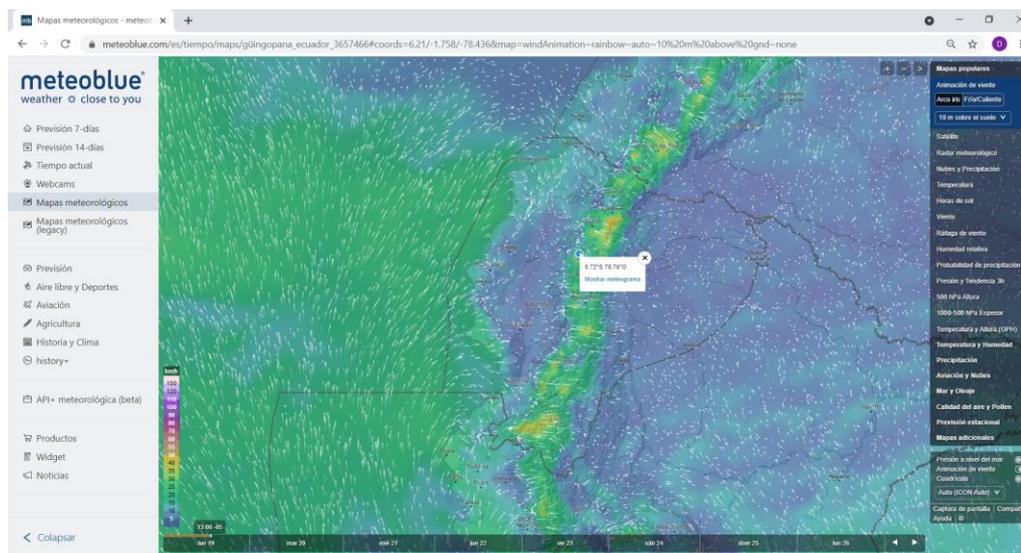


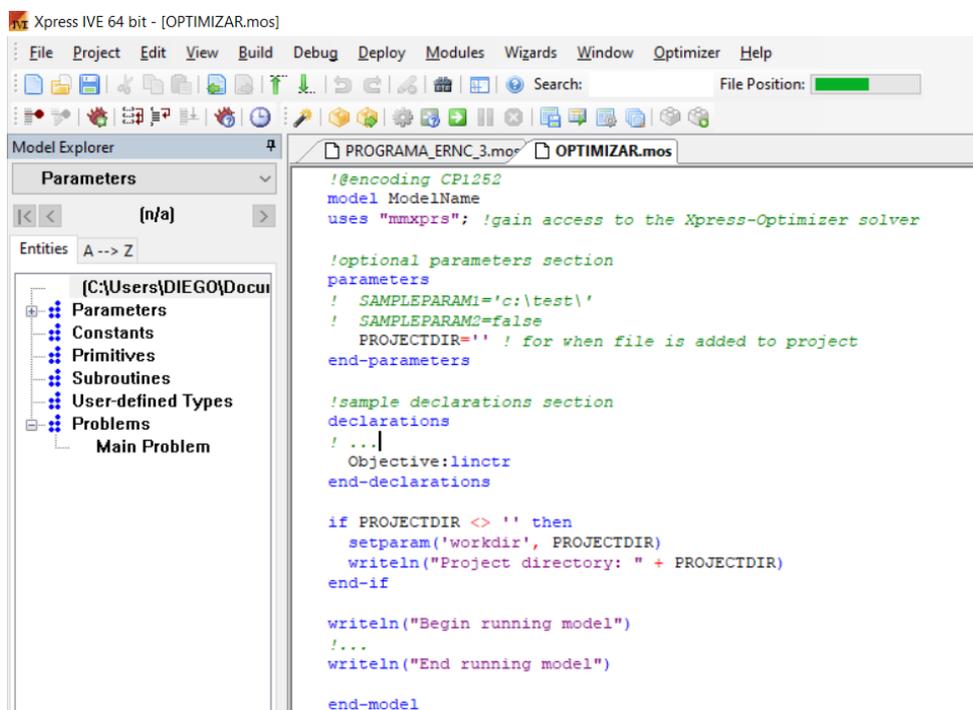
Figura 4.1. Página de meteorología meteoblue

Meteoblue permite calcular datos meteorológicos locales de alta calidad para todos los lugares del mundo. El contenido de meteoblue son diseñados para instituciones y personas que dependen del tiempo y tienen interés en la meteorología, dichos servicios están disponibles a precios asequibles, además de permitir para el público en general, información meteorológica de alta resolución, gratuita y de primera calidad.

Meteoblue utiliza ciencia y tecnología de vanguardia para calcular, visualizar y distribuir las informaciones del tiempo.

4.2.2. Software

A partir del modelo matemático de optimización se desarrollará el código correspondiente para el ED de la microrred aislada, en el software FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE que utiliza lenguaje de programación. mos, este lenguaje de optimización interpretado puede ejecutarse a través de una hoja de cálculo Excel (archivos .xls o .xlsx). Este programa permite realizar programación lineal, programación lineal entera mixta, programación cuadrática convexa, programación cuadrática restringida cuadráticamente convexa, programación de cono de segundo orden y sus contrapartes enteras mixtas[61].



```

Xpress IVE 64 bit - [OPTIMIZAR.mos]
File Project Edit View Build Debug Deploy Modules Wizards Window Optimizer Help
PROGRAMA_ERNC_3.mos OPTIMIZAR.mos
Model Explorer
Parameters
[n/a]
Entities A--> Z
[C:\Users\DIEGO\Docu
Parameters
Constants
Primitives
Subroutines
User-defined Types
Problems
Main Problem

!@encoding CP1252
model ModelName
uses "mumxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver

!optional parameters section
parameters
! SAMPLEPARAM1='c:\test\'
! SAMPLEPARAM2=false
PROJECTDIR='' ! for when file is added to project
end-parameters

!sample declarations section
declarations
! ...|
Objective:linctr
end-declarations

if PROJECTDIR <> '' then
setparam('workdir', PROJECTDIR)
writeln("Project directory: " + PROJECTDIR)
end-if

writeln("Begin running model")
!...
writeln("End running model")

end-model

```

Figura 4.2. Entorno del programa FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.

4.2.3. Datos de demanda diaria

Los datos de la curva de demanda diaria son obtenidos de un estudio de carga realizado en un sector rural, que servirán como datos de entrada en el modelo de optimización para el ED.

4.2.4. Datasheets

Se utilizan datasheets facilitados por fabricantes de Paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y baterías de litio, detallados en el Anexo F cuya información se utiliza para dimensionar potencia solar, potencia eólica, y determinar la capacidad de almacenamiento de un banco de baterías.

4.2.5. Generación diésel

Se utiliza la información de potencia y consumo de un generador diésel real el cual se detalla en el trabajo de titulación [1] para determinar los valores de los coeficientes de costos de la función cuadrática detallados en el Anexo E.

4.2.6. Artículos científicos

Los artículos científicos principalmente utilizados en el trabajo de investigación son [10],[16] ,y [1] de los cuales se utiliza las ecuaciones de función objetivo y restricciones, para desarrollar el modelo matemático de optimización el cual es resuelto con MILP.

4.3.MODELO MATEMATICO

4.3.1. Formulación Matemática

En este Trabajo de investigación se propone el desarrollo de un modelo matemático de optimización para el despacho económico mediante penetración de energía renovable no convencional. con el objetivo de minimizar los costos de operación de una microrred aislada. En el caso de estudio, los costes de operación están asociados a los costes de combustible que demanda el generador diésel.

Por lo tanto, conocidas las curvas de demanda y de la potencia generada por las fuentes de energía renovables no convencional (eólica y solar), se definen las variables de control para optimizar las potencias entregadas por el generador a diésel y el sistema de almacenamiento por baterías.

El problema de optimización se formula como un problema de programación lineal entera mixta (MILP), a razón que al investigar diversas fuentes bibliográficas se hallado que los trabajos enfocados a optimización en microrredes aisladas se resuelven con MILP. Además,

que en el modelo matemático que se plantea en este proyecto de investigación dispone de variable que adoptan valores reales enteros y binarios. Las restricciones son todas lineales.

Por otro lado, el problema de optimización analiza el costo del combustible que viene dado por una función cuadrática que es no lineal, que se hace necesario linealizarla para obtener un óptimo global y una respuesta optima. Para ello se utiliza la ecuación de la recta tangente para determinar el consumo de combustible en litros. Hay que tomar en cuenta que al realizar una optimización no lineal o heurística obtengo solo respuestas locales.

Para el diseño del modelo matemático, que se indica a continuación, la función objetivo, el balance de potencia y las restricciones que se utilizaron se basa en [10] y [16]. Se realizaron cambios en la función objetivo descrita por [10]. Los cambios realizados en la función objetivo fueron agregar el costo de consumo de combustible diésel y los costos de encendido y apagado del generador diésel que se especifican en [16].

4.3.2. Función Objetivo

La función objetivo tiene como propósito minimizar el consumo del combustible y el costo de operación de una microrred aislada para un horizonte de tiempo de 168 horas.

La función objetivo se expresa como:

$$J = \sum_{t=1}^T \left(C_D * q_t + (C_{on_d} * Y_t) + (C_{off_d} * Z_t) + C_{ENS} * P_{ENS\ t} + (CU_{BESS} * P_B^C * t * \eta^C) \right. \\ \left. + \left(CU_{BESS} * \frac{P_B^D * t}{\eta^d} \right) \right) \quad (4.1)$$

Donde:

T: Periodo de tiempo

C_D: Costo del diésel/hora

q_t: Consumo de combustible diésel en litros

C_{on_d}: Costo total de encendido del generador diésel

C_{off_d}: Costo total de apagado del generador diésel

Y_t: Variable Binaria de puesta en marcha del Generador Diesel

Z_t: Variable Binaria de apagado del Generador Diesel

C_{ENS} : Costo de energía no suministrada

P_{ENS} : Potencia no suministrada

C_{UBESS} : Costo de uso de las baterías

η^C : Eficiencia de carga

η^D : Eficiencia de descarga

4.3.3. Balance de Potencia

Se declara la ecuación de balance de potencia, donde la Generación debe ser igual a la Demanda, las variables están en función al tiempo evaluado.

$$P_{Dt} + P_{St} + P_{Wt} - P_{SHt} + P_B^D t = D_t - P_{ENS t} + P_B^C t \quad (4.2)$$

Donde:

P_{Dt} : Potencia del generador a diésel en el tiempo

P_{St} : Valor de la potencia solar en el tiempo

P_{Wt} : Valor de la potencia eólica en el tiempo

P_{SHt} : Excedente de potencia en el tiempo

D_t : Demanda en el tiempo

P_B^C : Potencia del BESS en carga en el tiempo

P_B^D : Potencia del BESS en descarga en el tiempo

Se plantea las restricciones para la potencia del generador diésel, potencia no suministrada y el excedente de potencia solar y eólica

$$P_{D_min} \leq P_{Dt} \leq P_{D_max} \quad (4.3)$$

$$0 \leq P_{ENS t} \leq D_t \quad (4.4)$$

$$0 \leq P_{SHt} \leq P_{St} + P_{Wt} \quad (4.5)$$

4.3.4. Generación diésel

El generador diésel requiere una cantidad de combustible fósil para producir energía eléctrica. La relación entre la potencia y consumo del generador se muestra en la Figura 4.3 que es una función cuadrática no lineal que requiere ser linealizada.

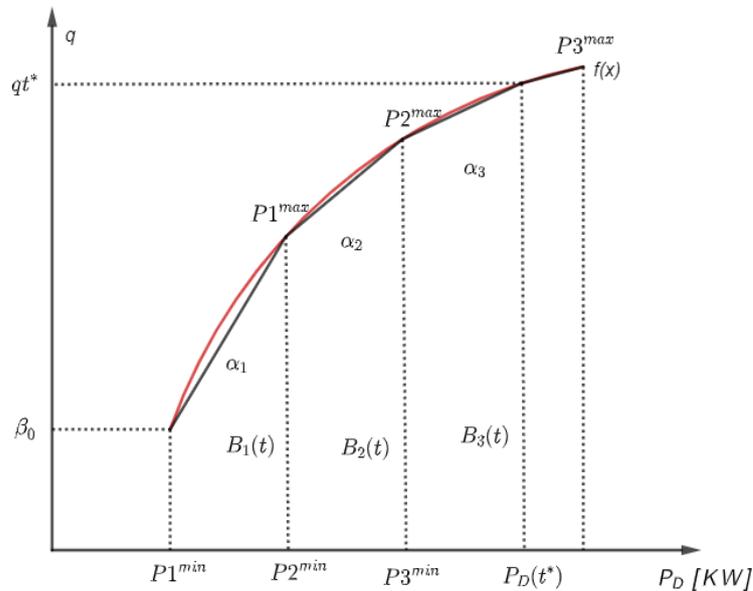


Figura 4.3. Función de costos del generador diésel [1]

4.3.5. Consumo del diésel $q(t)$

El consumo de diésel se puede modelar utilizando la ecuación. (4.5).

$$q_t = \sum_{v=1}^{nv} \alpha_v P v_t + \beta_v B v_t \quad (4.6)$$

Donde:

α_v : Pendiente

$P_v(t)$: Potencia generada en la sección linealizada

β_v : Desplazamiento de la línea desde el origen

B_v : Variable binaria en la sección linealizada

El consumo de la generación a diésel requiere la siguiente restricción

$$\sum_{v=1}^{nv} Bv_t \leq 1 \quad (4.7)$$

El valor de $B_v(t)$ es una variable binaria que tendrá el valor de 1 cuando el generador este encendido y 0 cuando el generador se apague.

Los límites de potencia del generador diésel para las secciones lineales se muestra en (4.8)

$$P_v^{min} Bv_t \leq Pv_t \leq P_v^{max} Bv_t \quad (4.8)$$

Para determinar la potencia total del generador diésel se puede aplicar la ecuación (4.8) y se puede restringir con la ecuación (4.3)

$$P_{Dt} = \sum_{v=1}^{nv} Pv_t \quad (4.9)$$

4.3.6. Costos de arranque y apagado del generador diésel

Las restricciones para calcular el costo de arranque y apagado del generador a diésel se muestran a continuación.

$$C_{on_d} * Y_t \geq C_{on_d} (Y_t - Y_{(t-1)}) \quad (4.12)$$

$$C_{off_d} * Z_t \geq C_{off_d} (Z_t - Z_{(t-1)}) \quad (4.11)$$

4.3.7. Banco de Baterías (BESS)

Se requiere calcular la energía del Banco de baterías (BESS), mediante las ecuaciones (4.12), (4.13) y (4.14).

La ecuación (4.12) determina la condición inicial del BESS, es decir permite conocer la energía del BESS en la primera hora.

$$E_t = E_0 + (P_{Bt}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{Bt}^D}{\eta^D} \right) \quad (4.12)$$

La ecuación (4.13) permite calcular la energía del BESS para el alcance del tiempo restante.

$$E_t = E_{t-1} + (P_{Bt}^C * \eta^C) - \left(\frac{P_{Bt}^D}{\eta^D} \right) \quad (4.13)$$

Con la ecuación (4.14) definimos los límites de energía del BESS.

$$E_{min} \leq E_t \leq E_{max} \quad (4.14)$$

Variables binarias del BESS

Las variables binarias permiten determinar el estado del BESS, mediante las ecuaciones (4.15), (4.16) y (4.17).

$$X_t^C + X_t^D \leq 1 \quad (4.15)$$

$$E_{min} \geq P_{Bt}^C \geq -E_{max} * X_t^C \quad (4.16)$$

$$E_{min} \leq P_{Bt}^D \leq E_{max} * X_t^D \quad (4.17)$$

4.3.8. Estado de carga (SOC)

Se El SOC_t del BESS se calcula a través de la ecuación (4.18).

$$SOC_t = \frac{E_t}{E_{max}} \quad (4.18)$$

El SOC_t puede ser limitado por la ecuación (4.19)

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (4.19)$$

4.3.9. Costo de uso del BESS (C_{U_BESS})

Se El costo de uso del BESS corresponde a una determinada potencia (P_{Bt}^C o P_{Bt}^D) que viene dada por la ecuación (4.20):

$$C_{U_BESS} = \frac{C_{I_BESS}}{E_{max} * N_{cycles}} \quad (4.20)$$

Donde:

C_{I_BESS} : Costo de inversión de BESS y

N_{cycles} : Número de ciclos de uso de BESS.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para desarrollar el modelo matemático de optimización del Despacho económico se utilizaron datos de consumo eléctrico de un sector rural, potencia eólica y potencia fotovoltaica basados en mediciones realizadas en el sector de Guingopana – Saquisilí ubicado en los puntos (0.75°S 78.77°O.), que se consideran como valores reales del sector.

El modelo matemático se evalúa en un periodo de 24 horas (un día) y 168 horas (una semana) cuyos datos de entrada son datos de demanda, potencia solar fotovoltaica, potencia eólica y Energía del BESS. Donde la demanda pico se da entre las horas 19, 20 y 21 horas, Mientras que el pico máximo de generación solar fotovoltaica se obtiene de 12 a las 13 horas del día, la potencia eólica aportara su máximo pico de generación de 6 a 7 de la mañana.

Tabla 5.1. Datos de potencia estimada

Potencia (kW)	P.min (kW)	P.max (kW)
Demanda	6,08	32,64
Solar fotovoltaica	0	42,4589
Eólica	0	1,2337

Tabla 5.2. Datos de energía del BESS estimada

BESS	Emin (kW.h)	Emax (kW.h)
BESS en carga	0	193,07
BESS en descarga	0	193,07

5.1. DATOS DE DEMANDA HORARIA

En la Figura 5.1 se muestra el comportamiento de la demanda de un día (24 horas). Dándose los mayores picos de demanda entre las 18 y 20 horas del día. En el anexo A se detallará los datos de demanda para las 168 horas.

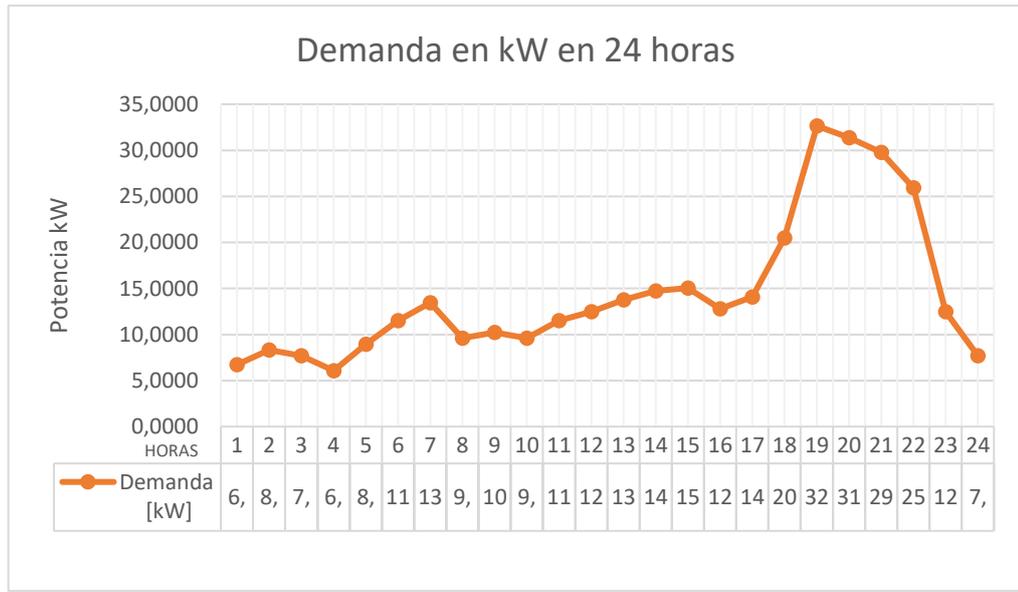


Figura 5.1. Curva de demanda eléctrica diaria

5.2. GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA.

Para dimensionar potencia solar fotovoltaica, se utiliza mediciones de irradiancia solar obtenidas de la página web de meteorología <https://www.meteoblue.com/> del sector de Guingopana. En la simulación se considera datos de irradiación difusa debido que los valores de radiación no son iguales para todos los días de la semana. Los datos de irradiación y potencia solar fotovoltaica se detallan en los Anexos B y C.

Para dimensionar la potencia fotovoltaica se utilizaron las ecuaciones (3.34) y (3.35) y los datos técnicos del panel fotovoltaico que se detalla en el Anexo F

Tabla 5.3 Parámetros para dimensionar potencia solar fotovoltaica

Coeficiente de temperatura (Ci)	-0,37
#CELDAS A12 VCC	144
NOCT	45
EFICIENCIA	22,70%
T° Ambiente (°C)	22
Módulos en serie	16
Módulos en paralelo	16
P. nominal. Modulo (W)	580

Tabla 5.3 Datos potencia solar fotovoltaica

Hora	IRRADIANCIA W/m2	°C celda (Tj)	Potencia en W	Potencia en KW
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	20	22,625	2943,50464	2,94350464
8	106	25,3125	15757,07808	15,75707808
9	177	27,53125	26527,09762	26,52709762
10	219	28,84375	32979,57442	32,97957442
11	266	30,3125	40272,01696	40,27201696
12	280	30,75	42458,89536	42,45889536
13	280	30,75	42458,89536	42,45889536
14	266	30,3125	40272,01696	40,27201696
15	278	30,6875	42146,07213	42,14607213
16	210	28,5625	31591,80192	31,59180192
17	112	25,5	16660,52506	16,66052506
18	39	23,21875	5752,555536	5,752555536
19	3	22,09375	440,650128	0,440650128
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

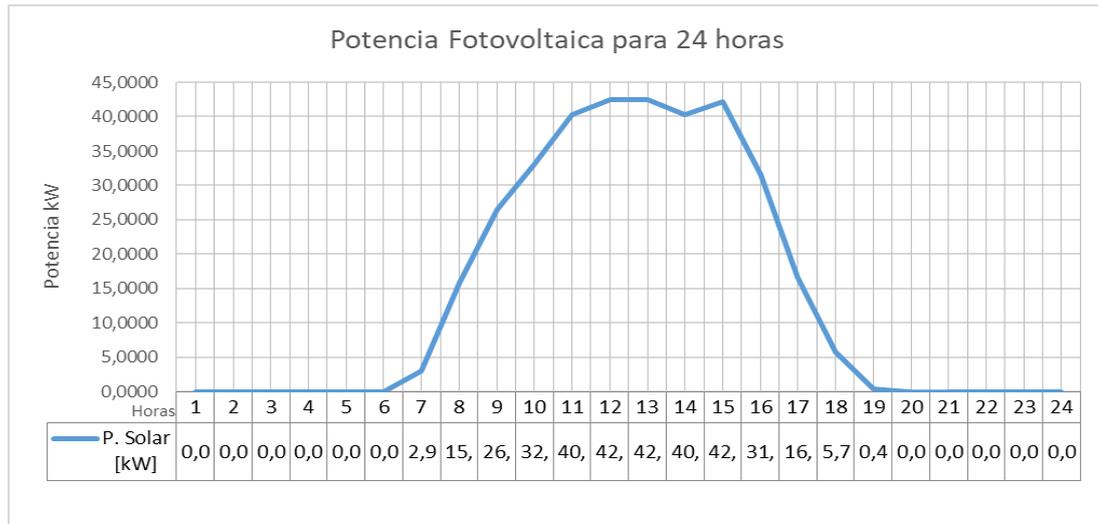


Figura 5.2. Curva de potencia solar fotovoltaica

Se puede observar en la curva de la figura 5.2 que la energía solar empieza aportar potencia eléctrica a partir de las 7 horas del día. La generación fotovoltaica alcanza su máximo pico entre las 12 y 13 horas, generando aproximadamente 42.45 kW, debido a que existe mayor radiación solar en ese periodo de tiempo. Además, se muestra que la generación fotovoltaica aportara energía eléctrica hasta la 18:30 con una potencia de 0.44 kW.

5.3. GENERACIÓN EÓLICA.

Para dimensionar potencia eólica se utilizaron los datos de velocidad del viento del sector de Guingopana, de los cuales solo se ocupará velocidades mayores a 3m/s, además se utilizó la ecuación (3.30) y datos técnicos de un aerogenerador detallado en el Anexo F.

Tabla 5.4. Parámetros para dimensionar potencia eólica

Densidad del viento (ρ)	1,29
Diámetro de turbina del aerogenerador	1,7 m
# aerogeneradores	5
Diámetro del rotor del aerogenerador	2,27 m
Radio del rotor del aerogenerador	1,14 m

Tabla 5.5. Datos de potencia eólica

Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 5 generadores kW
1	3,4713	3,47131	122,4833	122,4833	0,6124
2	3,0414	3,04138	82,3776	82,3776	0,4119
3	3,662	3,66197	143,7936	143,7936	0,719
4	3,7216	3,72156	150,9285	150,9285	0,7546
5	3,5468	3,54683	130,6524	130,6524	0,6533
6	4,1	4,1	201,8125	201,8125	1,0091
7	4,3841	4,38406	246,7326	246,7326	1,2337
8	3,7483	3,74833	154,2095	154,2095	0,771
9	3,3302	3,33017	108,1418	108,1418	0,5407
10	2,8425	0	0	0	0
11	1,6155	0	0	0	0
12	0,6083	0	0	0	0
13	2,1401	0	0	0	0
14	2,7803	0	0	0	0
15	3,4655	3,46554	121,874	121,874	0,6094
16	3,4655	3,46554	121,874	121,874	0,6094
17	2,7659	0	0	0	0
18	2,3854	0	0	0	0
19	2,1932	0	0	0	0
20	1,8868	0	0	0	0
21	1,3928	0	0	0	0
22	0,9487	0	0	0	0
23	1,562	0	0	0	0
24	1,7	0	0	0	0



Figura 5.3. Curva de generación de potencia eólica

En la figura 5.3 se muestra que la mayor potencia de generación eólica es de apenas 1.23 kW que se da en la hora 7 del día, se observa que no existe generación en los periodos de tiempo conformados de 10 a 14 horas y de 17 a 24 horas debido que esos periodos de tiempo se registra velocidades inferiores a 3m/s.

Se puede observar que el valor de potencia generada no es muy alto en comparación a la potencia solar. Los valores de velocidad de viento y potencia dimensionada se muestran en los Anexos D y E.

5.4. BANCO DE BATERÍAS (BESS)

Para calcular el número de baterías de litio que conformaran el BESS, se requiere obtener un promedio de consumo máximo de la semana, donde se determina que para este caso de estudio el consumo es de 193,072 kW.h

$$Capacidad\ total\ de\ almacenamiento = \frac{E_d * D_a}{DOD} \quad (5.1)$$

$$\#\ de\ baterias = \frac{Capacidad\ total\ de\ almacenamiento}{AH * VB} \quad (5.2)$$

Donde:

E_d : Energía máxima demandada.

D_a : Número de días de consumo eléctrico

DOD: Profundidad de descarga

AH: Amperios hora de la batería

VB: Voltaje de la batería

Tabla 5.6. Datos de la Batería de litio

TIPO	Litio LFP Smart 12,8/200 Volt/AH	
Ciclos	2000	
DOD	100%	0,01
Precio por ciclo	-	-
<i>Vb</i> Tensión de la bancada	28,4	V
<i>VB</i> Tensión de la batería	12,8	V
Capacidad de la batería:	100	AH
Eficiencia de carga / descarga	85/ 88	%

Obtenido los datos técnicos procedemos a calcular la capacidad de almacenamiento y el número de batería del BESS.

$$\text{Capacidad total de almacenamiento} = \frac{193,072 * 1\text{Dia}}{100\%} = 193,072 \text{ kW.h}$$

$$\# \text{ de baterias} = \frac{193,072 \text{ kW.h}}{100 \text{ AH} * 12.8\text{V}} = 150,84 \text{ Baterias}$$

$$\# \text{ de baterias} = 151 \text{ Baterias}$$

Se estima un precio aproximado de \$1000 por batería para calcula el precio total del BESS

$$\text{Precio estimado del BESS} = 151 * \$1000 = \mathbf{\$151000}$$

Finalmente determinamos el valor de costo de uso del BESS con la ecuación (4.20)

$$C_{U_BESS} = \frac{C_{I_BESS}}{E_{max} * N_{cycles}} \quad (4.20)$$

$$C_{U_BESS} = \frac{151000}{193.072 * 2000} = 0,69$$

Al aplicar las ecuaciones correspondientes obtendremos una capacidad de almacenamiento de 193,072 kW.h, se almacenarán en 151 baterías de litio de 12V a 2000 ciclos.

5.5. GENERACIÓN A DIÉSEL

Al aplicar la ecuación de la recta tangente se obtiene los valores de αv y βv , por lo tanto, se obtiene una función de costos cuadrática de la curva de consumo de un generador diésel con una potencia mínima de 5 kW una potencia máxima de 109 kW tomado de [1]:

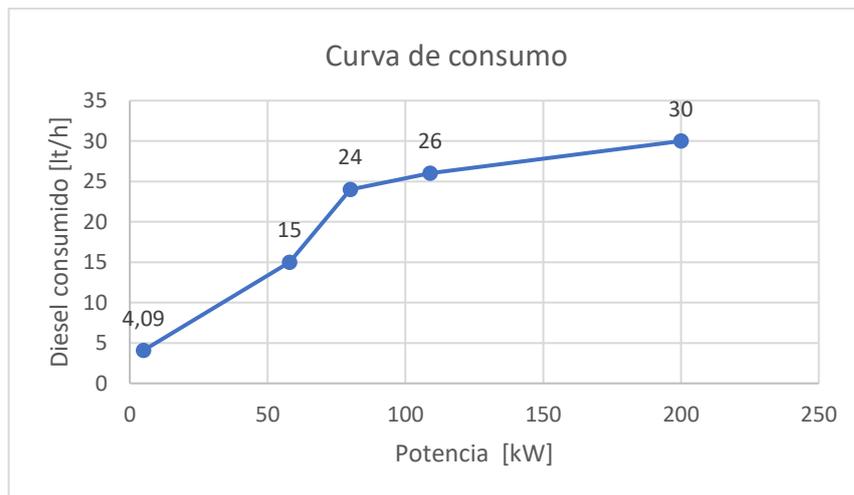


Figura 5.4. Curva de consumo del generador diésel [1]

Según el análisis de la gráfica obtenemos los siguientes datos de potencia y consumo:

Tabla 5.7. Valores de la curva del generador diésel

X	Y
P(kW)	qt (l/h)
5	4,09
58	15
80	24
109	26

Determinamos los valores de pendiente y b con la ecuación de la recta los cuales se visualizan en la tabla 5.8.

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (5.4)$$

$$b = Y - mx \quad (5.5)$$

Tabla 5.8. Valores de m y b de la curva de consumo

	m	b
L1	0,20584906	3,06075472
L2	0,40909091	-8,72727273
L3	0,06896552	18,4827586

Cálculo de los coeficientes a, b y c

El valor del coeficiente a toma el valor de **b** que es el punto de intersección entre la recta y el eje Y por lo que **a= 3,06075472**

Procedemos a calcular los valores de b y c para la función de costos con las ecuaciones (5.5), (5.6) .

$$z = \frac{Y - a}{X} \quad (5.5)$$

$$c = \frac{z - b}{X} \quad (5.6)$$

Tabla 5.9. Valores de b y c

X =P	Y=q	Z=b	c
5	4,09	0,205849057	0,014230566
58	15	0,205849057	0,001226773
80	24	0,261740566	0,001588054
109	26	0,210451792	0,000695005

El coeficiente b tomara el valor de z calculado en la potencia máxima $P_{\max} = 109\text{kW}$ donde $b = 0,210451792$

El coeficiente c tomara el valor calculado en la potencia máxima $P_{\max} = 109\text{kW}$ donde $c = 0,000695005$

Remplazamos los valores a , b y c en la función cuadrática.

$$C(PGi) = a + bP + cP^2 \quad (5.7)$$

De esta manera obtendremos la siguiente función de costos.

$$CPg = 3,061 + 0,211Pv + 0,000695 P v^2$$

De esta función podremos determinar los valores de α_v y β_v requeridos en la ecuación (4.6)

Obtenido la función de costos podemos linealizarla con la ecuación de la recta tangente para obtener valores de pendiente y b

$$F(x) \approx F_{(x_0)} + \frac{df}{dx}(x_0) * (x - x_0)$$

Al realizar las distintas operaciones obtendremos valores para $F_{(x_0)}$

$$F_{(x_0)} = a + bPv + cPv^2 = Y_1$$

Para obtener la pendiente derivamos la función cuadrática

$$\frac{df}{dx}(x_0) = \frac{df}{dx}(a + bPv + cPv^2) = m = \alpha_v$$

Al reemplazar $F_{(x_0)}$ y m en la ecuación (5.8) se podrá determinar α_v y β_v

$$F_{(x)} = Y_1 + \alpha v(Pv_t - Pv)$$

$$\alpha_v = m$$

$$b = \beta = (Y_1 - \alpha v * Pv)$$

Remplazamos los valores de αv y βv en la ecuación de consumo diésel

$$q(t) = \sum_{v=1}^{nv} \alpha_v P_v(t) + \beta_v B_v(t)$$

5.6. COSTOS DE LA MICRORRED

5.6.1. Costos de generación diésel.

Los costos del combustible diésel utilizados para la generación se basa en el precio establecido por EEUU el cual establece un costo internacional para este combustible. Los precios se detallan en la tabla 5.7.

Tabla 5.10. Precio internacional del diésel.

Precio del diésel * Galón	\$ 3,40
Precio del diésel * litro	\$ 0,86

5.6.2. Costo de encendido y apagado del generador diésel.

Para determinar el costo de encendido del generador diésel se consideró el precio de un litro de combustible multiplicado por cinco, debido que una maquina eléctrica consume cinco veces mas la corriente nominal para su arranque. Mientras que para el costo de apagado se establece el 75% del costo de encendido

Tabla 5.11. Precios de encendido y apagado del generador diésel.

Costo de encendido del generador diésel	\$ 4.30
Costo de apagado del generador diésel	\$ 3.22

Cabe señalar que los costos están siendo determinados en litros debido a que el análisis realizado por [1] al generador diésel trabaja en litros/horas.

5.6.3. Costo de energía no suministrada (CENS)

Para el costo de energía no suministrada se considera de 3 a 10 veces más el precio del kW.h. Para calcular el CENS se consideró el precio del litro de diésel por 10, a razón que en el caso de estudio es la única energía que tiene un costo directo. El CENS determinado es de \$8.60 por kW.

5.6.4. Costos de excedente de potencia de ERNC (PSH)

Para el costo del PSH se considera un costo cero debido que las energías renovables (solar y eólica) utilizadas en el despacho económico no tienen un costo de utilización.

5.6.5. Resumen de costos y parámetros

Tabla 5.12. Valores del BESS

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Costo de inversión del BESS	CI_{BESS}	151000	\$
Energía nominal del BESS	E_{max}	193.07	kW.h
LIFE TIME	N_{cycles}	2000	Ciclos
Porcentaje de degradación	$\% degradación$	80	%
Eficiencia de descarga	n^D	88	%
Eficiencia de carga	n^C	85	%
Mínimo estado de carga	SOC_{min}	0	%
Máximo estado de carga	SOC_{max}	100	%

Tabla 5.13. Costos asociados

Nombre	Variable	Valor	Unidad
Costo de combustible litros	C_D	0.86	\$
Costo de combustible Galones	C_D	3.40	\$
Costo de encendido del generador diésel	C_{on_d}	4.30	\$
Costo de apagado del generador diésel	C_{off_d}	3.22	\$
CENS	C_{ENS}	8.60	\$
Costo del PSH	C_{PSH}	0	\$

5.7. RESULTADOS DEL DESPACHO ECONÓMICO.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del estudio de caso realizado, en el cual se detalla el despacho económico realizado para dos días independientes y una semana obtenidos de la simulación realizada en el programa FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.

5.7.1. Despacho Económico realizado para el día 1 y el día 7

En la figura 5.5 y 5.6 se muestra las curvas de potencia disponible que alimentan a una demanda de 24 horas correspondientes a los días 1 y 7 respectivamente. Donde se observa que la energía solar fotovoltaica genera la mayor potencia, permitiendo suministrar de energía eléctrica al sistema aproximadamente doce horas seguidas que van desde las 7 a las 18 horas, periodo en cual también se carga la energía del BESS el cual aportara energía eléctrica exponencialmente desde las 17 horas hasta hora 24 aproximadamente, luego de la hora 24 el generador diésel cubrirá la demanda restante hasta la hora 7 del siguiente día, mientras que la energía eólica genera la menor potencia eléctrica en el sistema la cual respalda al suministro de energía para cubrir la demanda. Esta dinámica se desarrollará de manera similar para todos los días de la semana, debido a que los recursos de energía renovable (Solar y eólica) varían para los diferentes días.

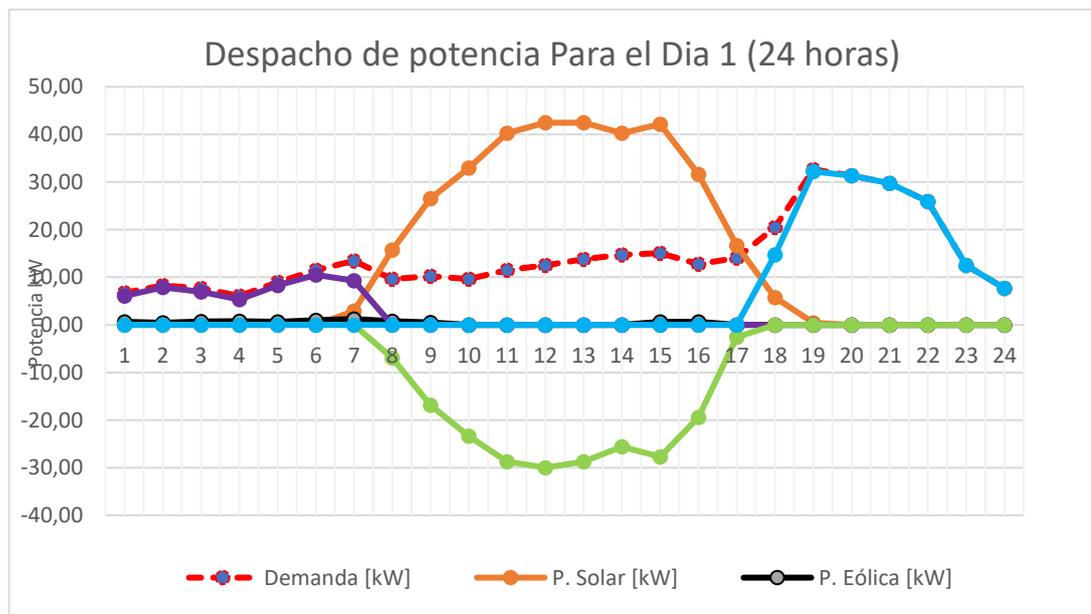


Figura 5.5. Despacho de potencia para 24 horas día 1

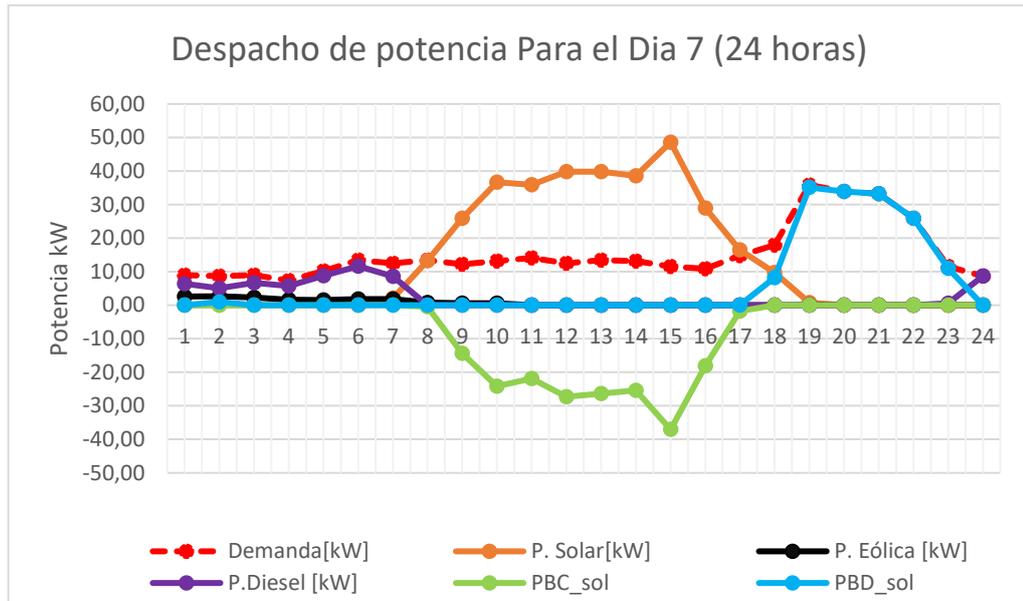


Figura 5.6. Despacho de potencia para 24 horas día 7

En la figura 5.7 se analiza las curvas de despacho económico para un periodo de 168 horas en el cual se demuestra que el comportamiento del sistema es similar para todos los días, donde las diferentes tecnologías de generación eléctrica cubren la demanda con los siguientes porcentajes: Potencia solar 60,27%, BESS 26,84%, Generación diésel 10,48% y Potencia eólica representa un 2,41%. En las tablas 5.14 y 5.15 se presentan datos de demanda eléctrica y aporte de potencia generada en kW y en porcentaje. Cabe mencionar que la potencia del BESS en carga también es considerando como demanda debida que las baterías absorberán potencia para recuperar su energía perdida.

Tabla 5.14. Datos de Demanda eléctrica

Demanda del sector	2457,2800	kW
BESS en carga	1375,5099	kW
Demanda total	3832,7899	kW

Tabla 5.15. Datos de aporte de potencia.

	kW	%
Potencia Solar Fotovoltaica	2310,0853	60,27
Potencia Eólica	92,2719	2,41
Diesel	401,5513	10,48
BESS en descarga	1028,8814	26,84

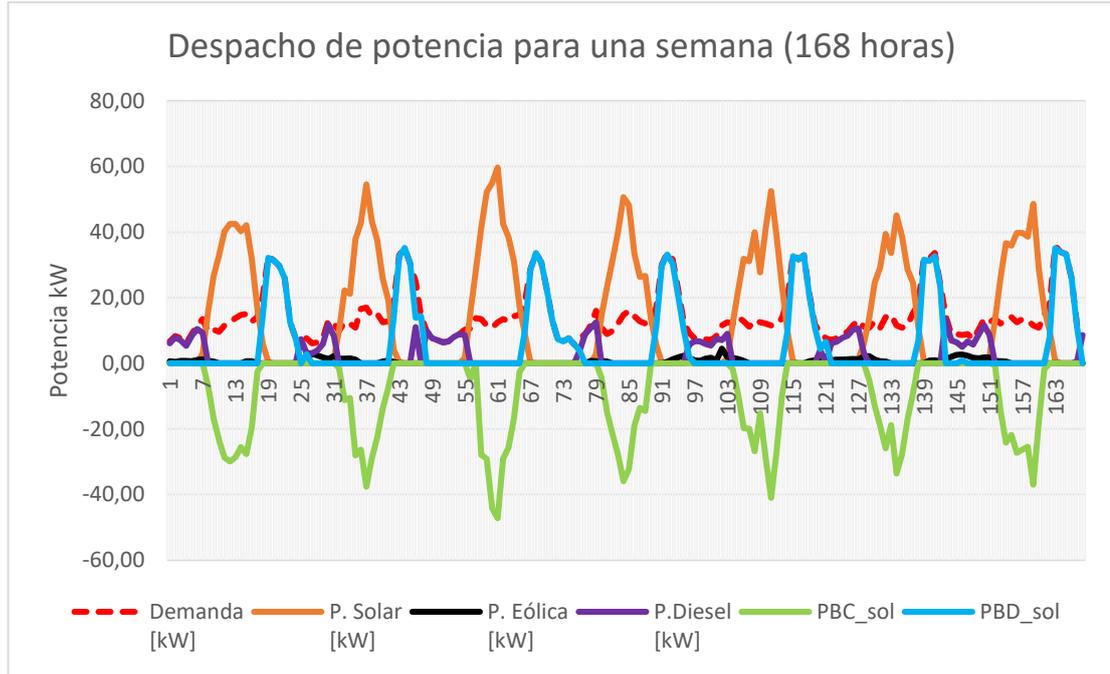


Figura 5.7. Despacho de potencia para una semana (168 horas)

El resultado de la optimización del despacho económico muestra que se aprovechó completamente las energías renovable no convencionales (solar y eólica), para suministrar de energía eléctrica a la demanda de la microrred aislada, con el fin de depender en lo mínimo de la generación a diésel, ya que es el único recurso energético que tiene un precio, cuyo consumo es reducido en la función objetivo.

Como resultado del modelo de despacho económico de la microrred simulado en FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE, se obtuvo un costo de \$1607,83 cuyo valor refleja los costos operacionales de una semana (168 horas).

Los costos que se generan al ocupar la generación diésel en la semana son de \$570,77 mientras que el costo de generación con energías renovables (solar y eólica) no se establece un precio debido a que están no tienen costo de operación. El BESS genera un costo de \$1037,07.

5.7.2. Análisis de carga y descarga de la batería

En la siguientes graficas 5.8 y 5.9 se presenta las curvas de carga y descarga del BEES para un periodo de 24 horas (1 día) y otro de 168 horas (una semana) respectivamente, en las cuales se observan que las baterías alcanzan su mayor carga de energía a las 12 horas del día, ya que es el periodo de mayor irradiación solar que permite generar la potencia necesaria para cubrir

la demanda y recargar la energía del BESS. Mientras que a partir de la hora 18 empezará a descargarse, alcanzado su descarga completa a la hora 24 aproximadamente.

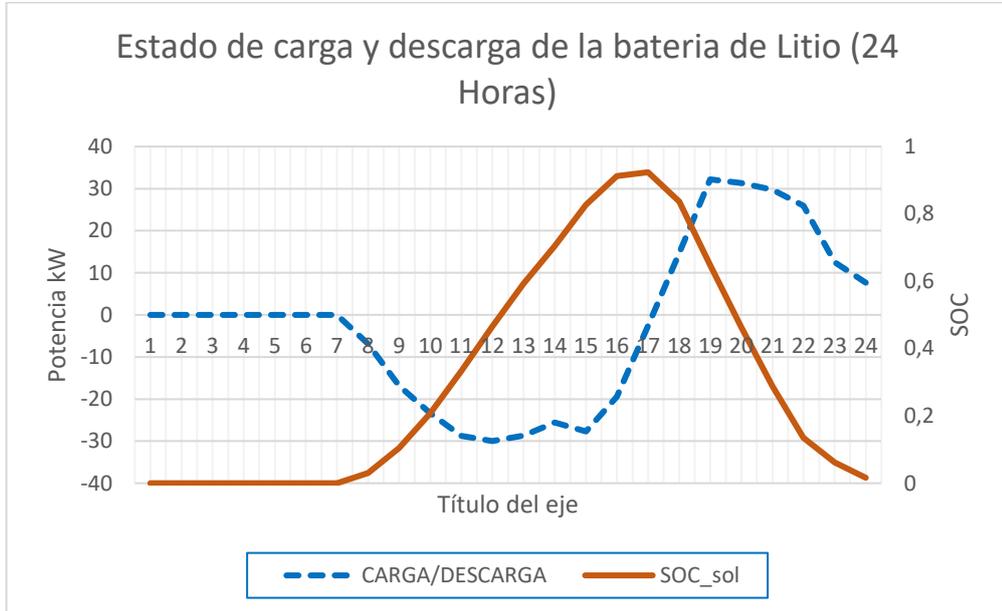


Figura 5.8. Graficas de carga y descarga del BESS para un periodo de 24 horas

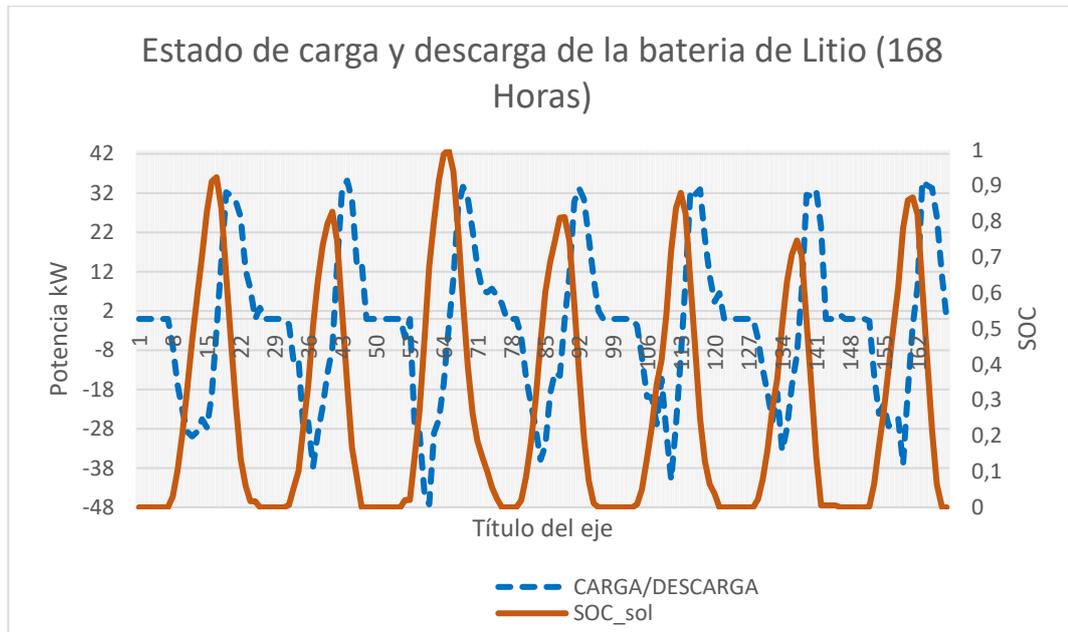


Figura 5.9. Graficas de carga y descarga del BESS para un periodo de 168 horas

5.7.3. Análisis de Excedente de Potencia (Vertimiento)

En la figura 5.10 se observa un excedente de potencia generada por los las energías renovables no convencionales (solar + eólica) representado por una curva de color verde cuya energía es vertida debido a que la generación disponible es mayor a la demanda de la microrred.

El vertimiento de energía se genera en la hora 57 y 59 de la semana dado que el recurso solar disponible es mayor en comparación de los otros días.

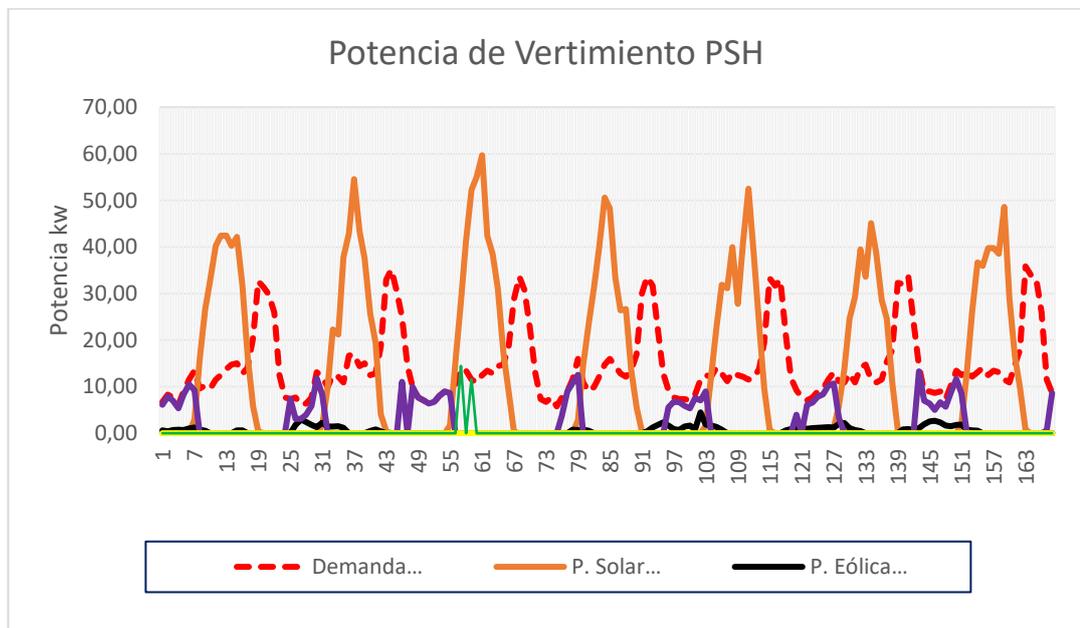


Figura 5.10. Vertimiento de energía.

5.7.4. Análisis de consumo de combustible diésel.

La curva de la figura 5.11 muestra el consumo de combustible del generador diésel, para un periodo de un día (24 horas) donde el mayor consumo se genera a las 6 de la mañana, además se observa que el consumo tiende a cero a partir de las 8 de la mañana, debido a que empieza a ver recurso solar el cual permite generar la potencia necesaria para alimentar a la carga. Mientras tanto en la figura 5.12 se detalla el precio de se deberá pagar por el consumo del combustible diésel.

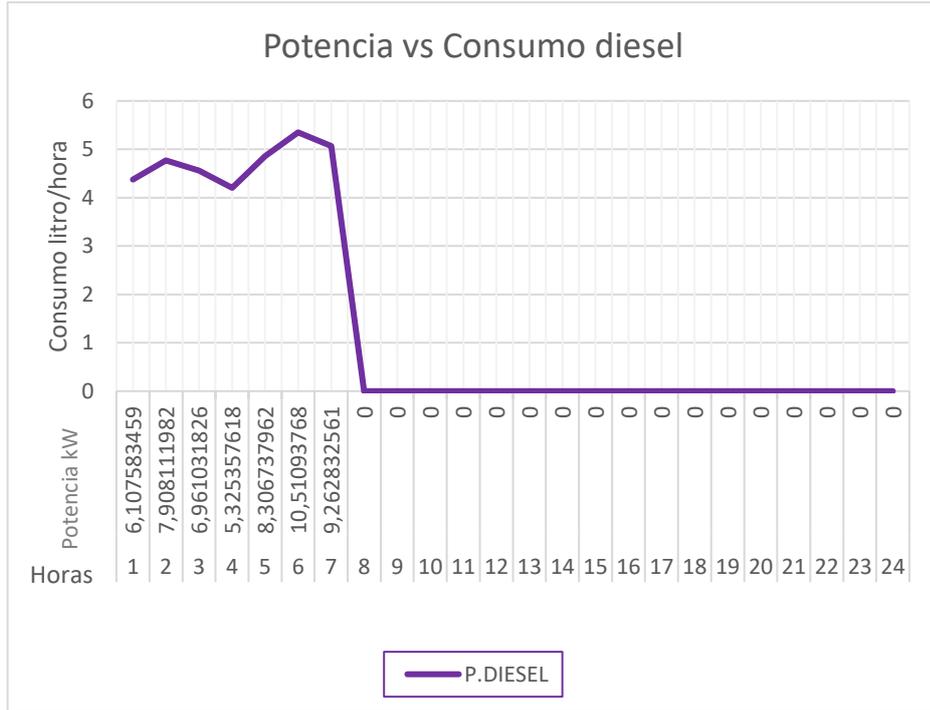


Figura 5.11. Curva de Potencia vs Consumo diésel

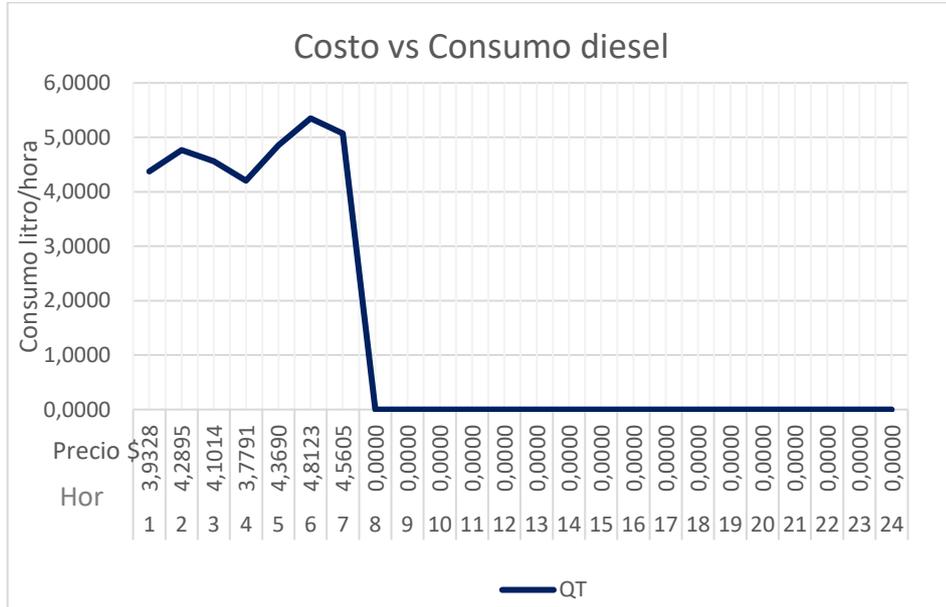


Figura 5.12. Costo vs Consumo diésel

5.8. VALIDACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO

Para la validación del modelo matemático no se puede evaluar directamente con trabajos similares debido a que la función objetivo y las restricciones son diferentes, además no se tiene acceso al algoritmo desarrollado por los autores, sin embargo, se puede realizar una comparación con las curvas de optimización de despacho económico de la microrred aislada. A continuación, se presentan tres trabajos de investigación que son artículos indexados de excelencia mundial publicados en la revista IEEE XPLORE, y se compara con el presente trabajo de investigación.

5.8.1. Comparación de resultados 1

Se realiza una comparación de resultados con el trabajo de investigación de [16] el cual propone una formulación de despacho económico para la gestión óptima de una microrred aislada, en donde se considera una formulación entera mixta, una linealización de la función de costo del generador diésel, una eficiencia de carga y descarga del (BESS) y los tiempos mínimos de arranque y apagado, del generador diésel.

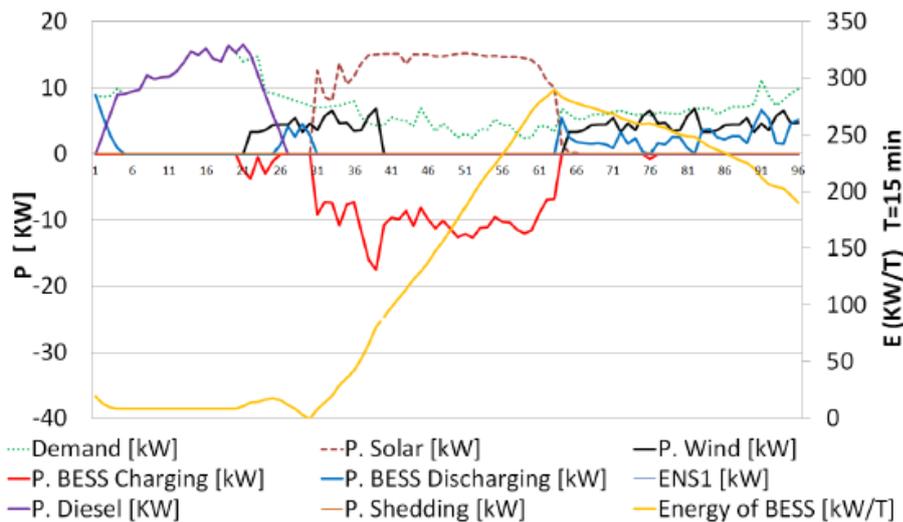


Figura 5.13. Despacho económico de microrred de un nodo [16]

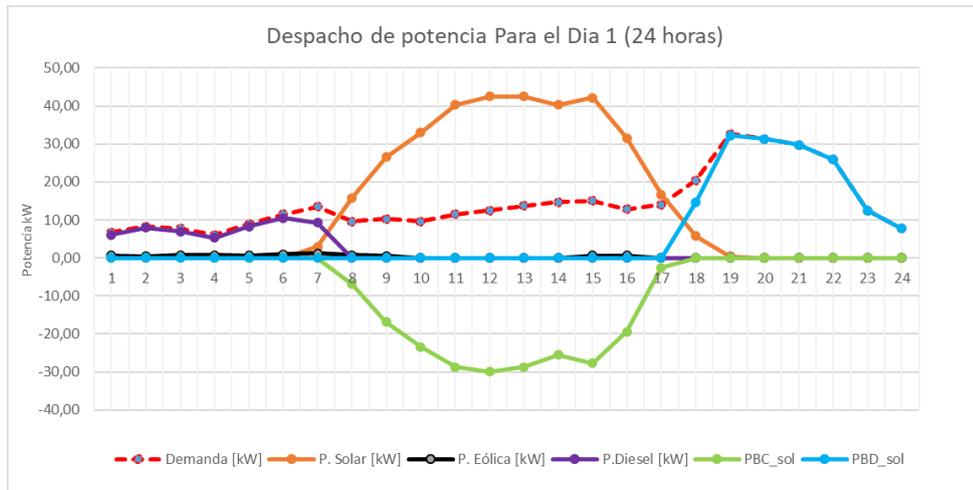


Figura 5.6. Despacho de potencia para 24 horas día 1

Se puede observar que las curvas de potencia de la figura 5.6 tiene un comportamiento similar a las curvas de la figura 5.13, ya que en ambos casos la energía solar aporta la mayor potencia que alimenta a la demanda y carga la energía del BESS. El generador diésel alimenta la carga en un tiempo limitado de aproximadamente 7 horas seguidas. tiempo después el generador se apaga para que las energías renovables (solar y eólica), y el BESS empiecen alimentar la demanda.

5.8.2. Comparación de resultados 2

Para realizar la segunda comparación de resultados del modelo matemático se utiliza los resultados de despacho óptimo descritos en la publicación de [10] el cual propone una metodología para determinar la gestión energética óptima de la Microred que es resuelto con programación lineal entera mixta, donde la función objetivo es diseñada para proteger el BESS debido a este se considera el elemento más caro de la microrred.

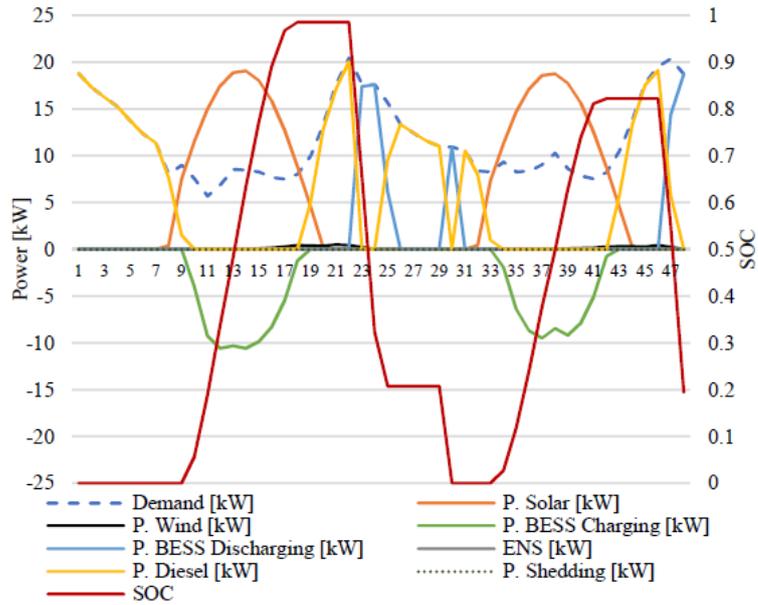


Figura 5.14. Despacho económico de 48 horas que muestra el comportamiento del BESS en microrredes aisladas[10]

Se observa que las curvas de la figura 5.14 tienen un comportamiento similar a las curvas presentadas en las figuras 5.7 y 5.13. Por lo cual se puede decir que el despacho óptimo de potencia para el estudio realizado es correcto.

A continuación, se presenta el estado de carga y descarga del BESS del caso de estudio realizado, el cual se compra con el resultado obtenido por [10], donde se muestra la relación entre la potencia combinada del BESS en carga (-), descarga (+) P_{B_t} y el estado de carga (SOC).

El comportamiento del BESS en modo de carga y descarga representado por las curvas de las figuras 5.9 y 5.15 son similares, en la cuales se muestra que las baterías adquieren su mayor carga en el periodo de 12 a 3 pm del día, mientras que la descarga empieza a generarse a partir de la hora 17 aproximadamente. Por lo que se concluye que el estado carga del BESS se da en las horas de mayor radiación solar mientras que la descarga empezara entre las horas de la tarde y noche.

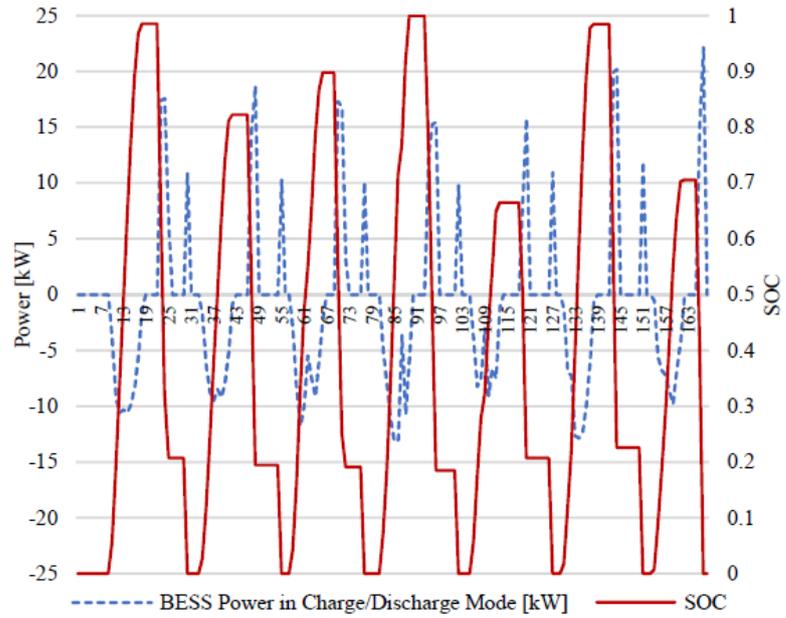


Figura 5.15. Ciclo de uso de BESS durante una semana (168 horas)[10]

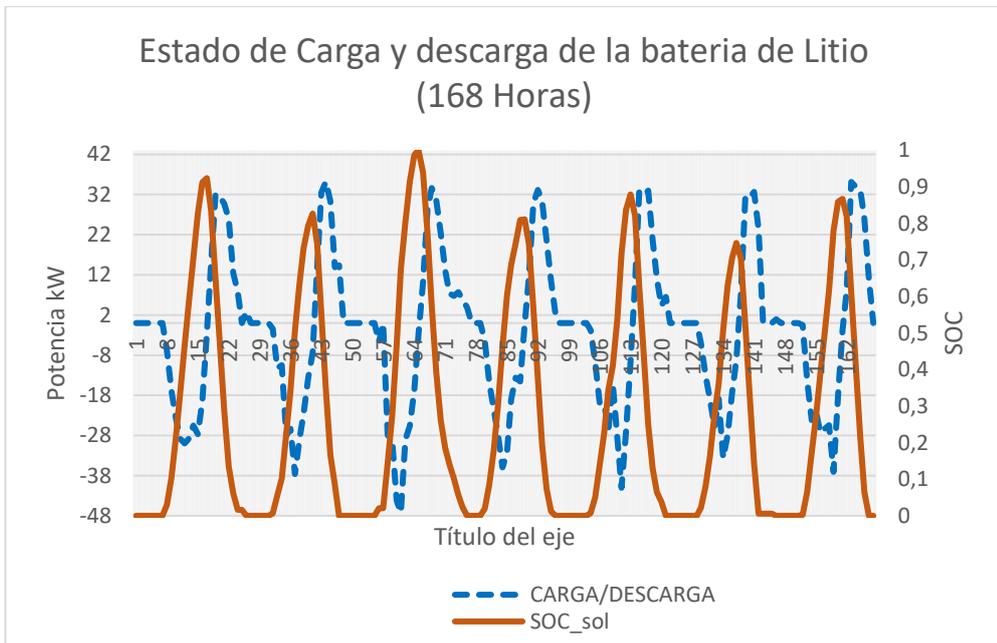


Figura 5.9. Graficas de carga y descarga del BESS para un periodo de 168 horas

5.8.3. Comparación de resultados 3

En este apartado se analiza las curvas de despacho económico de un trabajo de investigación realizado por [62] en el cual se plantea un modelo de optimización para el despacho económico de una microrred bajo la descripción de la función objetivo de minimización de costos operativos, teniendo en cuenta sus respectivas restricciones[62]

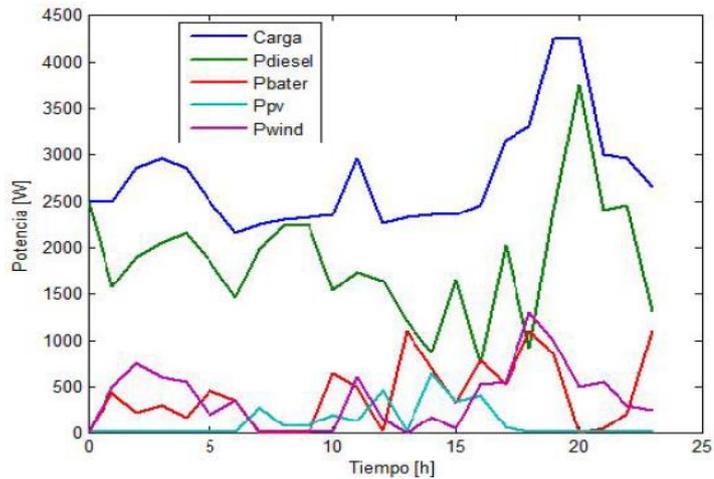


Figura 5.16. Gestión de potencia con mayor peso solar eólica [62]

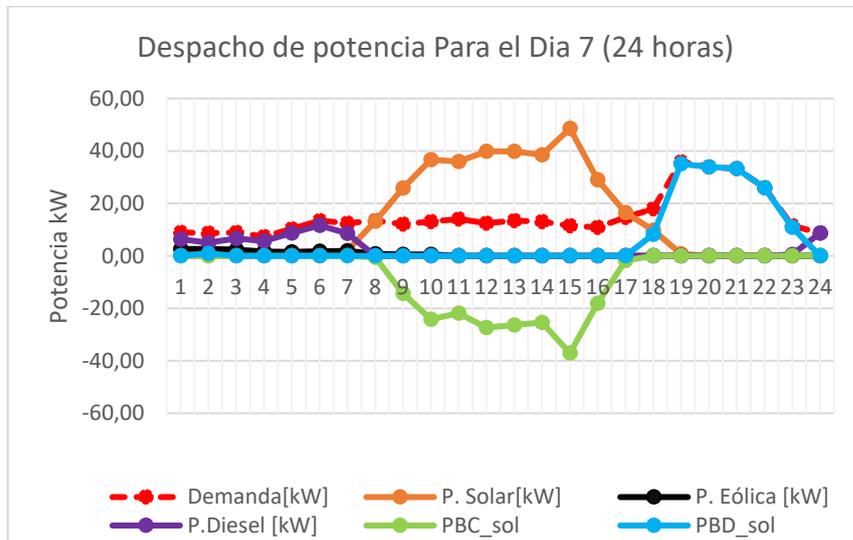


Figura 5.6. Despacho de potencia para 24 horas día 7

De acuerdo a las gráficas presentadas se puede ver que la demanda es cubierta por la generación convencional (diésel), Energías renovables (solar y eólica) y baterías. Entonces se puede decir que el despacho económico realizado en caso de estudio realizado se comporta de manera similar a los resultados publicados por otros autores.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

En el estado del arte se logró identificar que muchos investigadores aplican los modelos de optimización para despacho económico mediante energías renovables no convencionales en el cuidado del sistema de almacenamiento que son las baterías en carga y descarga para alargar su vida útil, consumo del combustible, arranque y apagado del generador diésel con el propósito de minimizar los costos, en microrredes multimodo para evaluar las pérdidas en las líneas mediante flujos AC y DC. Por lo general el tiempo de evaluación va desde 24 horas hasta una semana, es decir a corto plazo.

Se planteó un problema de optimización para resolver el despacho económico de una microrred aislada mediante programación lineal entera mixta (MILP), ya que esta programación permite obtener un óptimo global y una respuesta optima, al contrario, al realizar una optimización no lineal o heurística se obtiene solo respuestas locales, por lo que se hizo necesario linealizar la función cuadrática de costos del generador diésel.

La formulación del modelo matemático de despacho económico incluye restricciones para la función objetivo y el balance de potencia los cuales permiten limitar a las distintas variables como son el consumo de combustible, el encendido y apagado del generador, la potencia no suministrada, el excedente de energía renovable (solar + eólica) y la energía del banco de baterías (BESS).

Los valores de demanda, potencia solar, potencia eólica y la energía máxima del BESS se consideran como parámetros de entrada los cuales son indispensables para realizar el despacho económico diario. Además, los costos del diésel litro/hora, costos de encendido y apagado del generador diésel, costo de energía no suministrada, costo de uso del BESS, y valores de eficiencia de carga y descarga son constantes es decir su valor es fijo durante el análisis del despacho económico.

Se simuló y se evaluó los resultados del modelo matemático por medio de un caso de estudio, obteniendo como resultado un despacho económico óptimo para 168 horas (1 semana), donde se pudo evidenciar mediante las gráficas que la demanda es mayoritariamente cubierta por las ENRC. La simulación realizada demostró que las tecnologías de generación cubren la demanda con los siguientes porcentajes, la energía solar 60,27%, el BESS 26,84%, el generador diésel 10,48% y la energía eólica aporta un 2,41%.

La energía de vertimiento fue mínima con un porcentaje de 0,68% y se observó que incrementa conforme la energía fotovoltaica va en aumento. Además, se comparó los resultados de las curvas de despacho de potencia con artículos indexados de excelencia mundial publicados en la revista IEEE EXPLORE enfocados en la optimización del despacho económico en microrredes aisladas. Cumpliendo de esta manera satisfactoriamente los objetivos planteados.

6.2. RECOMENDACIONES

Para la investigación bibliográfica referida a optimización de despacho económico en microrredes aisladas se recomienda analizar profundamente conceptos matemáticos de optimización, linealización de funciones no lineales, y programación lineal entera mixta, ya que estos conceptos son una base fundamental para el desarrollo para este tipo de trabajos de investigación como son el desarrollo de modelos matemáticos de optimización.

En el desarrollo del modelo matemático de optimización es importante diferenciar constantes de variables debido que una constante es un valor fijo conocido y la variable es el valor desconocido que varía en diferentes periodos de tiempo y requiere determinarse, además es necesario plantear correctamente la función objetivo ya que esta determina si se maximiza la producción o minimiza costos operativos, finalmente se debe formular de manera correcta las restricciones que limitaran a las variables a calcularse, ya que si no se declaran correctamente dichas restricciones el modelo de optimización puede generar diversos errores y caer en un bucle infinito.

Para realizar el caso de estudio es necesario buscar un lugar que posea un buen recurso de energías renovables (solar y eólica), ya que con dichas energías se podrá dimensionar la potencia necesaria para cubrir la demanda de la microrred. Para la generación diésel recomendamos restringir el uso del generador a un tiempo determinado con el fin de alargar su tiempo de vida. Finalmente se recomienda comparar los resultados del despacho óptimo obtenido con trabajos similares enfocados al estudio de microrredes.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Palma-Behnke *et al.*, “A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 996–1006, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2231440.
- [2] Carlos Batlle, “Análisis del impacto del incremento de la generación de energía renovable no convencional en los sistemas eléctricos latinoamericanos Herramientas y metodologías de evaluación del futuro de la operación, planificación y expansión,” <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/An%C3%A1lisis-del-impacto-del-incremento-de-la-generaci%C3%B3n-de-energ%C3%ADa-renovable-no-convencional-en-los-sistemas-el%C3%A9ctricos-latinoamericanos.pdf>, Jan. 2014. .
- [3] C. Bordons, F. García-Torres, and L. Valverde, “Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,” *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 12, no. 2, pp. 117–132, 2015, doi: 10.1016/j.riai.2015.03.001.
- [4] A. Clavijo, “DESPACHO ECONÓMICO DE UNA RED DE ENERGÍA ELÉCTRICA TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN,” Bogotá DC, 2015.
- [5] D. Arango, R. Urrego, and S. Rivera, “Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, no. 25, Apr. 2017, doi: 10.17230/ingciencia.13.25.5.
- [6] N. Y. Gonzalez Castro, C. A. Cusquen Gomez, E. A. Mojica Nava, and F. A. Pavas Martinez, “Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, no. 2, Sep. 2017, doi: 10.18273/revuin.v16n2-2017009.
- [7] V. A. Gómez, C. Hernández, and E. Rivas, “La Influencia de los Niveles de Penetración de la Generación Distribuida en los Mercados Energéticos,” *Información tecnológica*, vol. 29, no. 1, Feb. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000100117.
- [8] J. Arévalo, F. Santos, and S. Rivera, “Aplicación de Costos de Incertidumbre Analíticos de Energía Solar, Eólica y Vehículos Eléctricos en el Despacho Óptimo de Potencia,” *Ingeniería*, vol. 22, no. 3, Sep. 2017, doi: 10.14483/23448393.11673.
- [9] J. A. Alarcon, S. R. Rivera, and F. Santamaria, “Estrategias para el despacho económico con fuentes renovables intermitentes,” *Visión electrónica*, vol. 12, no. 2, Nov. 2018, doi: 10.14483/22484728.14072.
- [10] D. Jimenez, D. Ortiz-Villalba, A. Perez, and M. E. Orchard, “Lithium-ion Battery Degradation Assessment in Microgrids,” Nov. 2018, doi: 10.1109/ROPEC.2018.8661410.
- [11] G. JÁUREGUI, “PROGRAMACIÓN DE RECURSOS PARA UNA ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA POR LA PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN MICRO-REDES,” Quito, 2018.
- [12] G. ARGUELLO, “ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA Y DESPACHO ECONÓMICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MICRO REDES BASADOS EN ÁRBOLES DE DECISIÓN ESTOCÁSTICA,” Quito, 2018.
- [13] J. JAMAICA, “ESTRATEGIAS DE OPERACION OPTIMAS DE MICRORREDES CONECTADAS A LA RED,” SANTIAGO DE CALI, 2019.

- [14] J. Wang and F. Yang, “Optimal capacity allocation of standalone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimisation algorithm,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, no. 5, Sep. 2013, doi: 10.1049/iet-rpg.2012.0329.
- [15] R. Dufo-López and J. L. Bernal-Agustín, “Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems,” *Renewable Energy*, vol. 33, no. 12, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.renene.2008.02.027.
- [16] J. L. Proano, D. O. Villalba, D. Saez, and D. O. Quero, “Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids,” Nov. 2016, doi: 10.1109/CONCAPAN.2016.7942382.
- [17] Z. Li, C. Zang, P. Zeng, H. Yu, and S. Li, “Agent-based distributed and economic automatic generation control for droop-controlled AC microgrids,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, Nov. 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0418.
- [18] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, “Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects,” *Applied Energy*, vol. 222, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.
- [19] G. Davis, “Integration of Distributed Energy Resources The CERTS MicroGrid Concept CALIFORNIA ENERGY COMMISSION CONSULTANT REPORT,” 2003.
- [20] Y. LI and F. NEJABATKHAH, “Overview of control, integration and energy management of microgrids,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, no. 3, Sep. 2014, doi: 10.1007/s40565-014-0063-1.
- [21] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J.-W. Jung, “AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.03.067.
- [22] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier, “A literature review of Microgrids: A functional layer based classification,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.025.
- [23] E. Unamuno and J. A. Barrena, “Hybrid ac/dc microgrids—Part I: Review and classification of topologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.194.
- [24] Á. Rodríguez del Nozal, D. Gutiérrez Reina, L. Alvarado-Barrios, A. Tapia, and J. M. Escaño, “A MPC Strategy for the Optimal Management of Microgrids Based on Evolutionary Optimization,” *Electronics*, vol. 8, no. 11, Nov. 2019, doi: 10.3390/electronics8111371.
- [25] E. NORVENTO, “Sistemas de microrredes renovables,” <https://www.norvento.com/autoconsumo/microrredes/>, Jul. 2021. .
- [26] J. Dominguez, J. A. Guerra, A. María, and M. Avila, “Energías renovables y generación distribuida,” 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/327744539>.
- [27] P. Vázquez, “Optimización del Despacho Económico de una microrred,” Andalucía, 2020.
- [28] M. Badii, A. Guillen, and O. Lugo Serrato, “Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies,” 2015.
- [29] P. Capstone, “Capstone Microturbines,” <https://www.capstonegreenenergy.com/products/energy-conversion-products/capstone-microturbines/c1000s>, 2021. .
- [30] J. Zhu, “Application of Renewable Energy,” in *OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

- [31] L. OJEA, “EUROPA HA PERDIDO LA BATALLA DE LAS BATERAS DE ION-LITIO CONTRA LOS PAÍSES ASIATICOS,” <https://elperiodicodelaenergia.com/europa-ha-perdido-la-batalla-de-las-baterias-de-ion-litio-contralos-paises-asiaticos/>, Nov. 09, 2018. .
- [32] M. Vergara, “Tecnología de Baterías,” <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBaterias.pdf>. .
- [33] A. Express, “Batería de iones de litio de ciclo profundo, 12 V, 100ah, 200Ah, 12 V, 300Ah, almacenamiento,” s.aliexpress.com/item/4000986754788.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.28d53f77sFSWNQ&algo_pvid=932f7ac3-78e9-4fe1-aec0-f0d93c321323&algo_exp_id=932f7ac3-78e9-4fe1-aec0-f0d93c321323-7. .
- [34] L. BSLBATT, “Definition and Classification of SOC Estimation,” <https://www.lithium-battery-factory.com/es/lithium-battery-state-of-charge/>, Jul. 26, 2021. .
- [35] M. Jiménez, “Estimación de la vida útil de baterías en Sistemas Eléctricos de Pequeña Dimensión,” Sevilla, 2018.
- [36] J. Wang *et al.*, “Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 8, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.134.
- [37] A. V. Souto, “Optimization & Energy Management of a Microgrid Based on Frequency Communications.” [Online]. Available: <http://repository.tudelft.nl/>.
- [38] B. Vitoriano, P. Linares, and A. Ramos, “Modelos matemáticos de optimización.” [Online]. Available: www.doi.icai.upco.es.
- [39] M. Azcona, “Matheurísticas para el Diseño de Microrredes Autónomas con Energías Renovables para Comunidades Aisladas,” Barcelona, 2019.
- [40] A. De, T. De, M. I. A. Blanco, and B. Reimpresión, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE ORURO FACULTAD NACIONAL DE INGENIERIA INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA A A P P L L I I C C A A C C I I Ó Ó N N D D E E T T É É C C N N I I C C A A S,” 2003.
- [41] B. Salazar, “Método Simplex,” <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/metodo-simplex/>, May 11, 2019. .
- [42] E. Villota, “CONTROL MODERNO Y OPTIMO (MT 227C),” 1, Apr. 22, 2009.
- [43] R. Sala, “Conceptos previos de convexidad,” <https://www.uv.es/~sala/programacion.htm>, 2010. .
- [44] A. Pablo and E. Romera, “MATEMÁTICAS II. Apuntes,” 12, Apr. 2017.
- [45] E. Fernández, “Herramientas de optimización convexa y aplicaciones en telecomunicaciones,” Leganés, 2011.
- [46] J. Mañas, *Análisis de Algoritmos – Complejidad*. 2017.
- [47] R. de La Torre, “Análisis de algoritmos,” <https://medium.com/techwomenc/an%C3%A1lisis-de-algoritmos-933f16ea0eb5>, May 23, 2017. .
- [48] W. Fernando, P. Reinoso, J. Leonardo, and M. Silva, “UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA FACULTAD DE INGENIERIAS CARRERA: INGENIERIA ELECTRICA Tesis previa a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico DESPACHO ECONÓMICO DE POTENCIA DIARIA APLICADO AL SISTEMA NACIONAL ECUATORIANO AUTOR.”
- [49] P. Alejandro, M. Falcony, E. Marcelo, and G. Torres, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA Trabajo de titulación previo a la obtención del título de INGENIERO

- ELÉCTRICO TEMA: GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE PROCESOS ESTOCÁSTICOS PARA LA RESPUESTA A LA DEMANDA AUTOR,” 2017.
- [50] C. Spiegelger and J. I. Cifuentes, “DEFINICION E INFORMACION DE ENERGIAS RENOVABLES.”
- [51] H. García, A. Corredor, L. Calderón, and M. Gómez, “Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia.”
- [52] D. Visiga, “Generación eléctrica mediante un sistema híbrido hidráulico-fotovoltaico aislado de la red para una pequeña población rural,” Barcelona, 2009.
- [53] Y. Atwa, “Distribution System Planning and Reliability Assessment under High DG Penetration,” *Distribution*, vol. 1, no. Engineering, pp. 141–168, Jun. 2010.
- [54] G. Arguello, “ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA Y DESPACHO ECONÓMICO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MICRO,” Quito, Dec. 2018.
- [55] S. E. Bastidas and H. N. Arcos, “Economic Dispatch of the Hybrid System of the Santa Cruz and Baltra Islands Incorporating the Randomness of Power of the Eolic and Solar Photovoltaic Systems Despacho Económico del Sistema Híbrido de las Islas Santa Cruz y Baltra Incorporando la Aleatoriedad de Potencia de los Sistemas Eólico y Solar Fotovoltaico,” no. 16, pp. 1–7, 2019.
- [56] G. A. Salazar, C. A. Cadena, A. L. Hernandez, L. Saravia, and G. Romero, “MODELO PARA ESTIMAR IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN SOLAR PARA DIA CLARO UTILIZANDO COMO PARÁMETRO VARIABLE LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR. PLANTEO Y PRIMEROS RESULTADOS.”
- [57] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Wiley, 2013.
- [58] CONELEC, “Vol2-Estudio-y-gestión-de-la-demanda-eléctrica-PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACIÓN-2013-2022.”
- [59] D. Orbea, “DESPACHO ECONÓMICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA CONSIDERANDO EL COMPORTAMIENTO ESTOCÁSTICO DE CENTRALES DE GENERACIÓN A BASE DE ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES.”
- [60] G. Salazar and B. Panchi, “Análisis de la Evolución de la Demanda Eléctrica en el Ecuador Considerando el Ingreso de Proyectos de Eficiencia Energética,” *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, Feb. 2014.
- [61] T. Berthold, J. Farmer, S. Heinz, and M. Perregaard, “Parallelization of the FICO Xpress-Optimizer,” *Optimization Methods and Software*, vol. 33, no. 3, May 2018, doi: 10.1080/10556788.2017.1333612.
- [62] A. Chica, C. Trujillo, and F. Saltamaría, “GESTIÓN DE ENERGÍA HÍBRIDA PARA MICRORRED AISLADA UTILIZANDO EL ALGORITMO DE GRADIENTE PROYECTADO DE ROSEN,” <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/12475/13073>, vol. E-ISSN: 2248-762X, pp. 42–48, Sep. 2017.

8. ANEXOS**Anexo A. Datos de demanda diaria de 168 horas (1 semana).**

DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3		DÍA 4		DÍA 5		DÍA 6		DÍA 7	
Hora	Demanda KW												
1	6,72	25	7,36	49	7,68	73	6,72	97	7,68	121	7,68	145	8,96
2	8,32	26	7,68	50	7,04	74	7,68	98	7,36	122	7,04	146	8,64
3	7,68	27	6,08	51	6,4	75	5,76	99	7,36	123	7,68	147	8,96
4	6,08	28	6,4	52	6,72	76	7,68	100	7,04	124	8,96	148	7,36
5	8,96	29	7,68	53	8	77	8,96	101	8,32	125	9,6	149	10,24
6	11,52	30	13,12	54	8,96	78	11,52	102	11,52	126	11,52	150	13,44
7	13,44	31	12,16	55	10,24	79	16	103	12,48	127	13,12	151	12,48
8	9,6	32	9,92	56	10,56	80	10,88	104	12,16	128	11,2	152	13,44
9	10,24	33	12,48	57	13,76	81	8,96	105	14,08	129	10,88	153	12,16
10	9,6	34	12,16	58	13,44	82	9,92	106	12,8	130	12,8	154	13,12
11	11,52	35	10,88	59	11,52	83	12,16	107	11,2	131	10,88	155	14,08
12	12,48	36	16,64	60	10,88	84	14,72	108	13,12	132	14,08	156	12,48
13	13,76	37	16,96	61	12,48	85	16	109	12,48	133	14,72	157	13,44
14	14,72	38	14,4	62	13,44	86	14,4	110	12,16	134	11,52	158	13,12
15	15,04	39	15,04	63	12,8	87	12,8	111	11,52	135	10,88	159	11,52
16	12,8	40	12,48	64	14,4	88	12,16	112	11,84	136	11,52	160	10,88
17	14,08	41	12,8	65	14,72	89	13,44	113	13,76	137	15,36	161	14,72
18	20,48	42	18,56	66	18,88	90	16,96	114	19,52	138	17,92	162	17,92
19	32,64	43	32,96	67	28,8	91	30,08	115	33,28	139	32,32	163	35,84
20	31,36	44	35,2	68	33,6	92	33,6	116	31,68	140	32	164	33,92
21	29,76	45	30,4	69	30,72	93	31,68	117	32,96	141	33,6	165	33,28
22	25,92	46	24,96	70	22,4	94	22,4	118	21,12	142	24	166	25,92
23	12,48	47	14,4	71	13,12	95	12,8	119	11,84	143	14,4	167	11,52
24	7,68	48	9,92	72	7,36	96	9,28	120	9,28	144	8,96	168	8,64



Anexo B. Datos de Irradiancia Sector Guigopana

Día 1		Día 2		Día 3		Día 4		Día 5		Día 6		Día 7	
Hor a	Irradian cia W/m2												
1	0	25	0	49	0	73	0	97	0	121	0	145	0
2	0	26	0	50	0	74	0	98	0	122	0	146	0
3	0	27	0	51	0	75	0	99	0	123	0	147	0
4	0	28	0	52	0	76	0	100	0	124	0	148	0
5	0	29	0	53	0	77	0	101	0	125	0	149	0
6	0	30	0	54	0	78	0	102	0	126	0	150	0
7	20	31	11	55	11	79	19	103	11	127	8	151	14
8	106	32	67	56	103	80	98	104	83	128	40	152	89
9	177	33	149	57	188	81	156	105	150	129	93	153	173
10	219	34	142	58	273	82	209	106	212	130	164	154	243
11	266	35	250	59	342	83	264	107	207	131	195	155	238
12	280	36	283	60	360	84	332	108	264	132	261	156	263
13	280	37	357	61	389	85	317	109	185	133	223	157	263
14	266	38	286	62	280	86	222	110	270	134	297	158	255
15	278	39	248	63	254	87	176	111	344	135	256	159	319
16	210	40	172	64	206	88	178	112	257	136	191	160	193
17	112	41	130	65	117	89	93	113	157	137	164	161	111
18	39	42	28	66	59	90	38	114	65	138	73	162	66
19	3	43	3	67	2	91	2	115	4	139	5	163	5
20	0	44	0	68	0	92	0	116	0	140	0	164	0
21	0	45	0	69	0	93	0	117	0	141	0	165	0
22	0	46	0	70	0	94	0	118	0	142	0	166	0
23	0	47	0	71	0	95	0	119	0	143	0	167	0
24	0	48	0	72	0	96	0	120	0	144	0	168	0

Anexo C. Datos de potencia solar fotovoltaica generada

Día 1			Día 2			Día 3		
Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW	Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW	Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW
1	0	0	25	0	0	49	0	0
2	0	0	26	0	0	50	0	0
3	0	0	27	0	0	51	0	0
4	0	0	28	0	0	52	0	0
5	0	0	29	0	0	53	0	0
6	0	0	30	0	0	54	0	0
7	2943,50464	2,94350464	31	1617,22792	1,61722792	55	1617,22792	1,61722792
8	15757,07808	15,75707808	32	9914,802576	9,914802576	56	15305,81813	15,30581813
9	26527,09762	26,52709762	33	22259,0957	22,2590957	57	28211,17773	28,21117773
10	32979,57442	32,97957442	34	21196,30138	21,19630138	58	41364,61493	41,36461493
11	40272,01696	40,27201696	35	37780,968	37,780968	59	52224,53818	52,22453818
12	42458,89536	42,45889536	36	42928,38773	42,92838773	60	55084,44672	55,08444672
13	42458,89536	42,45889536	37	54607,02274	54,60702274	61	59715,47714	59,71547714
14	40272,01696	40,27201696	38	43398,18912	43,39818912	62	42458,89536	42,45889536
15	42146,07213	42,14607213	39	37470,20493	37,47020493	63	38402,90618	38,40290618
16	31591,80192	31,59180192	40	25762,9801	25,7629801	64	30975,90688	30,97590688
17	16660,52506	16,66052506	41	19378,28256	19,37828256	65	17414,34178	17,41434178
18	5752,555536	5,752555536	42	4124,752128	4,124752128	66	8722,842256	8,722842256
19	440,650128	0,440650128	43	440,650128	0,440650128	67	293,732416	0,293732416
20	0	0	44	0	0	68	0	0
21	0	0	45	0	0	69	0	0
22	0	0	46	0	0	70	0	0
23	0	0	47	0	0	71	0	0
24	0	0	48	0	0	72	0	0

Día 4			Día 5		
Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW	Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW
73	0	0	97	0	0
74	0	0	98	0	0
75	0	0	99	0	0
76	0	0	100	0	0
77	0	0	101	0	0
78	0	0	102	0	0
79	2796,003216	2,796003216	103	1617,22792	1,61722792
80	14554,40493	14,55440493	104	12305,31573	12,30531573
81	23323,57248	23,32357248	105	22411,0608	22,4110608
82	31437,77666	31,43777666	106	31899,95546	31,89995546
83	39960,15514	39,96015514	107	31129,82914	31,12982914
84	50640,50714	50,64050714	108	39960,15514	39,96015514
85	48270,89858	48,27089858	109	27751,47112	27,75147112
86	33442,7833	33,4427833	110	40896,15264	40,89615264
87	26374,20544	26,37420544	111	52541,75642	52,54175642
88	26680,02413	26,68002413	112	38869,72034	38,86972034
89	13803,85013	13,80385013	113	23475,77794	23,47577794
90	5604,401728	5,604401728	114	9616,60648	9,61660648
91	293,732416	0,293732416	115	587,602176	0,587602176
92	0	0	116	0	0
93	0	0	117	0	0
94	0	0	118	0	0
95	0	0	119	0	0
96	0	0	120	0	0

Día 6			Día 7		
Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW	Hora	POTENCIA W	POTENCIA kW
121	0	0	145	0	0
122	0	0	146	0	0
123	0	0	147	0	0
124	0	0	148	0	0
125	0	0	149	0	0
126	0	0	150	0	0
127	1175,753728	1,175753728	151	2059,011136	2,059011136
128	5900,74368	5,90074368	152	13204,02434	13,20402434
129	13803,85013	13,80385013	153	25915,73493	25,91573493
130	24542,17754	24,54217754	154	36693,89813	36,69389813
131	29285,02824	29,28502824	155	35918,44973	35,91844973
132	39492,61992	39,49261992	156	39804,27573	39,80427573
133	33597,25493	33,59725493	157	39804,27573	39,80427573
134	45123,4381	45,1234381	158	38558,47656	38,55847656
135	38714,08128	38,71408128	159	48586,40002	48,58640002
136	28671,19336	28,67119336	160	28978,04213	28,97804213
137	24542,17754	24,54217754	161	16509,86472	16,50986472
138	10810,21493	10,81021493	162	9765,68736	9,76568736
139	734,58856	0,73458856	163	734,58856	0,73458856
140	0	0	164	0	0
141	0	0	165	0	0
142	0	0	166	0	0
143	0	0	167	0	0
144	0	0	168	0	0

Anexo D. Datos de velocidad de viento medido en el sector de Guingopana

DÍA 1			DÍA 2			DÍA 3		
Hora	WIN km/h	m/s	Hora	WIN km/h	m/s	Hora	WIN km/h	m/s
1	12,496718	3,47131056	25	10,514218	2,92061611	49	3,2599385	0,90553847
2	10,948973	3,04138139	26	17,84816	4,95782222	50	2,8116899	0,78102497
3	13,18308	3,66196667	27	21,142147	5,87281861	51	3,0758414	0,85440039
4	13,397612	3,72155889	28	19,770523	5,49181194	52	4,32	1,2
5	12,768586	3,54682944	29	17,917007	4,97694639	53	4,3349743	1,20415953
6	14,759999	4,09999972	30	16,09969	4,47213611	54	2,1897945	0,60827625
7	15,782622	4,38406167	31	19,228851	5,3413475	55	10,685391	2,96816417
8	13,493999	3,74833306	32	16,595179	4,60977194	56	5,4477882	1,5132745
9	11,988594	3,330165	33	16,563911	4,60108639	57	4,379589	1,2165525
10	10,233123	2,84253417	34	16,870138	4,68614944	58	4,6800003	1,30000008
11	5,815978	1,61554944	35	15,484185	4,3011625	59	7,69592	2,13775556
12	2,1897945	0,60827625	36	10,233123	2,84253417	60	10,1376915	2,81602542
13	7,7043357	2,14009325	37	7,928178	2,20227167	61	9,028754	2,50798722
14	10,009036	2,78028778	38	5,3999996	1,49999989	62	9,693296	2,69258222
15	12,475961	3,46554472	39	9,9571085	2,76586347	63	10,1887	2,83019444
16	12,475961	3,46554472	40	11,681987	3,24499639	64	9,085988	2,52388556
17	9,957108	2,76586333	41	13,783817	3,82883806	65	7,928177	2,20227139
18	8,587338	2,38537167	42	10,948973	3,04138139	66	7,491114	2,080865
19	7,8954163	2,19317119	43	9,793059	2,72029417	67	8,891343	2,4698175
20	6,792466	1,88679611	44	7,0911775	1,96977153	68	8,209263	2,28035083
21	5,0142193	1,39283869	45	6,9527545	1,93132069	69	8,854829	2,45967472
22	3,4152596	0,94868322	46	5,04	1,4	70	6,3690495	1,76918042
23	5,6233797	1,56204992	47	5,771239	1,60312194	71	4,1046314	1,14017539
24	6,12	1,7	48	4,68	1,3	72	4,8433046	1,34536239

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

DÍA 4			DÍA 5			DÍA 6			DÍA 7		
Hor a	WIN km/h	m/s	Hor a	WIN km/h	m/s	Hor a	WIN km/h	m/s	Hor a	WIN km/h	m/s
73	5,00128	1,3892444 4	97	14,291592	3,9698866 7	121	15,379206	4,2720016 7	145	20,111729	5,5865913 9
74	4,68	1,3	98	12,984975	3,6069375	122	14,565548	4,0459855 6	146	20,390114	5,6639205 6
75	6,151683	1,7088008 3	99	16,641972	4,62277	123	15,124284	4,20119	147	19,453327	5,4037019 4
76	8,435069	2,3430747 2	100	17,429354	4,8414872 2	124	15,496736	4,3046488 9	148	17,429354	4,8414872 2
77	10,514218	2,9206161 1	101	13,684735	3,8013152 8	125	15,646544	4,3462622 2	149	16,870138	4,6861494 4
78	13,397612	3,7215588 9	102	24,248611	6,7357252 8	126	16,055353	4,4598202 8	150	17,935081	4,9819669 4
79	12,924952 5	3,5902645 8	103	18,089775	5,0249375	127	15,790832 5	4,3863423 6	151	18,0036	5,001
80	13,392774	3,720215	104	17,309975	4,8083263 9	128	18,59845	5,1662361 1	152	13,358861	3,7107947 2
81	12,031756	3,3421544 4	105	16,323528	4,5343133 3	129	19,107151	5,3075419 4	153	12,413477	3,4481880 6
82	9,220499	2,5612497 2	106	13,392774	3,720215	130	15,281989	4,2449969 4	154	12,261157	3,4058769 4
83	5,904439	1,6401219 4	107	10,495713	2,9154758 3	131	12,904882	3,5846894 4	155	10,691453	2,9698480 6
84	7,5685663	2,1023795 3	108	7,386582	2,0518283 3	132	11,620809	3,2280025	156	8,404285	2,3345236 1
85	5,1165614	1,4212670 6	109	5,4833565	1,5231545 8	133	8,905908	2,4738633 3	157	4,3349743	1,2041595 3
86	5,0911684	1,4142134 4	110	1,484318	0,4123105 6	134	3,6	1	158	1,4399999	0,3999999 7
87	5,634891	1,5652475	111	3,6	1	135	0,5091169	0,1414213 6	159	5,5887027	1,5524174 2
88	5,95906	1,6552944 4	112	6,6087217	1,8357560 3	136	0,3599999 8	0,0999999 9	160	6,2145634	1,7262676 1
89	5,634891	1,5652475	113	7,172949	1,9924858 3	137	2,2768397	0,6324554 7	161	6,5693827	1,8248285 3
90	4,0249224	1,118034	114	6,519877	1,8110769 4	138	5,04	1,4	162	7,968939	2,2135941 7
91	5,1544156	1,4317821 1	115	7,2	2	139	9,107359	2,5298219 4	163	6,489992	1,8027755 6
92	10,966713	3,0463091 7	116	5,6233797	1,5620499 2	140	13,70839	3,8078861 1	164	4,3349743	1,2041595 3
93	15,790832 5	4,3863423 6	117	7,5599995	2,0999998 6	141	14,336861	3,9824613 9	165	4,5536795	1,2649109 7
94	17,935081	4,9819669 4	118	12,727921 5	3,5355337 5	142	12,819235	3,5608986 1	166	5,0528407	1,4035668 6
95	19,469976	5,4083266 7	119	14,264361	3,9623225	143	15,192682	4,2201894 4	167	5,692099	1,5811386 1
96	17,377226	4,8270072 2	120	14,480773	4,0224369 4	144	18,391737	5,1088158 3	168	6,9527545	1,9313206 9

Anexo E. Datos de potencia eólica generada

DÍA 1					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 5 generadores kW
1	3,471310556	3,471310556	122,483308	0,12248331	0,61241654
2	3,041381389	3,041381389	82,3776035	0,0823776	0,41188802
3	3,661966667	3,661966667	143,793635	0,14379363	0,71896817
4	3,721558889	3,721558889	150,928476	0,15092848	0,75464238
5	3,546829444	3,546829444	130,652408	0,13065241	0,65326204
6	4,099999722	4,099999722	201,812463	0,20181246	1,00906232
7	4,384061667	4,384061667	246,73256	0,24673256	1,2336628
8	3,748333056	3,748333056	154,209461	0,15420946	0,77104731
9	3,330165	3,330165	108,141841	0,10814184	0,5407092
10	2,842534167	0	0	0	0
11	1,615549444	0	0	0	0
12	0,60827625	0	0	0	0
13	2,14009325	0	0	0	0
14	2,780287778	0	0	0	0
15	3,465544722	3,465544722	121,873989	0,12187399	0,60936994
16	3,465544722	3,465544722	121,873989	0,12187399	0,60936994
17	2,765863333	0	0	0	0
18	2,385371667	0	0	0	0
19	2,193171194	0	0	0	0
20	1,886796111	0	0	0	0
21	1,392838694	0	0	0	0
22	0,948683222	0	0	0	0
23	1,562049917	0	0	0	0
24	1,7	0	0	0	0

DÍA 2					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 3 generadores kW
25	2,920616111	0	0	0	0
26	4,957822222	4,957822222	356,836565	0,35683657	1,78418283
27	5,872818611	5,872818611	593,111389	0,59311139	2,96555694
28	5,491811944	5,491811944	485,001937	0,48500194	2,42500969
29	4,976946389	4,976946389	360,981869	0,36098187	1,80490934
30	4,472136111	4,472136111	261,903644	0,26190364	1,30951822
31	5,3413475	5,3413475	446,219969	0,44621997	2,23109984
32	4,609771944	4,609771944	286,83677	0,28683677	1,43418385
33	4,601086389	4,601086389	285,218482	0,28521848	1,42609241
34	4,686149444	4,686149444	301,331758	0,30133176	1,50665879
35	4,3011625	4,3011625	232,998998	0,232999	1,16499499
36	2,842534167	0	0	0	0
37	2,202271667	0	0	0	0
38	1,499999889	0	0	0	0
39	2,765863472	0	0	0	0
40	3,244996389	3,244996389	100,055083	0,10005508	0,50027541
41	3,828838056	3,828838056	164,360516	0,16436052	0,82180258
42	3,041381389	3,041381389	82,3776035	0,0823776	0,41188802
43	2,720294167	0	0	0	0
44	1,969771528	0	0	0	0
45	1,931320694	0	0	0	0
46	1,4	0	0	0	0
47	1,603121944	0	0	0	0
48	1,3	0	0	0	0

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

DÍA 3					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 3 generadores kW
49	0,905538472	0	0	0	0
50	0,781024972	0	0	0	0
51	0,854400389	0	0	0	0
52	1,2	0	0	0	0
53	1,204159528	0	0	0	0
54	0,60827625	0	0	0	0
55	2,968164167	0	0	0	0
56	1,5132745	0	0	0	0
57	1,2165525	0	0	0	0
58	1,300000083	0	0	0	0
59	2,137755556	0	0	0	0
60	2,816025417	0	0	0	0
61	2,507987222	0	0	0	0
62	2,692582222	0	0	0	0
63	2,830194444	0	0	0	0
64	2,523885556	0	0	0	0
65	2,202271389	0	0	0	0
66	2,080865	0	0	0	0
67	2,4698175	0	0	0	0
68	2,280350833	0	0	0	0
69	2,459674722	0	0	0	0
70	1,769180417	0	0	0	0
71	1,140175389	0	0	0	0
72	1,345362389	0	0	0	0

DÍA 4					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 3 generadores kW
73	1,389244444	0	0	0	0
74	1,3	0	0	0	0
75	1,708800833	0	0	0	0
76	2,343074722	0	0	0	0
77	2,920616111	0	0	0	0
78	3,721558889	3,721558889	150,928476	0,15092848	0,75464238
79	3,590264583	3,590264583	135,511411	0,13551141	0,67755705
80	3,720215	3,720215	150,765031	0,15076503	0,75382515
81	3,342154444	3,342154444	109,314066	0,10931407	0,54657033
82	2,561249722	0	0	0	0
83	1,640121944	0	0	0	0
84	2,102379528	0	0	0	0
85	1,421267056	0	0	0	0
86	1,414213444	0	0	0	0
87	1,5652475	0	0	0	0
88	1,655294444	0	0	0	0
89	1,5652475	0	0	0	0
90	1,118034	0	0	0	0
91	1,431782111	0	0	0	0
92	3,046309167	3,046309167	82,7786679	0,08277867	0,41389334
93	4,386342361	4,386342361	247,117829	0,24711783	1,23558914
94	4,981966944	4,981966944	362,075406	0,36207541	1,81037703
95	5,408326667	5,408326667	463,217809	0,46321781	2,31608904
96	4,827007222	4,827007222	329,329282	0,32932928	1,64664641

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

DÍA 5					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 5 generadores kW
97	3,969886667	3,969886667	183,20226	0,18320226	0,9160113
98	3,6069375	3,6069375	137,408106	0,13740811	0,68704053
99	4,62277	4,62277	289,269976	0,28926998	1,44634988
100	4,841487222	4,841487222	332,301936	0,33230194	1,66150968
101	3,801315278	3,801315278	160,841522	0,16084152	0,80420761
102	6,735725278	6,735725278	894,848674	0,89484867	4,47424337
103	5,0249375	5,0249375	371,525386	0,37152539	1,85762693
104	4,808326389	4,808326389	325,520483	0,32552048	1,62760241
105	4,534313333	4,534313333	272,98016	0,27298016	1,3649008
106	3,720215	3,720215	150,765031	0,15076503	0,75382515
107	2,915475833	0	0	0	0
108	2,051828333	0	0	0	0
109	1,523154583	0	0	0	0
110	0,412310556	0	0	0	0
111	1	0	0	0	0
112	1,835756028	0	0	0	0
113	1,992485833	0	0	0	0
114	1,811076944	0	0	0	0
115	2	0	0	0	0
116	1,562049917	0	0	0	0
117	2,099999861	0	0	0	0
118	3,53553375	3,53553375	129,408101	0,1294081	0,6470405
119	3,9623225	3,9623225	182,157041	0,18215704	0,91078521
120	4,022436944	4,022436944	190,574257	0,19057426	0,95287129

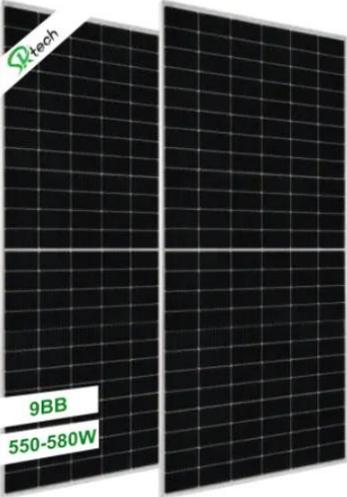
DÍA 6					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 5 generadores kW
121	4,272001667	4,272001667	228,292026	0,22829203	1,14146013
122	4,045985556	4,045985556	193,940935	0,19394094	0,96970468
123	4,20119	4,20119	217,126819	0,21712682	1,0856341
124	4,304648889	4,304648889	233,566043	0,23356604	1,16783021
125	4,346262222	4,346262222	240,405432	0,24040543	1,20202716
126	4,459820278	4,459820278	259,745825	0,25974582	1,29872912
127	4,386342361	4,386342361	247,117829	0,24711783	1,23558914
128	5,166236111	5,166236111	403,756246	0,40375625	2,01878123
129	5,307541944	5,307541944	437,801058	0,43780106	2,18900529
130	4,244996944	4,244996944	223,990009	0,22399001	1,11995005
131	3,584689444	3,584689444	134,881104	0,1348811	0,67440552
132	3,2280025	3,2280025	98,4913496	0,09849135	0,49245675
133	2,473863333	0	0	0	0
134	1	0	0	0	0
135	0,141421361	0	0	0	0
136	0,099999994	0	0	0	0
137	0,632455472	0	0	0	0
138	1,4	0	0	0	0
139	2,529821944	0	0	0	0
140	3,807886111	3,807886111	161,677042	0,16167704	0,80838521
141	3,982461389	3,982461389	184,948674	0,18494867	0,92474337
142	3,560898611	3,560898611	132,213355	0,13221336	0,66106678
143	4,220189444	4,220189444	220,085962	0,22008596	1,10042981
144	5,108815833	5,108815833	390,442642	0,39044264	1,95221321

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI – CARRERA DE ELECTRICIDAD

DÍA 7					
Hora	Velocidad m/s	Velocidad utilizada	Potencia W	Potencia 1 generador kW	Potencia 5 generadores kW
145	5,58659139	5,58659139	510,548758	0,51054876	2,55274379
146	5,66392056	5,66392056	532,044503	0,5320445	2,66022252
147	5,40370194	5,40370194	462,030516	0,46203052	2,31015258
148	4,84148722	4,84148722	332,301936	0,33230194	1,66150968
149	4,68614944	4,68614944	301,331758	0,30133176	1,50665879
150	4,98196694	4,98196694	362,075406	0,36207541	1,81037703
151	5,001	5,001	366,241088	0,36624109	1,83120544
152	3,71079472	3,71079472	149,622633	0,14962263	0,74811316
153	3,44818806	3,44818806	120,051981	0,12005198	0,6002599
154	3,40587694	3,40587694	115,68668	0,11568668	0,5784334
155	2,96984806	0	0	0	0
156	2,33452361	0	0	0	0
157	1,20415953	0	0	0	0
158	0,39999997	0	0	0	0
159	1,55241742	0	0	0	0
160	1,72626761	0	0	0	0
161	1,82482853	0	0	0	0
162	2,21359417	0	0	0	0
163	1,80277556	0	0	0	0
164	1,20415953	0	0	0	0
165	1,26491097	0	0	0	0
166	1,40356686	0	0	0	0
167	1,58113861	0	0	0	0
168	1,93132069	0	0	0	0

Anexo F. Datasheets

Datasheet de panel fotovoltaico Logi Jinko



Logi Jinko Paneles Solares 600W 580W Bifacial Perc 144 Cell Solar Panel for Power Plant

[Get Latest Price >](#) [Chat with Supplier.](#)

Min. Order / Reference FOB Price

5,000 watt **US \$0.19-0.25/ watt**

Port: Shanghai, China

Production Capacity: 100000watts/Per Day

Payment Terms: L/C, T/T, Western Union, Credit Card

Warranty: 30 Years

Number of Cells: 144 Cells

Application: Industrial

Condition: New

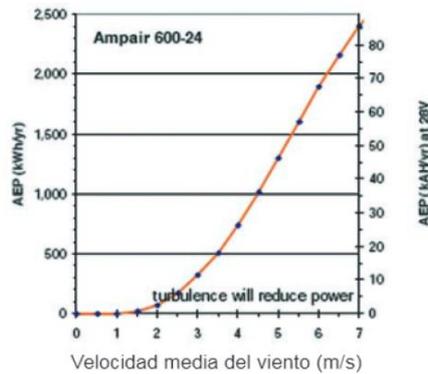
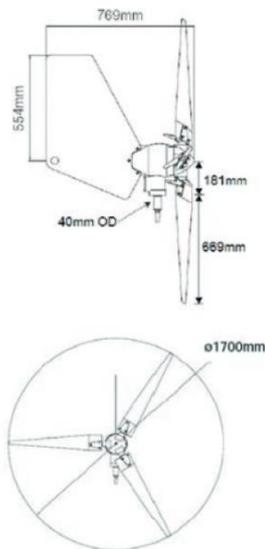
Certification: ISO, CE, TUV

Material: Monocrystalline Silicon

Electrical Characteristics(STC)						
Module Type	SK555M-144	SK560M-144	SK565M-144	SK570M-144	SK575M-144	SK580M-144
Maximum Power (Pmax)	555W	560W	565W	570W	575W	580W
Maximum Power Voltage (Vmp)	41.8	42.00	42.20	42.40	42.60	42.80
Maximum Power Current (Imp)	13.29	13.35	13.41	13.47	13.53	13.59
Open-circuit Voltage (Voc)	50.00	50.20	50.40	50.60	50.80	51.00
Short-circuit Current (Isc)	14.05	14.11	14.17	14.23	14.29	14.35
Module Efficiency (%)	21.70	21.90	22.10	22.30	22.50	22.70
Power Tolerance	0~+5W					
Temperature Coefficient of Isc	+0.05%/°C					
Temperature Coefficient of Voc	-0.29%/°C					
Temperature Coefficient of Pmax	-0.37%/°C					
Irradiance 1000W/M, Cell Temperature 25°C , Air Mass 1.5						

Datasheet de Aerogenerador Ampair Pacific 600

Características Técnicas 24 V / 48 V	
Potencia a 11,0m/s	723 W / 741 W (dentro de la batería)
Energía anual a 5,0m/s	1300 KWh/año; 48 KAh/año / 1394 KWh/año; 25 KAh/año
Salida	Trifásica AC - Se suministra con un rectificador externo
Velocidad mín del viento	3 m/s
Velocidad máx del viento	n/a
Potencia máxima	1050 W / 1140 W
Voltaje máximo	24/48 V nominales
Corriente máxima	30 A/17 A
Protección viento fuerte	Control del movimiento del aspa y salida DC
Entrada potencia	<0,5 W
Área de barrido del rotor	2,27 m
Diámetro de la turbina	1,70 m
Peso	16 Kg (turbina y palas)
Material	Cuerpo de aluminio, 3 palas de GRP
Generador	De imán permanente con salida trifásica
Ruido	Máx. 1-3 dBA sobre el suelo
Longevidad	15 años de vida operativa



Datasheet de la batería de litio Greensun



Lithium Battery Series

- *Long cycle life: 100% DOD after 800cycles 80% capacity remain
- *Small size, light weight than Lead acid battry
- *Low self-discharge rate: < 3% monthly



Nombre del producto:	Batería LiFePO4 (12V 100AH)		
Certificación:	CE/UL/MSDS/ROHS/ISO9001/UN38.3		
Tensión Nominal	12,8 V	Capacidad Nominal	100AH
Voltaje de carga	14,6 ± 0,2 V	Corriente de cargador	40A
Max corriente de carga	70A	Voltaje de corte de carga	15,6 ± 0,2 V
Temperatura de funcionamiento	Carga: 0 ~ 45 °C descarga:-20 ~ 60 °C		
Ciclo de Vida	2000 ciclos (100% DOD) 5000 ciclos (80% DOD)		
Medio ambiente	Carga de temperatura	0 °C a 45 °C (32F a 113F) @ 60 ± 25% de humedad relativa	
	Temperatura de descarga	-20 °C a 60 °C (-4F a 140F) @ 60 ± 25% de humedad relativa	
	Agua de resistencia al polvo	IP56	
	Celular y método	3.2V25Ah 4S4P	
	Caja de plástico	ABS	
Mecánica	Dimensiones (en./mm.)	330x173x220mm/personalizado	
	Peso (libras/kg.)	13,5 KG	
	Terminal	T11	