

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“MODELO DE ESTADO ESTACIONARIO DE LA MICRORRED DEL LABORATORIO DE BALZAY DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA”

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

Autores:

Andrea Priscila Chica Gallardo
CI: 0706335999

Juan Andrés Guamán Argudo
CI: 0106364839

Director de Tesis:

Ing. Luis Ismael Minchala Ávila, Ph.D.
CI: 0301453486

Co-Director de Tesis:

Ing. Luis Gerardo González Morales, Ph.D.
CI: 1729711059

Cuenca - Ecuador

2017



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Provincia: Azuay Cantón: Cuenca

Autores:

Andrea Priscila Chica Gallardo

Juan Andrés Guamán Argudo

Dirigido Por:

Ismael Minchala A, Ph.D.

Luis González M, Ph.D.

Resumen

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

La evolución de las redes eléctricas da lugar a investigar nuevas formas de gestionar las redes. Por ello, el presente trabajo propone la simulación en régimen estacionario de las diferentes tecnologías que conforman el Centro Científico, Tecnológico y de Investigación BALZAY específicamente en el Laboratorio de microrred eléctrica con el fin de disponer de modelos que permitan dar inicio a estudios sobre el comportamiento de cada uno de los elementos involucrados y su interacción.

El modelado mediante herramientas computacionales está dividido en dos partes. La primera de ellas consiste en la simulación individual de cada uno de los equipos de generación y almacenamiento, mientras que en la segunda parte se integran todos los equipos, mediante dos modos de operación distintos: operación de la microrred conectada a la red eléctrica y operación de la microrred aislada. En ambos casos se usa la plataforma de pruebas de *SimPowerSystems de Simulink*.

En el análisis de despacho económico se realizan estudios de casos mediante la herramienta *Homer Energy*, donde para la optimización se toma en cuenta variables como los costos de producción y mantenimiento. Adicionalmente, se presentan las principales conclusiones del trabajo y se proponen algunas futuras investigaciones a partir de problemas elementales que deben resolverse.

Palabras claves: Modelado y simulación, Laboratorio, microrredes eléctricas.

Abstract

The solution to several problems facing the traditional electric model is intended to be the incorporation of micro networking. The micro networking looks for creating a competitive, efficient electrical system and to reduce the environmental damage throughout the incorporation of renewable energies.

The evolution of electric networks leads to new ways of managing the networks. For this reason, this thesis project proposes the simulation in a steady state of the different technologies that make up the Scientific, Technological and Research Center BALZAY, specifically in the Laboratory of the Electrical Micro Networking in order to have models that allow starting studies on the behavior of each of the elements involved and their interaction.

The modeling using computational tools is divided into two parts: The first consists on the individual simulation of each of the generation and storage equipment; the second part integrates all the equipment through two different ways of operation: operation with connection to the public electric network and operation in island mode. In both cases, Simulink's SimPowerSystems test platform is used.

Finally, in the economic dispatch analysis, case studies are carried out using the Homer Energy tool where optimization takes into account some variables such as production and maintenance costs. Additionally, the main conclusions of this project are presented, and some future research is proposed starting from basic problems that must be solved.

Keywords: Modeling and simulation, Laboratory, micro electric networks.

Índice General

Resumen	3
Abstract.....	5
Índice General.....	7
Índice de Figuras	11
Índice de Tablas.....	14
CAPÍTULO 1	29
1.1. Introducción	29
1.2. Descripción del Problema	30
1.3. Objetivos.....	32
1.3.1. Objetivo general.....	32
1.3.2. Objetivos específicos	32
1.4. Contribución de la Tesis.....	32
1.5. Antecedentes	35
1.5.1. Redes inteligentes en América Latina	36
1.5.2. Redes inteligentes en América del Norte	36
1.5.3. Redes inteligentes en Europa	37
1.5.4. Redes inteligentes en Asia.....	38
CAPITULO 2	39
2. Fundamentos teóricos de las microrredes.....	39
2.1. Generación distribuida (GD).....	39
2.2. Microrred.....	40
2.3. Configuraciones de la microrred.....	41
2.4. Modos de operación de la microrred	43
2.5. Equipos que forman parte de una microrred	44
2.5.1. Equipos de generación	44
2.5.1.1. Energía fotovoltaica.....	44
2.5.1.2. Energía eólica	45
2.5.1.3. Electrógenos con motores de combustión interna	46
2.5.1.3.1. Generador a diésel.....	46
2.5.1.3.2. Generador de gas licuado de petróleo (GLP)	47
2.5.1.4. Energía hídrica	47
2.5.2. Sistemas de almacenamiento de energía	48

2.5.2.1. Baterías de flujo-vanadio	49
2.5.2.2. Batería de plomo ácido.....	49
2.5.2.3. Baterías de ion-litio.....	50
2.5.2.4. Celdas de hidrógeno	51
2.5.2.5. Supercondensadores	51
2.5.3. Inversores	52
2.5.4. Vehículo eléctrico.....	52
2.5.5. Sistema de control (SCADA).....	53
2.5.6. Sistema de medición de energía	54
CAPÍTULO 3	56
3. Simulación en MATLAB	56
3.1. Matriz energética.....	56
3.2. Capacidad de energías renovables en el Ecuador	58
3.3. Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay.....	59
3.4. Toolbox SimPowerSystems.....	62
3.4.1. Generación solar.....	64
3.4.2. Generación eólica	71
3.4.1. Generación Mini-Hidro	77
3.4.2. Generador a diésel.....	82
3.4.3. Generador de gas licuado de petróleo (GLP)	84
3.4.4. Celda de hidrógeno.....	85
3.4.5. Fuente programable:.....	85
3.4.6. Equipos de Almacenamiento.....	86
3.4.7. Cargas	90
3.4.7.1. Vehículo eléctrico (VE) y montacargas	91
3.4.8. Monitoreo y sistemas de control.....	93
CAPÍTULO 4	96
4. Escenarios de operación.....	96
4.1. Newton-Raphson (NR).....	96
4.2. Simulación de la microrred en estado estacionario	101
4.3. Criterios de funcionamiento.....	102
4.3.1. La microrred como un prototipo experimental	103
4.3.1.1. Aislada de la red.....	105
4.3.1.1.1. Generación renovable disponible	105
4.3.1.1.2. Ausencia de una de las fuentes de generación renovable	106
4.3.1.1.3. Ausencia de fuentes de generación.....	108
4.3.1.1.4. Conectada a la red	109
4.3.2. La microrred como una entidad comercial.....	111
CAPÍTULO 5	115
5. Eficiencia Energética.....	115
5.1. Definición de eficiencia energética	115
5.2. Modelos de eficiencia energética en Ecuador	116
5.3. Despacho económico.....	118

5.3.1. Despacho económico microrred aislada.....	119
5.3.2. Despacho económico de la microrred conectada al SEP	121
CAPÍTULO 6	124
6.1 Conclusiones	124
6.2. Trabajos futuros.....	125
Bibliografía.....	126
ANEXOS	130
ANEXO A	130
ANEXO B	132
ANEXO C.....	133
ANEXO D.....	135
D.1. Generación renovable disponible	135
D.2. Ausencia de energía fotovoltaica.....	135
D.3. Ausencia de energía eólica	136
D.4. Ausencia de energía hídrica.....	136
D.5. Ausencia de fuentes de generación	137

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema de una microrred eléctrica.....	41
Figura 2.2 Tipos de configuración de la microrred [22].....	43
Figura 2.3 Ciclo para obtener energía eléctrica a partir del movimiento del agua	47
Figura 2.4 Sistema SCADA [39].....	53
Figura 2.5 Medidor bidireccional, a) El SEP entrega energía a la microrred, b) La microrred entrega energía al SEP	55
Figura 3.1 Porcentaje de participación de las energías renovables en el Ecuador[42]	58
Figura 3.2 Mapa conceptual del potencial energético estimado de energías renovables	59
Figura 3.3 Diseño interno del laboratorio de Balzay[42]	62
Figura 3.4 Logotipo de MATLAB	63
Figura 3.5 Pantalla principal del programa MATLAB.....	63
Figura 3.6 Paneles solares	64
Figura 3.7 Radiación promedio en el laboratorio de Balzay durante un año.....	66
Figura 3.8 Curva V-I de los paneles fotovoltaicos [45]	67
Figura 3.9 Diagramas de bloques que representan los paneles fotovoltaicos en MATLAB	68
Figura 3.10 Voltaje, corriente y potencia activa.....	69
Figura 3.11 Generadores eólicos [42]	72
Figura 3.12 Velocidad promedio del viento en la granja de Iquis [47]	73
Figura 3.13 Potencia total instantánea en función de la velocidad del viento, a) Turbina de eje vertical b) Turbina de eje horizontal [44][45].....	74
Figura 3.14 Límite de Betz de diferentes aerogeneradores [44].....	75
Figura 3.15 Diagrama de bloques que representan los aerogeneradores en MATLAB	75
Figura 3.16 Voltaje, corriente y potencia activa de la figura 3.13	77
Figura 3.17 Hidrocinética de la microrred del laboratorio de Balzay	78
Figura 3.18 Caudal del río Tomebamba.....	79
Figura 3.19 Diagrama de bloques que representa el comportamiento de la hidrocinética en MATLAB	80
Figura 3.20 Potencia total instantánea en función de la velocidad del río [46].....	80
Figura 3.21 Voltaje, corriente y potencia activa de la figura 3.17	81
Figura 3.22 Generador de diésel y gas licuado de petróleo	82
Figura 3.23 Diagrama de bloques que representa el comportamiento del generador a diésel en MATLAB	83
Figura 3.24 Voltaje, corriente y potencia del generador diésel y GLP	83
Figura 3.25 Diagrama de bloques del generador de gas licuado de petróleo en MATLAB	84
Figura 3.26 Celda de hidrogeno.....	85
Figura 3.27 Batería flujo de vanadio	86
Figura 3.28 Baterías de plomo ácido	87

Figura 3.29 Banco de supercapacitores (izquierda), Baterías de ion-litio (derecha)....	87
Figura 3.30 Diagrama de bloques que representa los equipos de almacenamiento en MATLAB	88
Figura 3.31 Proceso de carga/descarga	89
Figura 3.32 Carga resistiva programable	90
Figura 3.33 Tipos de carga de la microrred de Balzay	90
Figura 3.34 Vehículo eléctrico modelo Soul Electric del fabricante KIA.....	91
Figura 3.35 Montacargas modelo HYUNDAI 10BTR-9.....	91
Figura 3.36 Estación de carga	92
Figura 3.37 Interfaz de control y monitoreo	93
Figura 3.38 Inversores de los paneles fotovoltaicos.....	94
Figura 4.1 a) Barra PV, b) Barra PQ	96
Figura 4.2 Mapa conceptual para encontrar las potencias usando NR	100
Figura 4.3 Diseño en MATLAB de la microrred de Balzay	102
Figura 4.4 Carga total del laboratorio de Balzay	104
Figura 4.5 Generación total instantánea de las fuentes no gestionables.....	105
Figura 4.6 Ausencia de los paneles fotovoltaicos.....	106
Figura 4.7 Ausencia de energía eólica	107
Figura 4.8 Ausencia de energía hídrica	108
Figura 4.9 Aporte de cada uno de los equipos de almacenamiento para cubrir la demanda.....	109
Figura 4.10 Potencia total instantánea cuando todos los equipos de generación de la microrred operan	110
Figura 4.11 Comportamiento de la microrred antes de la interconexión con la red ...	112
Figura 4.12 Comportamiento de la microrred luego de la conexión con la red	113
Figura 5.1 Aporte de las diferentes tecnologías de generación en modo aislada de la red	120
Figura 5.2 Aporte de las diferentes tecnologías de generación en modo conectada a la red	123

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Energías renovables en el Ecuador[42].....	57
Tabla 3.2 Radiación promedio de BALZAY durante un año	66
Tabla 3.3 Características técnicas de los paneles fotovoltaicos [42].....	71
Tabla 3.4 Velocidad promedio del viento en la granja de Irquis	73
Tabla 3.5 Características técnicas de los generadores eólicos [42]	77
Tabla 3.6 Caudal del río Tomebamba.....	79
Tabla 3.7 Características técnicas de la hidrocíntrica del laboratorio de Balzay [42] ..	81
Tabla 3.8 Características técnicas del generador a diésel[42]	82
Tabla 3.9 Características técnicas del generador de gas licuado de petróleo[42]	84
Tabla 3.10 Características técnicas de la celda de hidrógeno [42].....	85
Tabla 3.11 Características técnicas de la fuente programable [42]	85
Tabla 3.12 Características técnicas de los equipos de almacenamiento [23], [42]	89
Tabla 3.13 Características técnicas de los vehículos eléctricos [42]	92
Tabla 3.14 Características técnicas de los inversores [42].....	94
Tabla 3.15 Características técnicas de los equipos de control y monitoreo [42].....	95
Tabla 4.1 Nombres de las barras que forman la microrred	101
Tabla 4.2 Porcentajes de carga y descarga de los equipos de almacenamiento.....	104
Tabla 5.1 Ahorro promedio por sustitución de refrigeradores [41]	116
Tabla 5.2 Número de lámparas por empresa [41]	117
Tabla 5.3 Ahorro en el sector industrial [41].....	117
Tabla 5.4 Ahorro energético de edificios públicos [41]	118
Tabla 5.5 Costos estimados de los equipos de la microrred	119
Tabla 5.6 Costo del kWh de la microrred	120
Tabla 5.7 Elementos nocivos ahorrados por la generación de la microrred	121
Tabla 5.8 Costo del kWh, de las diferentes generaciones [41].....	121
Tabla 5.9 Costo del kWh de la microrred conectada al SEP	122
Tabla 5.10 Costo estimado de los equipos de la microrred conectada.....	122
Tabla 5.11 Elementos nocivos ahorrados por la generación de la microrred conectada	123



Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, JUAN ANDRÉS GUAMÁN ARGUDO, autor del trabajo de titulación "MODELO DE ESTADO ESTACIONARIO DE LA MICRORRED DEL LABORATORIO DE BALZAY DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA" certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized cursive letters, positioned above a horizontal line.

JUAN ANDRÉS GUAMÁN ARGUDO

C.I: 010636483-9



Universidad de Cuenca
Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, ANDREA PRISCILA CHICA GALLARDO, autora del trabajo de titulación "MODELO DE ESTADO ESTACIONARIO DE LA MICRORRED DEL LABORATORIO DE BALZAY DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA" certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

ANDREA PRISCILA CHICA GALLARDO

C.I: 070633599-9



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, JUAN ANDRÉS GUAMÁN ARGUDO, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ANÁLISIS DEL INTERCAMBIO COOPERATIVO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ADICIONANDO RESTRICCIONES EN MICROREDES ELÉCTRICAS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

JUAN ANDRÉS GUAMÁN ARGUDO

C.I: 010636483-9



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, ANDREA PRISCILA CHICA GALLARDO, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "ANÁLISIS DEL INTERCAMBIO COOPERATIVO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ADICIONANDO RESTRICCIONES EN MICROREDES ELÉCTRICAS", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

ANDREA PRISCILA CHICA GALLARDO

C.I: 070633599-9



Universidad de Cuenca

Certifico que el trabajo de titulación "MODELO DE ESTADO ESTACIONARIO DE LA MICRORRED DEL LABORATORIO DE BALZAY DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA" ha sido desarrollado por los señores estudiantes: Andrea Priscila Chica Gallardo con C.I: 070633599-9 y Juan Andrés Guamán Argudo C.I: 010636483-9.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ismael Minchala A', written over a horizontal line.

Ing. Ismael Minchala A, Ph.D.

DOCENTE DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Universidad de Cuenca

Certifico que el trabajo de titulación "MODELO DE ESTADO ESTACIONARIO DE LA MICRORRED DEL LABORATORIO DE BALZAY DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA" ha sido desarrollado por los señores estudiantes: Andrea Priscila Chica Gallardo con C.I: 070633599-9 y Juan Andrés Guamán Argudo C.I: 010636483-9.

Cuenca, 24 de Octubre del 2017.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis González M. Ph.D.', written over a horizontal line.

Ing. Luis González M. Ph.D.

DOCENTE DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA
Co-DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Agradecimientos

Quiero aprovechar este espacio para expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas sin las cuales no habría sido posible alcanzar esta meta.

En primera instancia quiero agradecer a mis padres y hermanos, quienes con su apoyo y palabras de aliento durante todos estos años hicieron que el camino sea mucho más fácil.

A mi compañero de tesis y amigo Juan Guamán que con su dedicación permitió culminar este trabajo en un feliz término.

A nuestro director de tesis el doctor Ismael Minchala por las dudas resueltas y la disposición para enseñar, haciendo posible la realización de este trabajo.

Finalmente, quiero culminar agradeciendo toda la valerosa colaboración del doctor Luis González, quien con su constante apoyo, tiempo, conocimientos, exigencias e incansable ánimo permitió que este trabajo finalizara con éxito.

Andrea

Agradecimientos

Agradezco a Dios por guiarme en todo el camino dándome fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mi madre, Carmen Argudo, que me ha enseñado a no rendirme ante nada.

A los Ing. Ismael Minchala, PhD., Ing. Luis González Directores de nuestra tesis, por su valiosa guía y asesoramiento a la realización de la misma.

A Andrea Chica, por haber logrado nuestro gran objetivo con mucho esfuerzo y perseverancia, por demostrarme que con grandes personas se pueden lograr grandes éxitos.

Gracias a todas las personas que nos ayudaron de manera directa e indirectamente para la culminación de este proyecto.

Juan

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a los seres que son el motor de mi vida.

A mis padres Hugo Chica y Mónica Gallardo quienes con su amor y consejos me han permitido salir adelante.

A mis hermanos Vanessa, Cristopher y Hugo quienes han sido un apoyo incondicional.

A mi sobrina Scarlett quien con sus sonrisas me motiva a buscar un futuro mejor.

A mi abuelita querida Emma Apolo y mi gran amigo Stalin Agila quienes a la distancia me motivan para ser cada día mejor.

A mis ex maestros Gloria Araujo y Paulo Rocha quienes con sus enseñanzas impulsaron el desarrollo de mi formación profesional, y de manera especial a mi novio Ángel Farfán por estos tres años de aprendizaje y cariño.

Andrea

Dedicatoria

Este trabajo le dedico a mi madre que me ha apoyado en los momentos más difíciles de mi vida y ha estado conmigo a la par, demostrado que con dedicación y esfuerzo se puede salir adelante. A mi tía Susana, que la quiero como a mi madre, por compartir momentos significativos de mi vida, por brindarme un consejo en cualquier momento. A mis hermanos, sus consejos y regaños que me ayudaron a no rendirme en este proyecto. A mi familia en general, que me han brindado su apoyo incondicional y saber entender las muchas veces mi ausencia en reuniones familiares. A Andrea chica, por ser una persona muy importante en mi vida, que me ayudo a culminar esta etapa de mi vida, entre alegría y fracasos.

Juan

**“Modelo de estado estacionario de la
Microrred del Laboratorio de Balzay de la
Universidad de Cuenca”**

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

El descubrimiento de la energía eléctrica transformó la sociedad, su uso en la industria y en los hogares ha permitido que el sector empresarial sea más eficiente y millones de personas mejoren su calidad de vida. En la actualidad, la energía eléctrica es considerada uno de los principales gestores para el desarrollo de un país, está presente en casi todas las actividades humanas, desde la iluminación, telecomunicaciones, servicios públicos, transporte, industria, etc. El consumo eléctrico per-cápita (kWh) se ha magnificado, en la última década superó en 40% al registrado en los años noventa y se espera que esta tendencia se mantenga [1].

La forma tradicional de abastecer a estos miles de usuarios ubicados a cientos de kilómetros de los centros de generación, está definida típicamente por medio de cables de transmisión que transportan la energía desde pocos y grandes centros de generación (centrales hidroeléctricas, etc) hasta subestaciones para su distribución y posterior consumo. Sin embargo, este sistema energético centralizado se enfrenta a varios y serios problemas funcionales y ambientales para su aplicación práctica a nivel global, factores como: altos costos de transmisión, nuevos clientes, y concentración geográfica de los recursos fósiles, ha llevado a los investigadores a buscar nuevas formas de producir energía, siendo una de ellas la implementación de microrredes [2].

Una microrred es un sistema híbrido con autogestión local que se conectan a la red eléctrica a través de un punto común de acoplamiento “PCC” del inglés *point of common coupling*. Generalmente las microrredes están formadas por varias fuentes de generación renovable y algunas convencionales, por ejemplo: biomasa, pilas de combustible, geotérmica, solar, eólica, y motores de combustión interna alternativos [3].

Las microrredes son la evolución de las redes eléctricas tradicionales que ha dejado de ser una teoría para convertirse en realidad. El concepto holista del sistema se está convirtiendo rápidamente en atractivo pues, además de proponer un sistema eléctrico de potencia más eficiente y seguro, ofrece un equilibrio ambiental y económico con la participación de los consumidores, permitiendo que la red se adapte a las necesidades reales de cada usuario y generar una reducción de entre 20% y 25% en los costes de electricidad [4].

En concreto, con la incorporación de microrredes eléctricas se busca provocar un profundo cambio en el modelo eléctrico, crear una matriz energética sustentable, y transformar las redes de distribución sencillas en redes inteligentes con tecnologías modernas [5]. Al formar parte de la red principal, se espera aumentar la eficiencia, eliminar sobrecargas en líneas de transporte y distribución, controlar y optimizar el consumo, reducir las emisiones de CO_2 , equilibrar la generación y la demanda, y posibilitar la penetración del vehículo eléctrico, etc [6].

1.2. Descripción del Problema

Hoy en día, el sector eléctrico se enfrenta a un nuevo paradigma energético muy parecido al que vivió aproximadamente hace 120 años con Nikola Tesla y Thomas Alba Edison de protagonistas. El dilema, la creación de un sistema centralizado o distribuido. Por razones que se estudian en [7], Tesla con su propuesta de producir energía eléctrica en plantas construidas cerca de las fuentes de energía primaria se impuso, y adquirió tanto éxito que sigue vigente hasta nuestros días.

A inicios del siglo 20 con la finalidad de robustecer el sistema eléctrico de potencia convencional se realizó la interconexión de varias compañías. No obstante, en 1960 la red comenzó a fallar: nuevos clientes rurales y urbanos, uso masivo de la energía eléctrica y un sistema complejo que no ha sufrido mayores cambios en los últimos años, lo tornó un sistema ineficiente, con líneas de transmisión fuertemente cargadas y márgenes de estabilidad reducidos [8].

Con el paso del tiempo satisfacer la demanda de electricidad con un costo aceptable se volvió todo un reto, pues la red se enfrenta a problemas aún mayores como el consumo excesivo de combustibles fósiles, y restricciones para la expansión y repotenciación de las líneas de transmisión existentes. En [2] se detallan algunas de las opciones tecnológicas que varios países como Estados Unidos han implementado con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema eléctrico de potencia:

- Transmisión en corriente continua
- Generación distribuida
- Sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna “FACTS” del inglés *Flexible AC Transmission Systems*

A pesar de lo expuesto anteriormente aún existe un alto riesgo de cortes y apagones y más de 1,2 miles de millones de personas sin acceso a la electricidad [8].

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

La monitorización y control del flujo de potencia en microrredes genera un sistema bidireccional que optimiza recursos y busca soluciones a los problemas debido a los picos de demanda [3]. Su capacidad de funcionar conectada a la red o en forma aislada permite aplicarla a redes débiles con el fin de reducir su

vulnerabilidad ante fallos, favoreciendo principalmente a cargas críticas como hospitales, fábricas e instalaciones militares [9].

Hoy en día no existe un sistema de referencia aceptado para microrredes, los trabajos de investigación existentes se basan únicamente en prototipos experimentales [10]. El grado de incertidumbre asociada al costo y el desempeño de la tecnología han sido algunas de las causas. Ecuador no es la excepción, su experiencia en microrredes es nula y a través de este trabajo de titulación se busca conocer el impacto de una microrred sobre el sistema de distribución, sintetizando aspectos relevantes y las tecnologías que se emplean. Las bases para este estudio son adquiridos de experiencias internacionales adaptadas a nuestra realidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio de las diferentes tecnologías de generación y almacenamiento del laboratorio de Balzay, por medio de una simulación en estado estable de la Microrred empleando MATLAB.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento de información de todos los elementos que conforman la microrred del laboratorio de Balzay.
- Diseñar y simular el modelo de la microrred en estado estacionario usando el *Toolbox SimPowerSystems*
- Efectuar un estudio económico de los costos de generación de las energías renovables.
- Desarrollar un sistema de gerenciamiento de energía.

1.4. Contribución de la Tesis

Es importante contar con documentos que sintetizen todos los estudios, tecnologías y aspectos relevantes de las energías renovables en el país. Ecuador por su ubicación geográfica cuenta con un gran potencial,

principalmente de origen hídrico. Sin embargo, no se conoce con certeza que potencial se tiene en biomasa, geotérmica, eólica y energía solar, etc. pues muchos de los posibles proyectos solo tienen estudios de pre-factibilidad [11].

Integrar energías renovables al sistema eléctrico de potencia por medio de microrredes es el objetivo a mediano y largo plazo, por ello, hoy en día se volvió una necesidad conocer sobre la operación y naturaleza de las microrredes.

En la actualidad, una forma segura y económica de probar un nuevo sistema o realizar mejoras a uno existente, es mediante una simulación. La simulación es una herramienta que permite imitar la realidad, logrando que el analista obtenga una mayor comprensión de la operación y características del sistema.

Una simulación tiene reglas y variables de operación tanto de entrada como de control que pueden ser manipuladas y reajustadas de acuerdo a las necesidades del usuario. Su duración es especificada por el analista (horas, minutos o segundos) y no viene dado en tiempo real, permitiendo correr varios experimentos en un corto período de tiempo [12].

Existen varios programas computacionales que permiten simular sistemas eléctricos, y entregar resultados muy certeros. Por su gran flexibilidad se ha escogido el programa MATLAB, el cual mediante su herramienta *Simulink* permite modelar las distintas fuentes de generación y almacenamiento e incorporar los recursos energéticos como la energía eólica y la solar fotovoltaica.

El modelo incluye características y componentes propias de las redes eléctricas:

- Barras
- Transformadores
- Líneas de transmisión

- Cargas
- Convertidores AC/DC y DC/DC (intrínsecos dentro de la simulación).
- Modelo de la planta fotovoltaica en régimen permanente.
- Modelo de la planta eólica en régimen permanente
- Modelación estática del sistema de almacenamiento (batería de plomo ácido, lón litio, y flujo de vanadio, banco de supercondensadores, y vehículo eléctrico), además se incluye el estado de carga “SOC” del inglés *State of charge*.
- Modelo del generador a diésel en régimen permanente.
- Modelo del generador de gas licuado de petróleo (GLP) en régimen permanente.
- Modelo de la turbina hidrocínética en régimen permanente.

La simulación no permite monitorear ni controlar el funcionamiento del centro científico y tecnológico Balzay, pero si comparar los resultados con los obtenidos en la operación real, ya que al momento, en el laboratorio se han probado la mayoría de los equipos con los valores nominales establecidos por el fabricante. En base a esto, se podrá analizar posibles mejoras para lograr un óptimo funcionamiento.

Los resultados se visualizan en forma gráfica y se muestra la capacidad de la microrred para cubrir la demanda ante la falta de una fuente de generación y la respuesta del banco de baterías sobre todo en horas pico.

Por otro lado, el despacho económico está orientado a optimizar el uso de los recursos en diferentes períodos de tiempo, permitiendo una redistribución de los flujos de potencia, a partir del conocimiento previo del comportamiento de la carga y el clima.

1.5. Antecedentes

El concepto de microrredes se fue creando de forma progresiva, y sus inicios se remonta a la década de los 90 con la incorporación de medidores automáticos. Sin embargo, fue el aumento en el precio de los combustibles fósiles, la alimentación eléctrica de islas o pueblos remotos y el deseo de optimizar y monitorear el consumo energético que impulsó las primeras instalaciones [13].

El concepto completo de microrred fue concebido en el año 2005 y su evolución ha surgido en forma aislada. En el 2000, Italia crea el primer proyecto masivo de contadores que abarcó cerca de 27 millones de hogares. Posteriormente, en el 2002 con la ayuda de un simulador se logró estudiar y analizar muchos problemas antes de la experimentación de un sistema real. Con el pasar de los años se desarrollaron dispositivos de acumulación de gran capacidad, y medidores inteligentes que controlan el gasto energético de cada uno de los consumidores [14]. Por ejemplo, en [15] se señalan algunos estudios sobre microrredes enfocados en optimizar el funcionamiento y así reducir costos de operación.

Las microrredes han evolucionado de diferente forma alrededor del mundo, ya que no todos los gobiernos han creado políticas adecuadas que fomenten su desarrollo. Los países más desarrollados han realizado grandes avances, mientras que el resto de países han comenzado a dar pequeños pasos. Entre los países más avanzados se destacan Estados Unidos, la Unión Europea, Japón, Canadá y China. En el otro extremo se hallan el resto de los países de Asia, África y Latinoamérica [2].

A continuación, se aborda las experiencias internacionales de mayor importancia en el desarrollo de microrredes y se dividen de acuerdo a su distribución geográfica.

1.5.1. Redes inteligentes en América Latina

- **Puerto Rico:** La microrred incluye plantas de gas, eólicas, residuos sólidos y fotovoltaicos. La comunicación y el control es proporcionado por un sistema de radio mejorado y nuevos sistemas de comunicaciones de banda ancha [16].
- **Sistema integrado de energía de la Mesa del Sol (México):** Está formado por un sistema fotovoltaico (50 kW), una celda de combustible (80 kW), un motor-generador alternativo (240 kW) y un banco de baterías [16].
- **Huatocondo (Chile):** Huatocondo es la primera localidad de Chile con una microrred eléctrica, cuenta con una turbina eólica, paneles solares, banco de baterías y un grupo electrógeno. El proyecto construido en septiembre del 2010 fue nombrado por la comunidad como Energía Sustentable Cóndor (ESUSCON) [17].

1.5.2. Redes inteligentes en América del Norte

- **Boston Bar - BC Hydro (Canadá):** La microrred está formada por dos generadores hidráulicos de 4,32 MVA y tiene una potencia total instalada de 3 MW [18].
- **Smart Grid City (Boulder-Colorado):** El proyecto cuenta con la conexión de 35.000 hogares y empresas con sistemas automatizados que aprovechan todo tipo de energías renovables a través de sistemas de comunicaciones bidireccionales. El objetivo es experimentar y aprender sobre las energías que los usuarios prefieren y las tecnologías más eficientes para mejorar el suministro de energía [17].
- **Smart Grid Innovation (Ruston-Louisiana):** Es el mejor proyecto sobre microrredes de Estados Unidos, el eje del programa es el uso de contadores inteligentes, que incluye la normalización de las lecturas, integración de perfiles de carga, agregación y supresión de datos, almacenamiento centralizado y análisis de pérdidas [17].

- **Ohio Grid Smart:** El proyecto pretende probar nuevas tecnologías como: vehículos eléctricos, sistemas de almacenamiento de energía, elementos de generación distribuida (70 kW en paneles fotovoltaicos), elementos web y dispositivos informativos [17].

1.5.3. Redes inteligentes en Europa

- **Dinamarca:** Tiene el potencial de energía eólica más alta del mundo y lo ha aprovechado para generar el 30% de su electricidad. Su sistema controla la demanda, además de permitir la incorporación del vehículo eléctrico [16].
- **Bronsbergen Holiday Park microgrid (Netherlands):** La capacidad de generación es de 315 kW (proviene de 108 paneles fotovoltaicos) y satisface 208 casas vacacionales. Cuenta con baterías para el almacenamiento de energía [16].
- **The Residential Microgrid of Am Steinweg in Stutensee (Germany):** Tiene diferentes instalaciones fotovoltaicas de 35 kWp y un banco de baterías de plomo ácido que pueden entregar energía durante media hora. En total, 101 apartamentos están vinculados a la microrred [18].
- **Cesi Ricerca der test microgrid (Italy):** Está constituido por varias fuentes de generación y cargas controlables. Monitorea la calidad de transitorios mediante técnicas de optimización [18].
- **Proyecto de microrredes de la comunidad de la isla de Kythnos (Greece):** El proyecto está formado por un conjunto fotovoltaico que electrifica casas con controladores de carga, un banco de baterías y un motor diésel [8].
- **Laboratory-scale microgrid system at National Technical University of Athens (NTUA)-Greece:** Es un sistema de prueba que consta de dos generadores fotovoltaicos, una turbina eólica y baterías para el almacenamiento de energía [18].

- **Demotec test microgrid system (German):** Consta de dos unidades de batería, generador diésel, generador fotovoltaico y generador eólico. Existen varias cargas con diferentes niveles de prioridad [18].
- **Vizcaya (España):** Proyecto español cuyo principal objetivo es estudiar la viabilidad de instalar microrredes sobre la red de media tensión, para ello, combina tecnologías de generación y almacenamiento como: almacenamiento de hidrógeno, volantes de inercia, micro-turbinas, pilas de combustible, supercapacitores [19].

1.5.4. Redes inteligentes en Asia

- **Hachinohe project (Japón):** El proyecto trata de utilizar la distribución de electricidad y la comunicación, consta de un motor de gas, varios sistemas fotovoltaicos, caldera de vapor y baterías para almacenamiento. Se realiza la planificación semanal de la oferta y la demanda, el control de despacho una vez cada 3 min, y el de potencia segundo a segundo [19].
- **Test microgrid at the Institution of Engineering and Technology (India):** Es un modelo experimental a escala de laboratorio de 3,2 kVA, 415 V, trifásico y de 50 Hz, consta de dos inversores, un rectificador no controlado y un generador de inducción [18].
- **Singapur:** El proyecto piloto está ubicado en Pulau Ubin y tiene como objetivo estudiar la respuesta a la demanda de energía, la gestión de la carga y el compromiso por parte del usuario. Contará con 4.500 contadores inteligentes y la integración de fuentes de energía en la modalidad plug&play mediante el uso de sistemas fotovoltaicos y pequeñas plantas de cogeneración [16].
- **Sistema de energía distribuida (Nepal):** Tiene un total de 2.200 plantas microhidráulicas con una potencia total de 20 MW. Actualmente suministran electricidad a unas 200.000 personas [8].

CAPITULO 2

2. Fundamentos teóricos de las microrredes

En este capítulo se presenta el concepto general de microrred, y se describe brevemente algunas tecnologías que la conforman sin ningún orden en especial.

2.1. Generación distribuida (GD)

La Generación Distribuida es un sistema que comprende elementos de generación de pequeña y media escala que va de 1kW a varios MW y se encuentran ubicadas cerca de los usuarios, conectadas a la red de distribución. Las fuentes de generación generalmente usan energías renovables no convencionales, aunque en algunos casos se utiliza generadores a base de combustibles fósiles [20]. Las principales características de las GD son:

- Estar conectada a la red de distribución
- Exceso de generación puede ser un aporte a la red de distribución
- No existe una planificación centralizada de la generación

Los beneficios de tener este tipo de tecnología en los hogares son los siguientes:

- Minimizar las pérdidas de energía.
- Ayuda a estabilizar los flujos de energía en momentos de demanda máxima.
- Mejora la calidad del servicio eléctrico.
- Al estar cerca de los consumidores, evita el transporte de energía a grandes distancias.
- Amigable con el medio ambiente al utilizar fuentes de energías renovables

2.2. Microrred

Una microrred es un sistema de media-baja tensión de pequeña y mediana escala que genera energía eléctrica usando en su mayoría fuentes renovables no convencionales (eólico, fotovoltaico, biomasa, etc.). También tiene motores de combustión interna y equipos de almacenamiento (baterías de ión litio, supercondensadores, pilas de hidrógeno, etc.).

Las microrredes se encuentran ubicadas cerca del consumidor con el propósito de reducir la distancia física y eléctrica entre la generación y las cargas, con el objetivo de mejorar la confiabilidad, disminuir las pérdidas por transmisión y reducir las emisiones de carbono. Están formadas por cargas y fuentes distribuidas que actúan como una única entidad controlable que puede conectarse y desconectarse intencionalmente de la red principal por medio de interruptores siempre y cuando cumpla con los límites eléctricos definidos, es decir, las fluctuaciones de voltaje y frecuencia no son aceptables [21].

Una microrred puede tener diferentes configuraciones dependiendo de la disponibilidad, ubicación y características de las fuentes de energía y la distribución geográfica de las cargas. Su capacidad máxima es menor a 10MVA [18].

Los beneficios de las microrredes son:

- Aumento en la calidad y confiabilidad del sistema
- Descentralización de la generación
- Reducción del precio de la electricidad, tanto en la transmisión como distribución.
- Óptima utilización de tecnologías de energías renovables
- Mecanismo de respaldo para prevenir un Blackout

La figura 2.1 muestra el esquema de una microrred con elementos de generación, almacenamiento y carga.

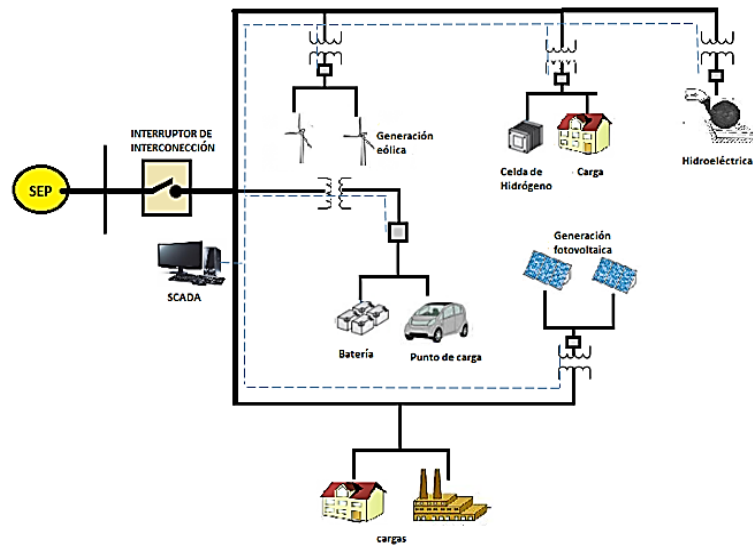


Figura 2.1 Esquema de una microrred eléctrica

2.3. Configuraciones de la microrred

El estándar *IEEE 1547.4-2011* establece varias configuraciones para microrredes eléctricas, dependiendo del tipo de conexión y la cantidad de fuentes de generación.

- **Configuración local**

La configuración local (aislamiento local) se muestra en la figura 2.2 enmarcada en un círculo de color negro. Esta configuración está formada por varias fuentes de generación y cargas conectadas dentro de las instalaciones de un cliente. Se conecta en paralelo al sistema eléctrico de potencia (SEP) para evitar futuras desconexiones [22].

- **Configuración secundaria**

La configuración secundaria (aislamiento secundario) se muestra en la figura 2.2 enmarcada en un cuadrado de color fucsia. Esta configuración tiene uno o más fuentes y varios clientes conectados en el lado secundario del transformador de distribución [22].

- **Configuración lateral**

La configuración lateral se muestra en la figura 2.2 enmarcado en un cuadrado de color rojo. Esta configuración se encuentra formada por varias cargas servidas por un alimentador lateral de la red, y una fuente distribuida que supe toda la demanda [22].

- **Configuración tipo circuito**

La configuración tipo circuito (aislamiento de circuito) se muestra en la figura 2.2 enmarcado por líneas punteadas de color azul. Esta configuración está formada por cargas conectadas a un único alimentador. En caso de existir una falla en la microrred, ésta se desconecta por medio de un interruptor de potencia, y las fuentes de generación locales son las encargadas de proporcionar la energía necesaria para las cargas [22].

- **Configuración tipo barraje de subestación**

La configuración tipo barraje de subestación (aislamiento barraje de subestación) se muestra en la figura 2.2 enmarcado por líneas punteadas de color rojo. Las cargas se encuentran conectadas a una sola barra dentro de la subestación. Las fuentes distribuidas llegan a operar si existe pérdida de un alimentador, transformador o subestación [22].

- **Configuración tipo subestación**

La configuración tipo subestación se muestra en la figura 2.2 enmarcado por líneas punteadas de color verde. Las cargas en esta configuración están conectadas en una única subestación, se utiliza cuando la subestación de distribución o un transformador está fuera de servicio y no es posible suministrar la totalidad de la carga. Además permite aliviar problemas de sobrecarga o sobrevoltaje en el transformador [22].

- **Configuración tipo circuito colindante**

La configuración de circuito colindante es la unión de un circuito tipo subestación más el de aislamiento de circuito adyacente (ver figura 2.2). En este tipo de configuración, las cargas se encuentran suministradas por una

microrred aislada contigua. Esta configuración es de gran utilidad en caso de que exista pérdida de los alimentadores de la subestación principal [22].

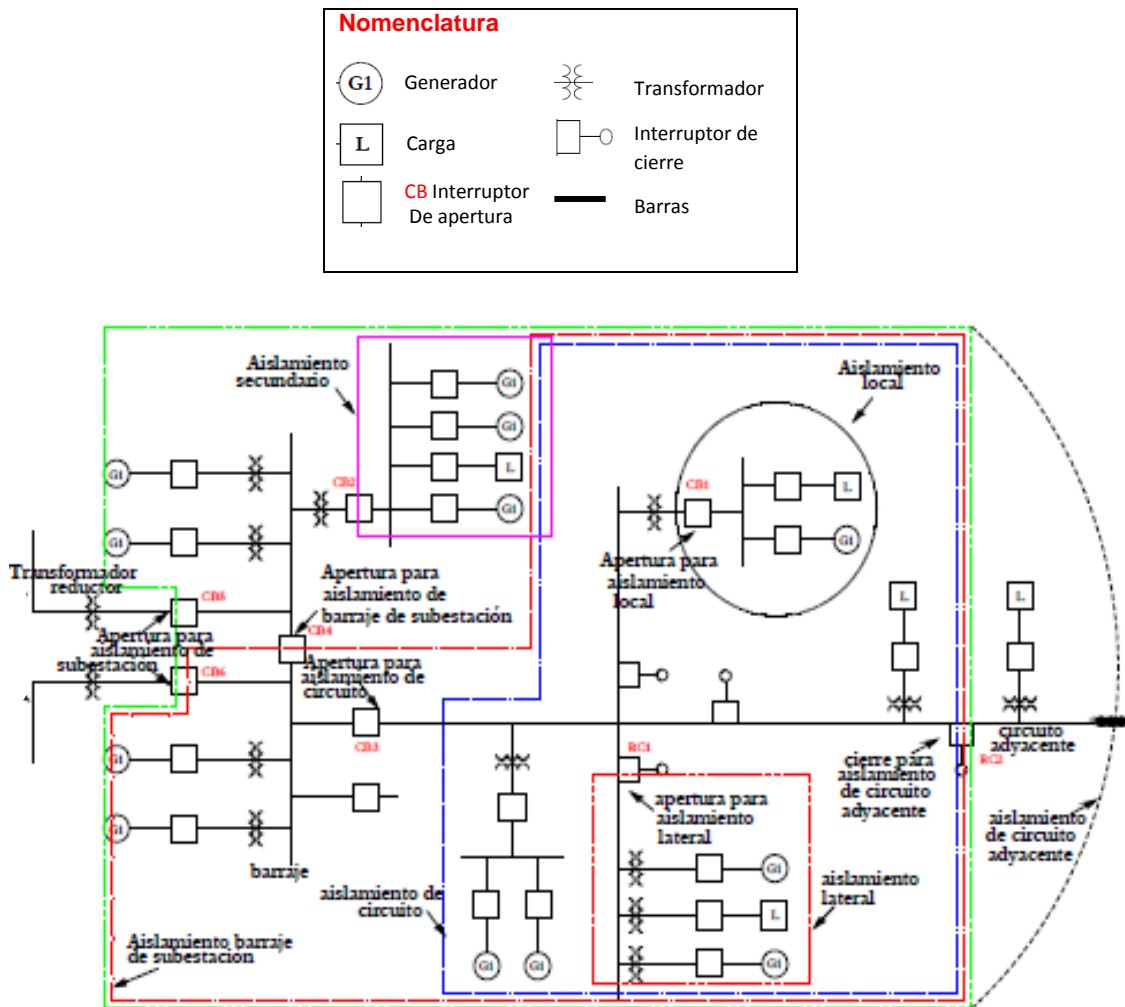


Figura 2.2 Tipos de configuración de la microrred [22]

2.4. Modos de operación de la microrred

La microrred puede operar de forma aislada o conectada a la red. Adicionalmente, dentro de su operación normal la microrred debe ser capaz de desconectarse y reconectarse al sistema eléctrico de potencia (SEP) al que pertenece [22].

La desconexión de la microrred puede ser intencional u ocasiona por fallas en los equipos; por su parte, la reconexión se realiza para que la microrred vuelva a formar parte del SEP, siempre que cumpla con los rangos de voltaje, frecuencia y ángulo de fase establecido por el estándar *ANSI C84.1-2006*.

Luego de la reconexión, las fuentes deben volver a funcionar bajo el estándar de *IEEE 1547* [22].

- **Aislada:** Una microrred aislada debe tener diferentes parámetros de estabilidad para proveer la potencia requerida de las cargas en el sistema, garantizando así el funcionamiento de cada una de éstas, siendo los parámetros de voltaje y frecuencia de mayor importancia. Esta configuración de operación tiene una amplia reserva de energía en cuanto a generación distribuida y en sistema de almacenamiento. Paralelamente este modo de operación tiene procesos preestablecidos en momentos de inestabilidad energética, por ejemplo monitoreo y deslastre de cargas [22].
- **Conectado a la red:** Una microrred para formar parte del gran SEP, debe cumplir con parámetros establecidos por el estándar *ANSI C84.1-2006* que hace referencia a la sincronización de voltaje, frecuencia y ángulos de fase de los dos sistemas. La conexión inicia el momento que se encuentren en rangos permitidos, este modo de operación de la microrred asegura un óptimo trabajo de las cargas. Con esta configuración se establece nuevas formas de funcionamiento de la microrred obedeciendo a los requerimientos del SEP [22].

2.5. Equipos que forman parte de una microrred

2.5.1. Equipos de generación

En una microrred los equipos de generación se pueden seleccionar dependiendo de la energía primaria que utilicen, lo cual será una ventaja para los usuarios. A continuación se presenta diferentes tipos de generación y sus principales características técnicas.

2.5.1.1. Energía fotovoltaica

Una de las tecnologías verdes más prometedoras y maduras del mercado, es la generación de electricidad a partir de luz solar, sobre todo las pequeñas instalaciones. En la actualidad, cuenta con muchas mejoras y ventajas como:

energía sostenible a largo plazo, impacto ambiental positivo y funcionamiento silencioso. Sin embargo, consideraciones como alto costo de instalación, baja eficiencia energética, y restricción a ciertos lugares han reducido su penetración a gran escala [23], [24].

Los paneles fotovoltaicos producen energía eléctrica por medio de la conversión directa de la radiación solar, también llamado efecto fotoeléctrico. Por ello, es muy utilizada en zonas que tienen apreciable incidencia solar. La construcción de paneles fotovoltaicos se basa comúnmente en materias primas como el silicio cristalino (policristalino y monocristalino), ya que este tipo de tecnología representa un 80% del mercado mundial [25].

Los paneles fotovoltaicos tienen un promedio de eficiencia 14% - 22% en la conversión de la radiación solar a energía eléctrica y se estima que en el mercado mundial el 6.9% son de capa fina. Sin embargo, se espera que este porcentaje aumente en los próximos años, minimizando costos de producción y mejorando el nivel de eficiencia energética. Los paneles fotovoltaicos se puede conectar de dos maneras [26].

- **Conexión en serie:** En este tipo de conexión conforme aumente los paneles fotovoltaicos la tensión eléctrica se eleva en los terminales y la corriente se mantiene constante.
- **Conexión en paralelo:** En esta conexión la corriente aumenta dependiendo de la cantidad de celdas fotovoltaicas conectadas, mientras la tensión eléctrica se mantiene invariable.

2.5.1.2. Energía eólica

Hoy en día, la energía eólica es una de las energías renovables más abundantes y de mayor crecimiento en los últimos años, gracias a la caída de costos de generación [23].

El aerogenerador es un generador eléctrico que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de una hélice y un alternador. La conexión a la red de distribución se realiza mediante inversores de potencia

que permiten regular la tensión, de esta manera modificando el consumo y la generación de potencia activa [26].

Existen diferentes tipos de aerogeneradores que van desde 1kW hasta los 12MW, llegando a consolidar un porcentaje de fiabilidad de las máquinas de 57%. Estos pueden trabajar solos o agrupados en parque eólicos distanciados unos de otros. Se pueden clasificar en [26].

- **Aerogenerador de eje horizontal**

Actualmente esta turbina es la más común en aplicaciones de pequeña escala, y muy utilizados en zonas con vientos mayores a 5m/s. Brindan un rango óptimo de seguridad al minimizar riesgos en los equipos por los fuertes vientos [27].

- **Aerogenerador de eje vertical**

Un aerogenerador de eje vertical, es utilizado en zonas con velocidades de viento muy bajas. Una de sus principales ventajas es que no requiere un sistema de orientación, eliminando así complejos mecanismos de direccionamiento y por su diseño se puede colocar prácticamente a nivel de la superficie evitando así costos de grandes torres. El rendimiento de esta tecnología es menor a comparación del aerogenerador de eje horizontal, comúnmente son utilizados para pequeñas instalaciones (menores de 10kW) por su menor tamaño y fácil mantenimiento [27].

2.5.1.3. Electrógenos con motores de combustión interna

2.5.1.3.1. Generador a diésel

Es una tecnología con muchos avances técnicos, su rango de potencia está entre los 15kW y los 20.000kW dependiendo del tamaño y el consumo.

Su principal fuente de energía es el diésel y su eficiencia energética es del 40%, esto dependerá de la temperatura de combustión de los gases (400°C), tamaño del generador y robustez eléctrica a baja carga. Tiene un bajo costo inicial y una vida útil promedio de 25 años, además utiliza poco espacio a comparación de otros tipos de generación. Un generador a diésel puede llegar

a tener un alto rango de operación, la desventaja de este tipo de tecnología son las emisiones de CO_2 a la atmosfera y daño al ambiente [26], [27].

2.5.1.3.2. Generador de gas licuado de petróleo (GLP)

Los generadores de GLP han tenido un gran avance tecnológico en los últimos años gracias a la industria aeronáutica. Su principal fuente de energía es el gas licuado de petróleo y su capacidad de generación eléctrica es de 15kW a 50.000kW. La eficiencia energética tiene un promedio de 30% y la eficiencia térmica de 55%, debido a la combustión de los gases ($600^{\circ}C$). Tiene un alto grado de seguridad y robustez, son muy compactos y el costo inicial es bajo. Esta tecnología tiene doble propósito, ya que las altas temperaturas en el proceso pueden utilizarse para la generación de vapor [26].

2.5.1.4. Energía hídrica

La energía hídrica se obtiene a partir de la energía cinética y potencial del agua. El agua puede provenir de un canal, una pequeña represa, o un gran embalse (ver figura 2.3). Actualmente, se considerada como un tipo de energía renovable convencional ya que no emite gases de efecto invernadero. No obstante, la construcción de las represas produce un gran impacto ambiental, debido a que se modifica la calidad del agua, se inunda grandes superficies de terreno, y se desvía el caudal de río [26].

Una de sus principales ventajas es soportar las variaciones de la demanda, pero para garantizar una operación óptima requiere de una alta inversión inicial para la construcción del embalse [23].

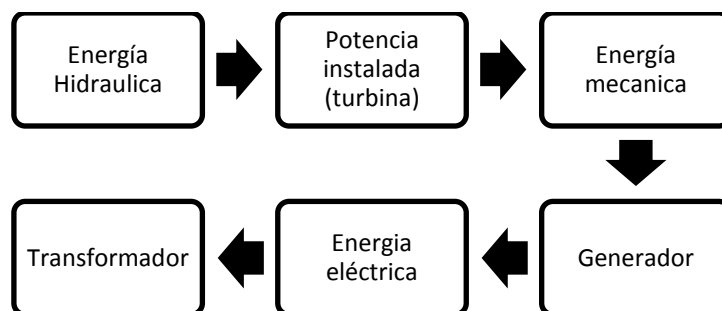


Figura 2.3 Ciclo para obtener energía eléctrica a partir del movimiento del agua

La energía hídrica se puede transformar a muy diferentes escalas, es decir, las potencias obtenidas varían de 0,1MW a 10MW, todo dependerá del lugar donde funcionara la central, el tamaño del embalse y el tipo de turbina que se instale. La turbina hidráulica es uno de los equipos más eficientes de la industria energética gracias a su rendimiento promedio del 80% y a su rápido arranque. Dependiendo del lugar y el embalse estas se pueden clasificar en [28]:

- **Turbinas de acción:** son aquellas que utiliza únicamente el flujo del agua para mover las turbinas, es decir que la relación del caudal y la altura de la represa sea mínima, por lo tanto representa velocidades bajas (turbinas Pelton).
- **Turbinas de reacción:** este tipo de turbinas utilizan energía cinética y presión para mover el rodete, la relación del caudal y la altura es mayor a comparación de las turbinas de acción, (turbinas Francis, Hélice, Kaplan, Deriaz, Bulbo y Straflo).

En los últimos años una tecnología que ha jugado un papel muy importante en la generación de energía a pequeña escala, es la microturbina. La microturbina solo necesita una pequeña cantidad de agua para hacer girar su eje, esta porción de agua se puede obtener de un canal adjunto al río logrando que el impacto ambiental sea mínimo [29].

2.5.2. Sistemas de almacenamiento de energía

Las grandes variaciones de energía eléctrica que existen en un microrred debido al uso de fuentes de generación intermitentes, exige el uso de equipos de almacenamiento para solventar la demanda en determinadas horas del día. En la actualidad, las baterías son las más utilizadas debido a su tamaño y eficiencia. No obstante, se debe aún reducir sus costes y plantear estrategias para manejar sus desechos luego de culminar su vida útil [30].

La aplicación de este tipo de tecnología depende principalmente de dos parámetros [26]:

- **Tiempo de descarga:** es el tiempo que necesita para entregar energía al sistema de manera eficiente y continúa.
- **Tiempo de carga:** En el tiempo de carga de las baterías va a depender de la cantidad de unidades que se tiene a disposición y la capacidad eléctrica.
- **Capacidad de almacenamiento:** la cantidad de energía que puede almacenar el equipo expresado en kWh.

Las baterías y su control pueden estar a cargo de una empresa de servicios públicos o un cliente siempre que se mantenga la eficiencia y calidad de energía [30].

Los equipos más usados y con mayor madurez son:

2.5.2.1. Baterías de flujo-vanadio

Son baterías que almacenan energía eléctrica con principios electroquímicos, su componente principal es un elemento abundante en la corteza terrestre, el vanadio en forma líquida. Estas baterías usan pares redox disueltos en mezclas de ácido sulfúrico, separados por una membrana para que los fluidos de las diferentes cargas eléctricas no se mezclen, realizando un bombeo continuo desde los depósitos de acumulación generando de esta manera corriente eléctrica. Por su composición química los líquidos tienen una vida útil indefinida ocasionando así que este tipo de almacenamiento sea infinito. La cantidad de energía que puede almacenar depende de la cantidad de líquidos que se coloca [31].

Las baterías se pueden llegar a optimizar para potencia activa (MW) o reactiva (MVar), considerando que con su rapidez de respuesta puede proporcionar al sistema este tipo de aportación. Estas baterías son muy utilizadas en estaciones eólicas o solares, debido a su gran soporte en incrementos repentinos de carga [26].

2.5.2.2. Batería de plomo ácido

Las baterías de plomo ácido almacenan energía eléctrica en forma de energía química, su funcionamiento se realiza a través de reacciones

electroquímicas con un depósito de ácido sulfúrico y placas de plomo, el material de carga positiva, el óxido de plomo y la carga negativa, el plomo metálico. El proceso de carga se realiza a través de un generador de corriente continua (CC) colocado en los polos de la batería y del generador. Al circular corriente por los elementos provoca reacciones químicas en los electrodos, ocasionando que almacene energía. Esta tecnología es muy utilizada, debido a su tamaño y rápida respuesta a cargas pequeñas, también son sensibles a las altas corrientes o sobrecargas de las baterías, corriendo el riesgo de reducir su vida útil [31]

2.5.2.3. Baterías de ion-litio

Las baterías de ion-litio están formadas por varias celdas electroquímicas que usan sal de litio como electrolito. Durante la carga se producen reacciones electroquímicas generando un flujo de los electrones en un circuito cerrado, permitiendo que la batería se recargue debido a la diferencia de potencial en los electrodos, son muy utilizadas en la industria de dispositivos electrónicos por ejemplo: celulares, laptops, etc. Algunos son usados en autos eléctricos, debido a que tienen una alta capacidad de almacenamiento [32].

Hoy en día, existen dos tipos de esta tecnología empleada en el campo eléctrico:

- **Baterías de titanio de litio:** están compuestas de manganeso en sus cátodos y titanio de litio en sus ánodos, siendo una manera eficaz y rápida de cargar debido a sus elementos químicos, una de las ventajas de esta tecnología es su buen rendimiento en bajas temperaturas.
- **Baterías de fosfato de litio:** utilizan fosfato de hierro en los cátodos convirtiéndose en un elemento seguro. Debido a su composición química se reduce la opción de que los electrodos liberen oxígeno, minimizando el riesgo de explosión. Este tipo de tecnología es una opción viable a utilizar en redes eléctricas.

2.5.2.4. Celdas de hidrógeno

Uno de los elementos más abundante del universo, es el hidrógeno. En el panorama actual, se considera una de las fuentes de energía más prometedora. Sin embargo, en nuestro planeta difícilmente se encuentra en estado libre, generalmente está unido a otros elementos como la madera, carbón, petróleo, gas y el agua, por lo cual se recurre a diversos procesos para su obtención [33].

El método más utilizado en la industria para la producción de hidrógeno se basa en la reacción química del hidrógeno en unión con el oxígeno generando agua, calor y electricidad. Tiene dos electrodos y un electrolito al igual que una pila convencional, este tipo de almacenamiento contiene una eficiencia energética de 35%-50% y es amigable con el medio ambiente. Debido a su tamaño es muy fácil de utilizar, permite confiabilidad y robustez en el suministro ofreciendo gran seguridad [26].

Las celdas de hidrógeno son diferentes a las baterías debido a que sus reactivos no se encuentran dentro de ella, es decir, el combustible se suministra de manera externa para producir electricidad y su funcionamiento no tiene interrupciones [34].

Hoy en día, esta tecnología no está totalmente desarrollada y su costo aún es muy elevado, pero se espera que en el futuro el costo de la electrólisis y su eficiencia mejore y sea viable desde el punto de vista económico [33].

2.5.2.5. Supercondensadores

Los supercondensadores son una tecnología nueva de almacenamiento, su funcionamiento es similar a los condensadores tradicionales. Estos dispositivos electromecánicos tienen dos electrodos porosos sumergidos en una solución electrolítica [35], su almacenamiento se basa en las fuerzas electroestáticas. Debido a su gran capacidad de almacenamiento y su alta corriente de descarga, este tipo de tecnología se utiliza comúnmente para: solventar completamente las cargas en sistemas autónomos y proporcionar energía suficiente en las horas de máxima demandas [36].

2.5.3. Inversores

Los inversores son equipos electrónicos con un circuito capaz de transformar corriente continua en corriente alterna (CC/CA). Los inversores se pueden calificar en dos grupos: monofásicos y trifásicos, cada uno con elementos de electrónica de potencia, (BJT, MOSFET, IGBT) para su activación y desactivación controlada, y modulación de ancho de pulso “PWM” del inglés *pulse-width modulation* para producir AC. Estos equipos son indispensables en una microrred con fuentes de energías renovables dado que la generación de estos tipos de tecnologías aporta con corriente continua, de tal manera no puede ser utilizado en la red eléctrica convencional [37].

De acuerdo a la alimentación del inversor se puede calificar en dos grupos:

- **Inversores alimentador por tensión (VSI):** Se usan si la tensión de entrada permanece constante, se conectan en paralelo para evitar corrientes circulantes entre los inversores. El VSI a menudo está conectado a dispositivos de almacenamiento y su ventaja es que no necesita una referencia externa para mantenerse sincronizado.
- **Inversores alimentados por corriente (CSI):** Se usan si la corriente de entrada es constante, generalmente se conectan a equipos que necesitan un algoritmo que muestre los puntos máximos de potencia como pequeñas turbinas o generadores fotovoltaicos.

En la microrred se puede tener trabajando al mismo tiempo el CSI y el VSI.

2.5.4. Vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico (VE) y los vehículos híbridos eléctricos enchufables “PHEV” del inglés *plug-in hybrid electric vehicle*, son equipos que consumen electricidad y en el caso del vehículo híbrido también combustibles fósiles. Los sistemas de almacenamiento que predominan en este tipo de vehículos son las baterías de ion-litio, por ser compactas y eficientes [38].

- **Vehículos híbridos enchufables (PHEV):** Este equipo combina un motor de combustión interna y un motor eléctrico. Su principal característica es un sistema de recuperación de energía por freno, permitiendo al motor eléctrico funcionar como generador por un pequeño lapso de tiempo, de esa manera recarga las baterías del vehículo. Otra opción para cargar su batería es enchufándolo a la red eléctrica.
- **Vehículos eléctricos (VE):** Este tipo de vehículos dependen directamente de un motor eléctrico, alimentando por una batería recargable.

La integración de vehículos eléctricos es todo un reto, pues la red eléctrica debe acondicionarse para solventar su consumo. Sin embargo, la reducción de gases de efecto invernadero lo vuelve un sistema viable.

2.5.5. Sistema de control (SCADA)

Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos “SCADA”, del inglés *Supervisory Control and Data Acquisition*, es un concepto que se emplea a un sistema de adquisición de datos y control supervisor. Originalmente un sistema SCADA fue diseñado para tener un control centralizado de procesos industriales distribuidos sobre áreas muy extensas, con ayuda de sensores y actuadores, facilitando una retroalimentación en tiempo real. La figura 2.4 muestra el esquema de un sistema SCADA [39].

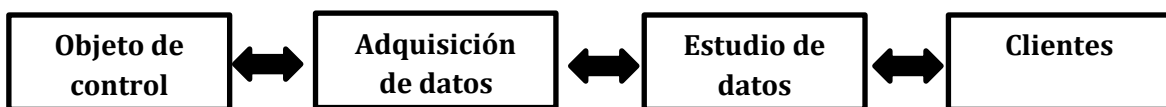


Figura 2.4 Sistema SCADA [39]

- **Objeto de control:** es el proceso que se desea revisar, suministrando datos que será útil para el siguiente proceso.
- **Adquisición de datos:** mediante sensores e instrumentos de medición envían datos por medio de una interface de comunicación al centro de operación.

- **Estudio de datos:** un conjunto de equipos electrónicos que permite la visualización de datos obtenidos anteriormente.
- **Clientes:** elementos que utilizan los datos obtenidos en el sistema SCADA para realizar una efectiva maniobra.

Un sistema SCADA para solucionar los problemas tiene elementos automáticos, como controladores automáticos programables “PLC” del inglés *Programmable Logic Controller* y controladores de automatización programable “PAC” del inglés *Programmable Automation Controller*, estos elementos electrónicos pueden actuar de forma automática evitando así la presencia de un operador en el sitio de falla [39].

Para que un sistema SCADA sea eficiente debe cumplir varios objetivos [39]:

- **Arquitectura abierta:** capaz de modificar y adaptarse a las necesidades de la empresa.
- **Fácil comunicación:** una fácil interacción entre el usuario y el equipo que se encuentra en la planta.
- **Fácil de instalar y utilizar:** que no exista complicaciones con el hardware al momento de instalar los equipos.
- **Económicos:** se refiere a que los equipos no deben ser de costo elevado para cumplir el mismo requisito que un equipo barato.
- **Confiables:** con la configuración de diferentes equipos y fabricantes, sea una red confiable que se pueda comunicar entre ellos, sin ocasionar alguna falla.

2.5.6. Sistema de medición de energía

Este sistema es utilizado para determinar la economía y consumo de una microrred. En la actualidad se ha implementado un medidor inteligente, con el fin de ahorrar energía y dinero a los usuarios que están conectados a la red convencional, una opción factible para las microrredes es la implementación de medidores bidireccionales, los cuales consisten de dos funciones: cuando la microrred se encuentra en horas de máxima producción inyecta energía a la

red de distribución, de esa manera se calcula la cantidad de energía y el costo de producción. La segunda opción, la microrred consume energía de la red de distribución y se realiza una comparación de la energía consumida y generada [40]. La figura 2.5 muestra un medidor bidireccional.

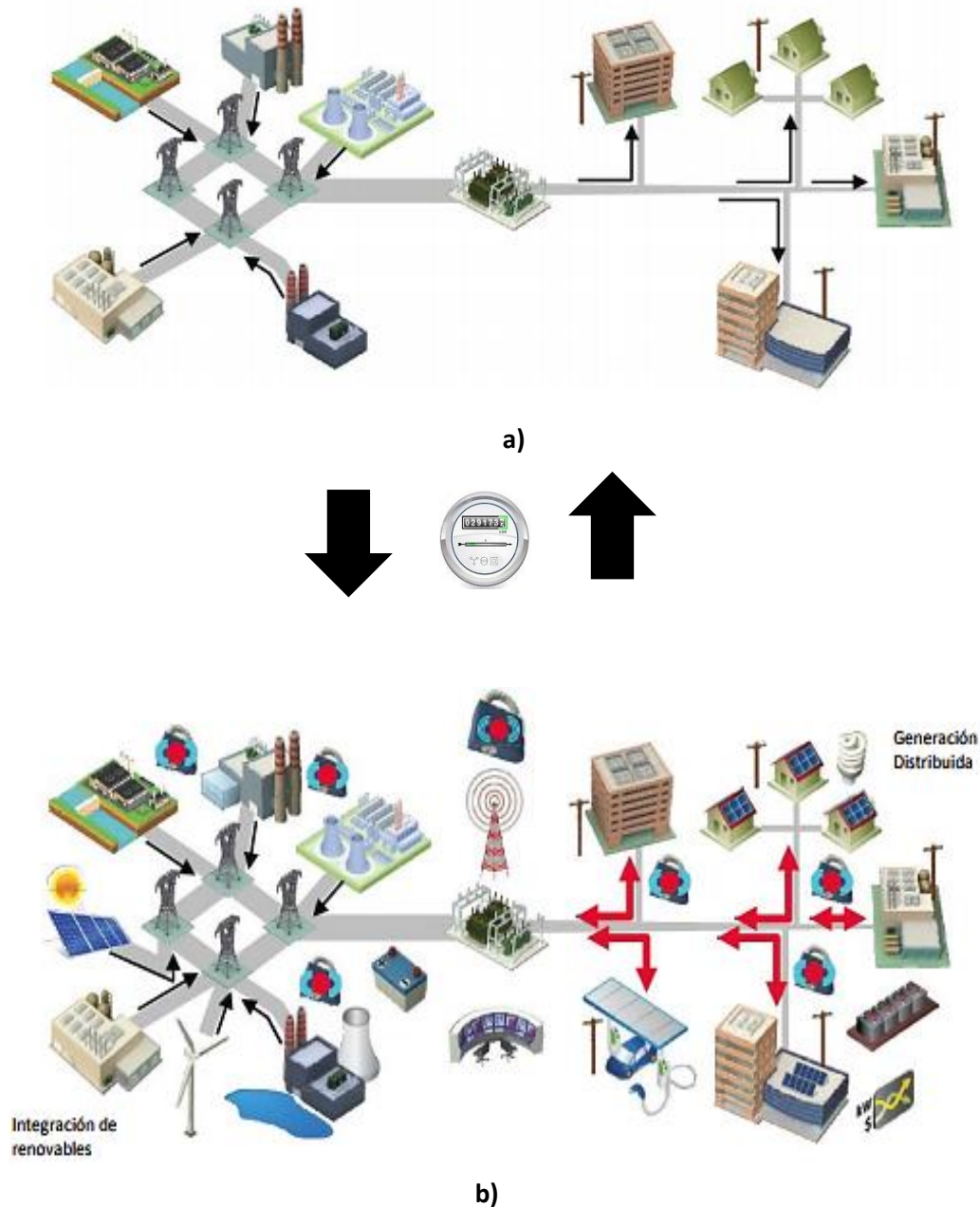


Figura 2.5 Medidor bidireccional, a) El SEP entrega energía a la microrred, b) La microrred entrega energía al SEP

CAPÍTULO 3

3. Simulación en MATLAB

Este capítulo ofrece un panorama general de la situación actual de la matriz energética del país y las características técnicas de los equipos de almacenamiento y generación de la microrred del laboratorio de Balzay.

Adicionalmente, debido a la naturaleza intermitente de sus unidades de generación, mediante simulación se muestra el comportamiento de la microrred en estado estacionario. Para ello, se recurre al programa MATLAB y su herramienta *SimPowerSystem*.

3.1. Matriz energética

La energía se perfila como uno de los sectores estratégicos para el desarrollo de cualquier país, por ello, la importancia de entregar energía moderna y limpia. En la actualidad, la energía eléctrica se considera un servicio y un derecho para garantizar el buen vivir de todos los ciudadanos. El desarrollo económico de un país viene acompañado de un fuerte crecimiento de la demanda de energía. Según [11] la demanda de energía eléctrica en Ecuador creció en la última década una tasa anual de 5%, de los cuales, el 59% se satisface con hidroelectricidad, 38% con centrales térmicas, mientras que otras fuentes de energía renovable como geotérmica, solar, eólica, etc. constituyen menos del 1%.

El sector eléctrico ha sufrido significativo cambios en los últimos años. No obstante, la incorporación de importantes cargas como: repotenciación de la refinería de Esmeraldas, minería, metro, tranvía, aeropuertos, etc. requiere una transformación urgente y responsable de la matriz energética, la cual debe contemplar: la diversificación en base a fuentes renovables, operar de forma

descentralizada y establecer un compromiso entre el estrado, los trabajadores y la comunidad [11].

El Ministerio de Electricidad y Energías Renovables para el 2020 tiene como objetivo que el 86% de la electricidad provenga de generación hidroeléctrica, y un 2% por tecnologías renovables no convencionales (1% solar y eólica, 1% biomasa). El resto se espera que provenga de energía termoeléctrica e importaciones (9% y 3%, respectivamente) [41].

La nueva matriz energética contempla incentivos y regulaciones como exoneración del pago de impuestos para varias tecnologías como las hidroeléctricas a pequeña escala. Sin embargo, estas medidas no son suficientes, se debe impulsar el ahorro y el uso eficiente de la energía eléctrica.

El cambio de la matriz energética significa un crecimiento económico sustentable para el país y muchos beneficios como: mayor seguridad energética, posibilidad de exportar electricidad a países vecinos y la disminución de pérdidas en distribución, que significa a las empresas un ahorro de millones de dólares [32].

En la tabla 3.1 se compara la situación de la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y de hidroeléctricas menores de 50MW en el país, antes y después de la transformación de la matriz energética. Además de las expectativas que se tiene para el futuro [41].

Tabla 3.1 Energías renovables en el Ecuador[42]

Energías Renovables	Año		
	2000	2013	2021
Hidroeléctrica (<50(MW))	0,26%	2,00%	4,29%
Fotovoltaica (MW)	0,00%	0,07%	1,87%
Eólica (MW)	0,00%	0,34%	0,18%
Biomasa (MW)	0,00%	1,63%	0,86%
Total Renovable	0,26%	4,04%	7,19%

La figura 3.1 muestra de forma gráfica los valores de la tabla 3.1. La fuente de energía con mayor proyección en el futuro es la hidráulica a pequeña escala seguida por la fotovoltaica.

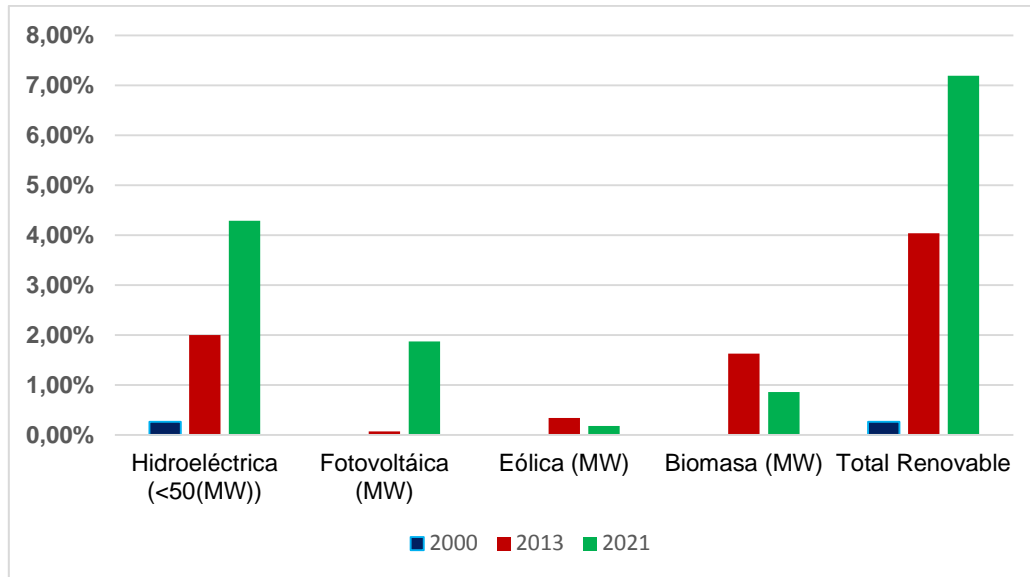


Figura 3.1 Porcentaje de participación de las energías renovables en el Ecuador[42]

3.2. Capacidad de energías renovables en el Ecuador

La nueva matriz energética contempla la necesidad de una mayor participación de las energías renovables. A pesar de ello, los avances logrados no han sido suficientes para alcanzar una verdadera transformación. Escepticismo en cuanto a costos y beneficios ha dificultado su penetración a gran escala. A esto se suma la falta de una oportuna educación, normativas, marcos regulatorios y la dependencia de las condiciones climáticas [11].

En [11] se resume las principales fuentes de generación renovables que pueden implementarse en el país (ver figura 3.2), basados en estudios previos realizados en gran parte por el ya extinto Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL).

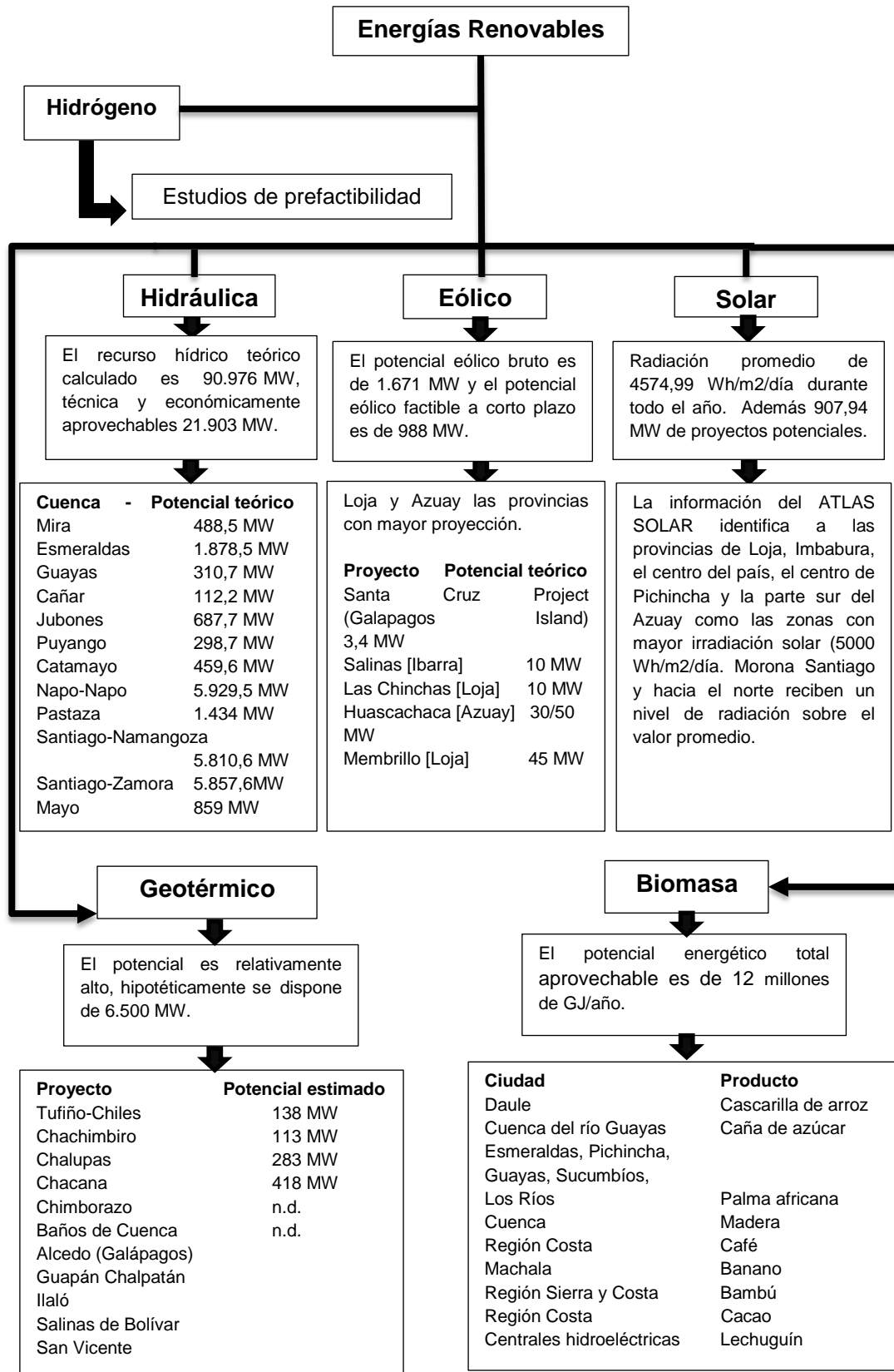


Figura 3.2 Mapa conceptual del potencial energético estimado de energías renovables

El proyecto “Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay (CCTI-B), nació a finales de 2013 cuando la Universidad de Cuenca entrega su propuesta al Programa de Canje de la Deuda Externa entre Ecuador y España (PCDEE). Posteriormente en mayo del 2014 la Corporación Andina de Fomento (CAF) comunica que el proyecto ha sido uno de los 5 elegidos, y para su construcción se le asignará un presupuesto de USD 2,500.000. No obstante, no fue hasta en enero del 2015 que la Universidad de Cuenca firmó con el Consorcio español-ecuatoriano CE Balzay para la ejecución del proyecto [42].

El CCTI-B está ubicado en la parroquia San Joaquín en la ciudad de Cuenca. El terreno cuenta con 13,3 hectáreas de los cuales 750m² fueron destinadas para el edificio donde opera el laboratorio [42].

Este centro de investigación es el primero con estas características en Ecuador y uno de los primeros en Latinoamérica. Su objetivo principal es *“alcanzar una transformación integral de las áreas técnicas del Plantel en concordancia con las exigencias de la época y contribuir, mediante una adecuada docencia, investigación y vinculación con la sociedad, al desarrollo local y nacional”* [42].

El laboratorio de Balzay está formado por una amplia gama de tecnologías que de acuerdo a su función y características se clasifican en:

- **Tecnologías convencionales:** generador a diésel, generador de gas licuado de petróleo.
- **Tecnologías emergentes:** hidrocínética, supercondensadores y baterías (flujo de vanadio, ión-litio, plomo ácido, pila de hidrógeno)
- **Tecnologías renovables:** turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos.

Además, cuenta con cargas eléctricas programables, fuentes de voltaje, cargas resistivas, equipos de control, medición, comunicación, montacargas y vehículo eléctrico. Todos ellos próximos e interconectados entre sí por medio de buses.

Se considera que la configuración de la microrred es local por cumplir con los siguientes criterios (ver capítulo 2):

- Varias fuentes de energía con diferentes características
- Distribución de las cargas
- Planificación previa para conectarse al SEP

El acoplamiento se realiza mediante un transformador trifásico tipo Pad-Mounted con capacidad nominal de 400kVA (de manera provisional está instalado un transformador de 150kVA). El seccionador es el responsable de conectar la microrred a la red, siempre y cuando se cumpla con las normas de interconexión *IEEE 1547* [42].

El CCTI-B utiliza el protocolo de comunicación estándar Modbus TCP para intercambiar información local por medio de fibra óptica, y el sistema SCADA para el control remoto y local de los equipos, además de contar con una UPS de 10kVA de capacidad para el control en modo isla [42].

La capacidad nominal de la microrred es de 400kW, está conectado a la red de media tensión por medio del alimentador 0523 de la subestación eléctrica (S/E) 5 del Arenal con capacidad de 10MVA y 69/22kV. La S/E está ubicada en la ciudad de Cuenca y pertenece a la empresa eléctrica regional Centrosur C.A. [42], [43].

El CCTI-B tiene doble barraje L1 y L2, esta última es una barra auxiliar que permite simultáneamente operar de dos formas distintas, es decir que, mientras uno de los generadores puede entregar potencia al SEP, otro generador puede estar cargando las baterías (ver anexo A).

Adicionalmente, la microrred cuenta con una estación meteorológica que recopila datos de radiación solar, velocidad y dirección del viento del área, temperatura y humedad relativa [42].

Gracias a su capacidad de autocontrol, protección y gestión el sistema puede operar en las formas descritas en el capítulo 2. Finalmente, la figura 3.3 muestra el diseño interno del edificio donde opera la microrred [42].

- **Bloque A (450m²):** Está formado por los equipos de almacenamiento, potencia, fuentes de voltaje y comunicaciones.
- **Bloque B (150m²):** Área destinada para oficinas.
- **Bloque C (45m²):** Servicios higiénicos y depósitos de material administrativo.
- **Bloque D (60m²):** Este espacio está ocupado por los generadores de combustión interna de diésel y gas licuado de petróleo (GLP), y el transformador para interconexión con la red eléctrica.
- **Bloque E (45m²):** Aulas destinadas para la docencia

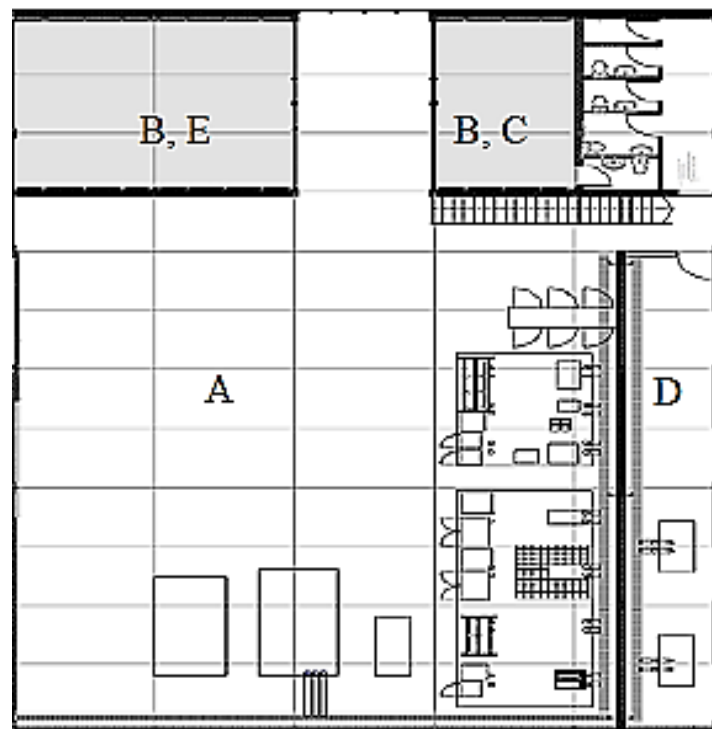


Figura 3.3 Diseño interno del laboratorio de Balzay[42]

3.4. Toolbox SimPowerSystems

MATLAB es un programa que ofrece al estudiante un medio para resolver problemas complejos y difíciles mediante la ejecución de proyectos que impliquen cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos.

La figura 3.4 muestra el logotipo de una de las versiones del programa MATLAB.



Figura 3.4 Logotipo de MATLAB

En la actualidad, con la finalidad de extender el número de funciones del programa principal, MATLAB ofrece varios programas de apoyo especializados, denominados *Toolboxes*.

Los *Toolboxes* cubren actualmente casi todas las áreas de la ingeniería y la simulación ya que ofrecen ventajas como: análisis financiero, proceso de imágenes, control robusto, redes neuronales, simulación de sistemas dinámicos, etc destacando entre ellos el *Toolbox SimPowerSystems*

El *Toolbox SimPowerSystems* se usó para predecir el comportamiento de la microrred, este software permitió realizar un diseño nuevo mediante ecuaciones matemáticas instituidas en diagramas de bloques (ver figura 3.5).

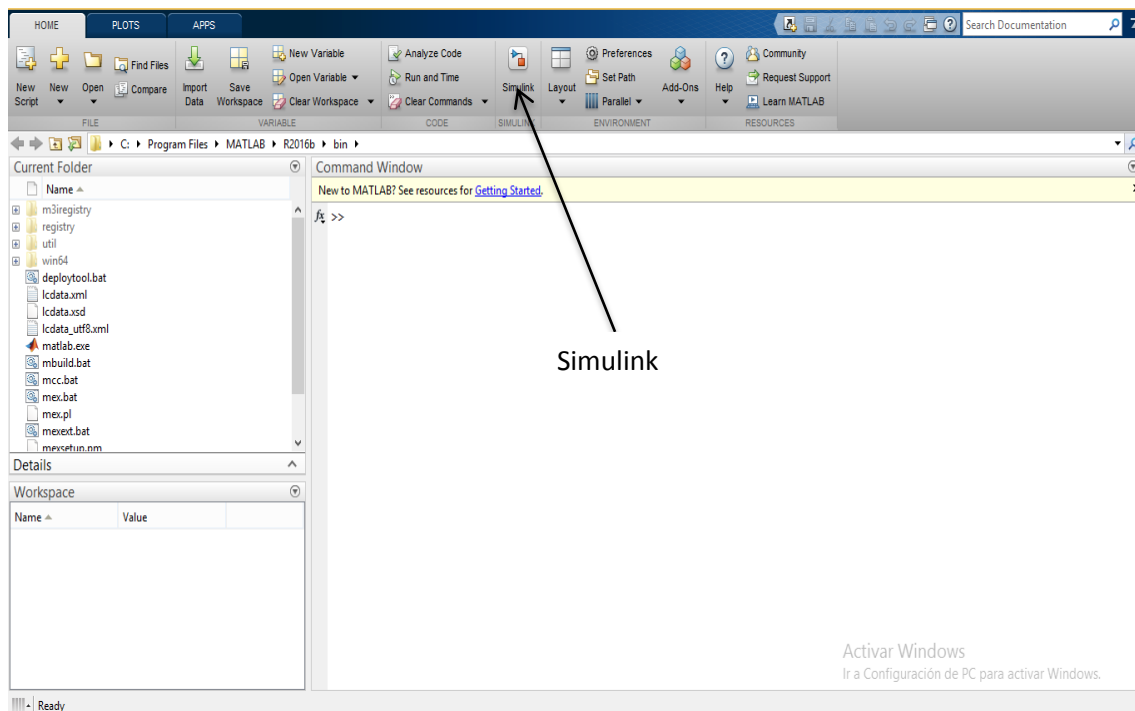


Figura 3.5 Pantalla principal del programa MATLAB

Esta sección muestra las características principales de las tecnologías que conforman la microrred del laboratorio de Balzay y su funcionamiento en

régimen estacionario, un aspecto muy importante que se debe considerar para desarrollar el capítulo 4.

Conocer los parámetros de funcionamiento permite establecer límites de seguridad, y funciones de mando y control para evitar errores en la simulación.

Se establecen modelos individuales y un tiempo de simulación de 24 horas con el fin de probar y asegurar su operación.

3.4.1. Generación solar

Los paneles solares se encuentran ubicados en la azotea del edificio donde funciona la microrred (ver figura 3.4), ya que ahí reciben mayor radiación. Esta radiación llega a la tierra como ondas electromagnéticas y puede verse afectada por muchos factores como: masa de aire, la hora del día, ubicación, temporada, humedad y temperatura.



Figura 3.6 Paneles solares

A diferencia de otras fuentes de energía este requiere un mantenimiento mínimo, es decir, solo se necesita limpiar la superficie del panel para mantener su eficiencia, que también dependerá en gran parte de las condiciones climáticas. No obstante, se puede vaticinar la existencia de nubes con una buena previsión meteorológica en base a datos históricos [23].

Los paneles fotovoltaicos trabajan idealmente en su punto máximo de potencia (W) y dependerá de [11]:

- Área y material de los paneles solares
- Inicio y duración del día
- Temperatura (depende del ambiente).
- Ángulo de incidencia.
- Radiación directa y difusa (se mide en kW/m²).

Existen varios modelos con diferentes niveles de complejidad que se pueden utilizar para describir el comportamiento de un módulo fotovoltaico, pero para la simulación se usa un modelo matemático simple que considera los siguientes parámetros:

- **Corriente de corto circuito (I_{sc}):** Es la corriente del panel fotovoltaico cuando la tensión en sus terminales es nula, esto implica que la corriente máxima es (valor típico =10-35 mA/cm²).
- **Tensión de circuito abierto (V_{oc}):** Es la tensión máxima de una celda, y esto produce que la corriente sea cero (valor típico= 0,6–1 V por célula).
- **Potencia máxima (P_{max}):** Es la potencia máxima que se puede obtener de cada celda, si la corriente llega al máximo, entonces el voltaje cae a cero y viceversa, en cualquiera de los dos casos $P = 0$, debido a eso existe un límite para el voltaje y la corriente.

$$P_{max} = I_{max} * V_{max} \quad (3.1)$$

- **Factor de forma (FF):** Es el factor de eficiencia para encontrar la potencia máxima de una celda, el valor máximo que puede tener es 1.

$$P_{max} = I_{sc} * V_{oc} * FF \quad (3.2)$$

- **Eficiencia(η):** Se expresa en (%), ya que representa la relación de la potencia que obtenemos de cada célula vs la potencia solar que incide en el panel.

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{A * P_{sol}} * 100 \quad (3.3)$$

- A = Área del panel solar (cm^2)
- P_{sol} = Potencia luminosa del sol ($\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$)

La potencia promedio que se obtiene durante un año a partir de la radiación promedio se muestra en la tabla 3.2 y figura 3.5.

Tabla 3.2 Radiación promedio de BALZAY durante un año

Radiación promedio 220W/m2											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
120,85	120,00	120,85	204,83	204,00	108,00	116,46	181,32	176,36	218,40	227,80	235,00

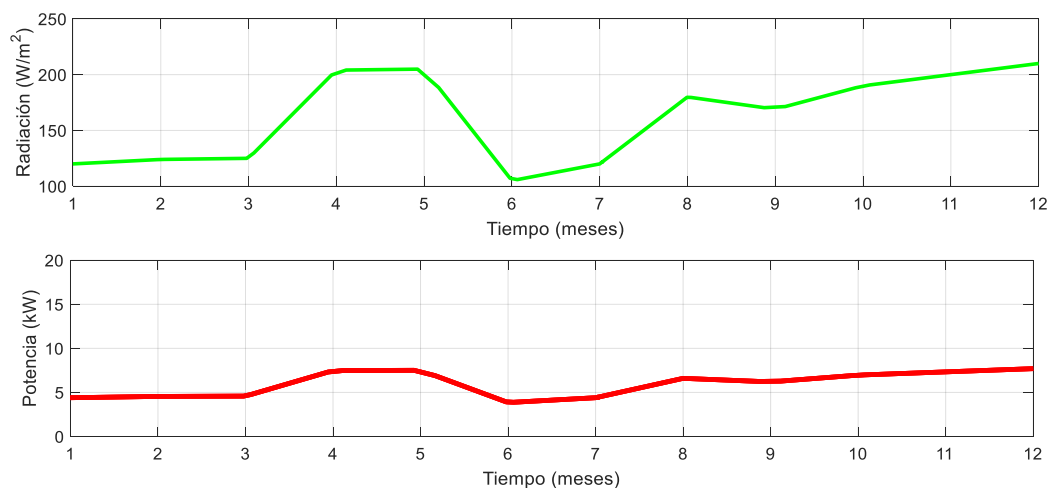


Figura 3.7 Radiación promedio en el laboratorio de Balzay durante un año

La figura 3.7 muestra la radiación y potencia promedio en el laboratorio de Balzay durante un año; estos datos fueron obtenidos por el Programa para el manejo del agua y del suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca. La figura muestra que la mayor radiación se produce en verano durante los meses de noviembre y diciembre con aproximadamente 220W/m^2 .

Para la simulación se considera los siguientes parámetros:

- Todos los módulos fotovoltaicos se modelan como un solo sistema

$$A_T = N * A \quad (3.4)$$

- A = Área del panel solar (m^2)
- N = Cantidad total de paneles solares

El área total de los paneles es de $228m^2$ (ver tabla 3.3). No obstante, la potencia en la operación real se obtiene de sumar la potencia de dos circuitos en serie de $15kWp$ c/u, más 16 paneles conectados en paralelo ($4kWp$) y 4 paneles solares de seguimiento con una capacidad de $1kWp$; dando un total de $35kWp$.

- El módulo fotovoltaico no tiene pérdidas
- La temperatura ambiente es de $18^\circ C$
- La eficiencia es de aproximadamente 15%
- Se toma la radiación promedio del mes de abril por presentar un valor medio entre la máxima y mínima potencia (ver figura 3.7)

En la figura 3.8 se muestra la curva característica de operación de un panel fotovoltaico a partir del conocimiento de la radiación, el voltaje y la corriente.

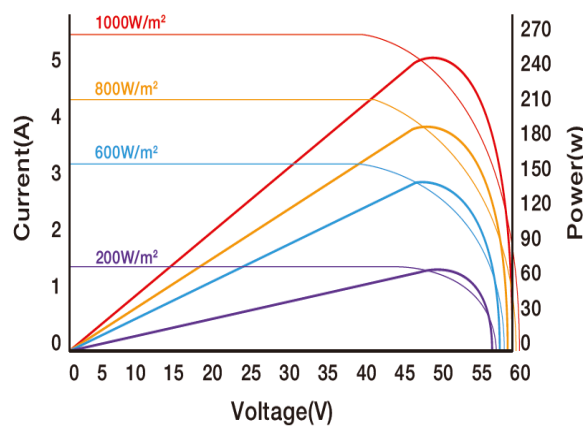


Figura 3.8 Curva V-I de los paneles fotovoltaicos [45]

El modelo de los paneles fotovoltaicos en la plataforma de MATLAB se muestra en la figura 3.9, el modelo está formado por varios bloques orientados a realizar determinadas tareas.

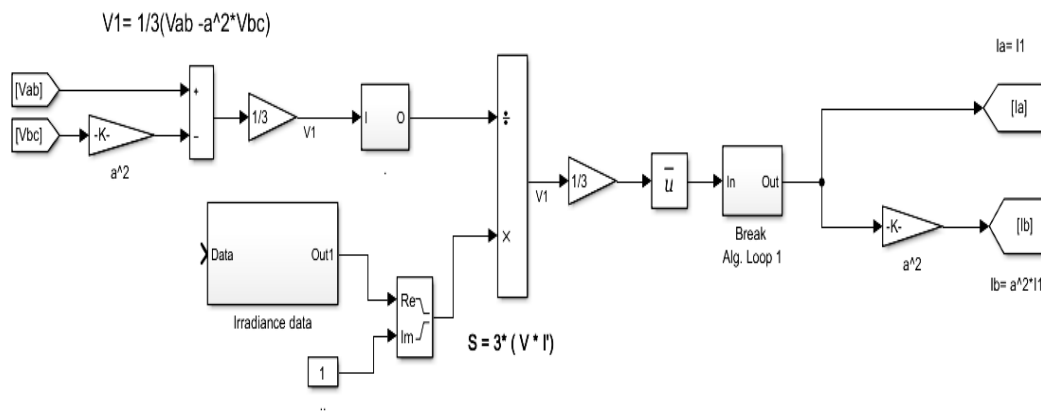


Figura 3.9 Diagramas de bloques que representan los paneles fotovoltaicos en MATLAB

Explicación del diagrama de bloques

- Se usa la ecuación 3.5 para obtener la potencia activa a la salida del bloque de irradiancia (ver anexo B)

$$P_{max} = P_{sol} * A_T * \eta \quad (3.5)$$

- El factor de potencia es aproximadamente uno
- El sistema se controlara a través de la corriente que se obtiene a partir de la ecuación 3.6

$$S = 3(V * I') \quad (3.6)$$

El voltaje se obtiene a partir de la ecuación 3.7 (ver anexo C)

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2 V_{bc}) \quad (3.7)$$

- Luego de despejar la corriente se procede a obtener su conjugada utilizando el bloque \bar{u}
- El siguiente paso es usar el bloque Break Alg. Loop para que no exista un cruce por cero, es decir, el circuito solo debe aportar energía no consumir.
- Los bloques [a] y [b] son los encargados de inyectar la corriente al sistema.

Las curvas de corriente, voltaje y potencia a la salida del conjunto de paneles fotovoltaicos se muestran en la figura 3.10.

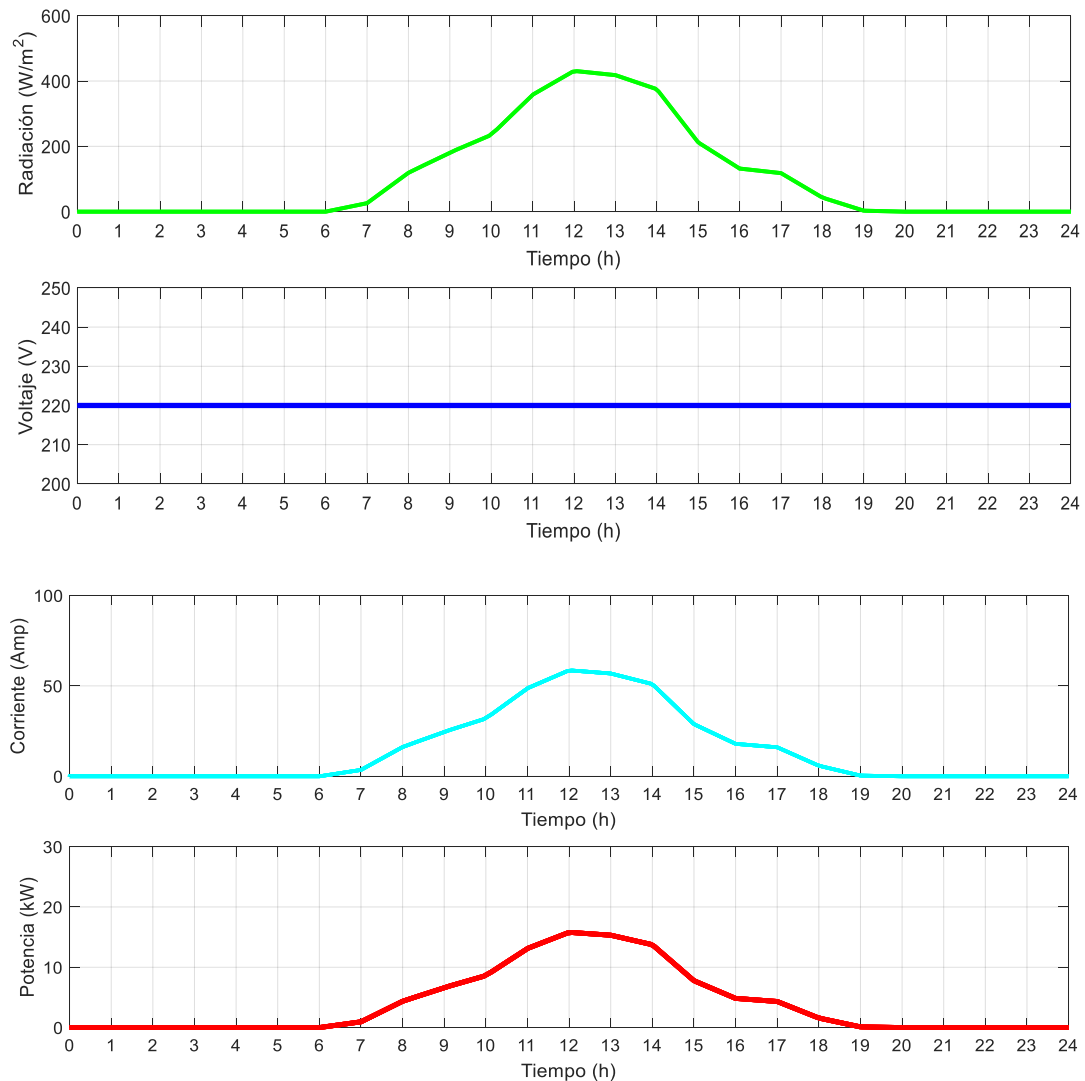


Figura 3.10 Voltaje, corriente y potencia activa

La figura 3.10 muestra que el voltaje línea a línea en la salida del inversor es de 220V y se mantiene constante todo el tiempo, ya que lo que se está variando es la corriente; este modo de funcionamiento se escogió para que la conexión de la microrred al sistema sea más fácil. Como se puede observar, la potencia de salida es directamente proporcional a la corriente que circula por los paneles fotovoltaicos y esta a su vez a la cantidad de radiación que exista en el día.

Se destacan las siguientes particularidades:

- La potencia instantánea de salida aumenta conforme transcurren las horas, alcanzando su punto cenit al mediodía, en el intervalo de 11h00 a 14h00.
- Durante la tarde y las primeras horas de la mañana la radiación es insignificante, mientras que en la noche es nula.
- La potencia instantánea máxima (18kW) se produce aproximadamente a las 12h00 con una radiación promedio de $400\text{W}/\text{m}^2$.
- La radiación tiene un comportamiento fluctuante, por ello, si existe exceso de energía esta será almacenada en las baterías para su posterior uso.
- La potencia de salida es cc, por lo tanto no existe circulación de potencia reactiva.
- La máxima potencia fotovoltaica aprovechable se obtiene cuando la radiación es de $1000\text{W}/\text{m}^2$, es decir, aunque la radiación sea mayor siempre se tendrá como máximo 250Wp.

Finalmente, Las características técnicas de los paneles fotovoltaicos se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.3 Características técnicas de los paneles fotovoltaicos [42]

Características	Tecnología			
	Panel fotovoltaico policristalino	Panel fotovoltaico monocristalino	Panel fotovoltaico seguimiento 1 eje	Panel fotovoltaico seguimiento 2 ejes
Cantidad	60	60	16	4
Voltaje Nominal	29,53	30,35	29,53	29,53
Potencia	250 Wp	250 Wp	250 Wp	250 Wp
Eficiencia	15,04%	15,35%	15,04%	15,04%
Temperatura	-40-85°C	-40-85°C	-40-85°C	-40-85°C
Marca	Atersa-España	Atersa-España	Atersa-España	Atersa-España
Área	1.63 m ²	1.63 m ²	1.63 m ²	1.63 m ²
Capacidad total	15kWp	15kWp	4kWp	1kWp
Ángulo de orientación	5° al norte	5° al norte	(Este-Oeste a 45 Velocidad de giro AZ 13°/min)	Variable, este-oeste, norte-sur
Material-silicio	Policristalino	Monocristalino	Policristalino	Policristalino
Observaciones			Movido por actuadores mecánicos-eléctricos.	Movido por actuadores mecánicos-eléctricos.
	$I_{sc} = 8,79A \quad V_{oc} = 37,62V \quad V_{mp} = 30,35V \quad I_{mp} = 8,24 A$			

3.4.2. Generación eólica

El parque eólico del laboratorio está ubicado en la granja de Irquis a 25km de la ciudad de Cuenca, este lugar fue escogido por su topografía y presentar mayores velocidades de viento (ver figura 3.11) [42].

El aerogenerador captura la energía cinética del viento y la transforma en energía eléctrica. La potencia de salida varía de acuerdo a la velocidad del viento, en lugar de las cargas del sistema, por ello idealmente deben ser operados a la máxima potencia (ver figura 3.13) [44].

La potencia de salida de los aerogeneradores está determinada por los siguientes parámetros [11]:

- Coeficiente de rendimiento de la turbina.
- Densidad del aire
- Presión atmosférica
- Área barrida por la turbina
- Velocidad y dirección del viento



Figura 3.11 Generadores eólicos [42]

En la simulación se usa un modelo matemático simple que considera los siguientes parámetros:

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * v^3 \quad (3.8)$$

ρ = Densidad del aire

A = Área del generador

v = Velocidad del viento

La eficiencia de los aerogeneradores tiene un límite, es decir que no toda la potencia cinética del viento se transforma en energía eléctrica debido a factores técnicos. A este límite se le conoce como límite de Betz y se representa como C_p .

$$C_p = \frac{\text{Potencia turbina}}{\text{Potencia del viento}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho * A * v^3} \quad (3.9)$$

Dónde:

$$P = \frac{8}{27} \rho * A * v^3 \quad (3.10)$$

De esta manera el límite de Betz es:

$$C_p = \frac{\frac{8}{27} \rho * A * v^3}{\frac{1}{2} \rho * A * v^3} = \frac{16}{27} \approx 0.592 \quad (3.11)$$

La energía mecánica total se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\pi}{8} * \rho * C_p * D^2 * v^3 * t \quad (3.12)$$

Dónde:

- C_p = Coeficiente de potencia
- ρ = Densidad del viento
- D = Diámetro de la turbina
- v = Velocidad del viento
- t = Tiempo

La potencia promedio que se obtiene durante un año a partir de la velocidad del viento se muestra en la tabla 3.4 y la figura 3.12

Tabla 3.4 Velocidad promedio del viento en la granja de Irquis

Velocidad promedio del viento/m/s											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
8,88	9,07	7,52	7,7	8,16	9,59	8,88	10,41	9,98	8,86	8,00	9,65

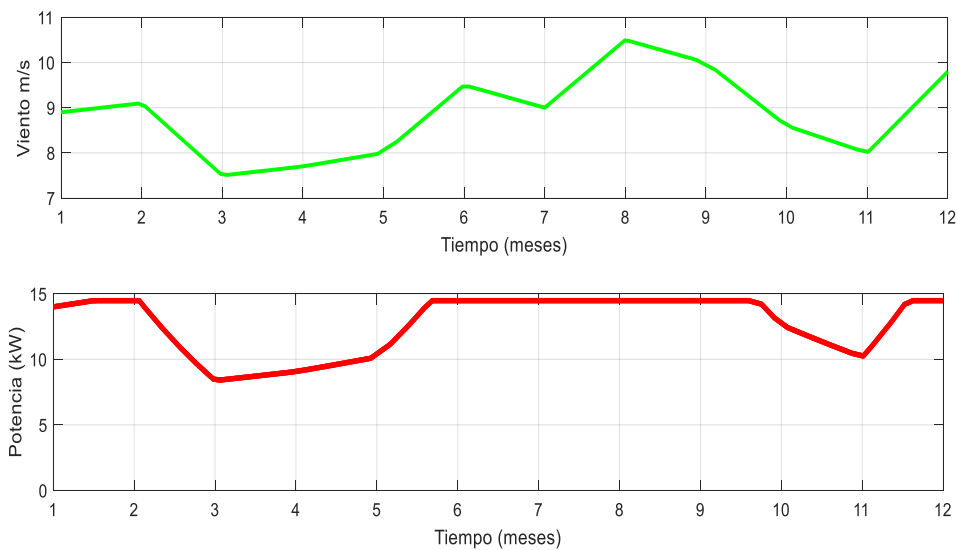


Figura 3.12 Velocidad promedio del viento en la granja de Irquis [47]

La velocidad promedio de viento en la granja de Irquis se muestra en la figura 3.12, estas mediciones se registraron durante un año para conocer el potencial de la localidad. Los datos fueron determinados por un anemómetro instalado a 20m. Estos instrumentos miden la velocidad angular y la traducen a metros por segundo o millas por hora.

La curva de velocidad del viento fluctúa entre 7 y 9 m/s, siendo el mes con mayor viento agosto, y el de menor viento marzo.

Para la simulación se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La densidad del aire es de 0.95kg/m^3
- El área de barrido (ver tabla 3.5)
- El límite de Betz (ver figura 3.14)
- La eficiencia es de 0.4

La figura 3.13 muestra la potencia total instantánea que puede entregar un aerogenerador en función de la velocidad del viento.

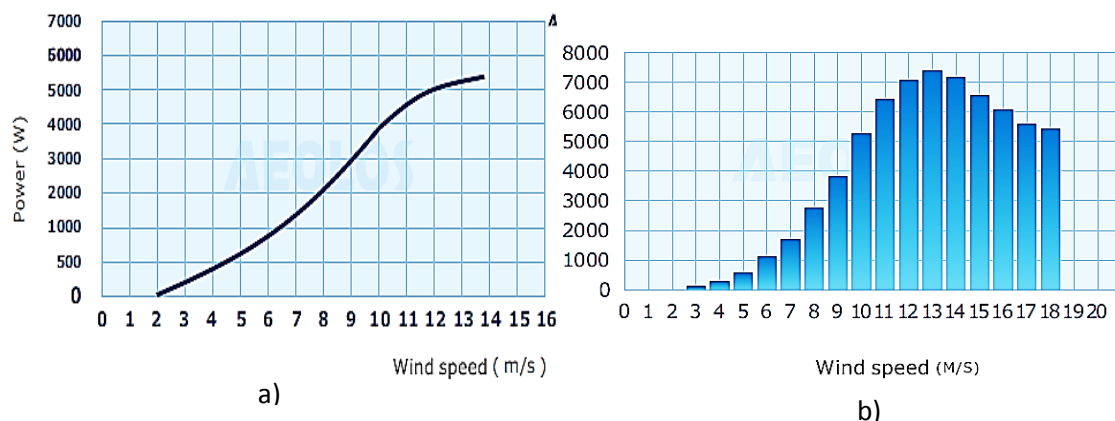


Figura 3.13 Potencia total instantánea en función de la velocidad del viento, a) Turbina de eje vertical b) Turbina de eje horizontal [44][45]

La figura 3.14 muestra el coeficiente de potencia para el aerogenerador de eje vertical y eje horizontal, para el primero el límite de Betz es de aproximadamente 40%, mientras que para el segundo es de aproximadamente 50% respectivamente.

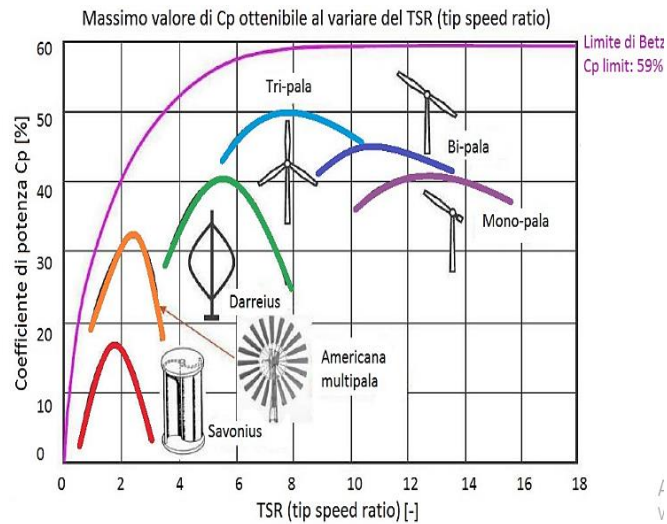


Figura 3.14 Límite de Betz de diferentes aerogeneradores [44]

El funcionamiento del diagrama de bloques para este caso es semejante al panel fotovoltaico, pero esta vez cada aerogenerador se simula por separado debido a sus condiciones de operación como: el área de barrido, límite de Betz, etc. (ver figura 3.15).

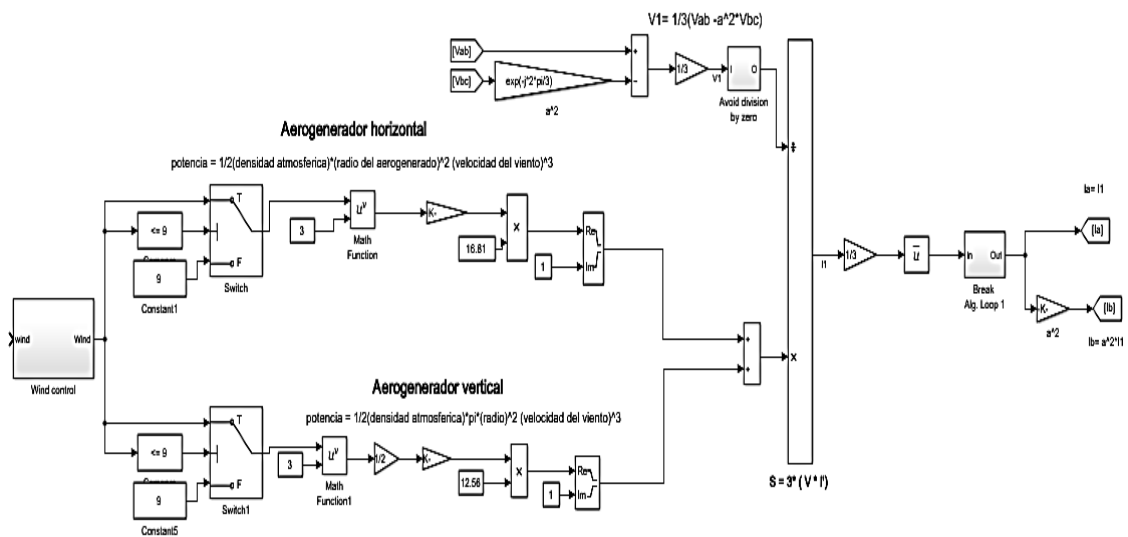


Figura 3.15 Diagrama de bloques que representan los aerogeneradores en MATLAB

Para obtener la potencia eléctrica del aerogenerador horizontal se usa la siguiente fórmula:

$$P_e = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p * \eta \quad (3.13)$$

C_p = Coeficiente de potencia

ρ = Densidad del viento

A = Área de la turbina, πr^2

v = Velocidad del viento

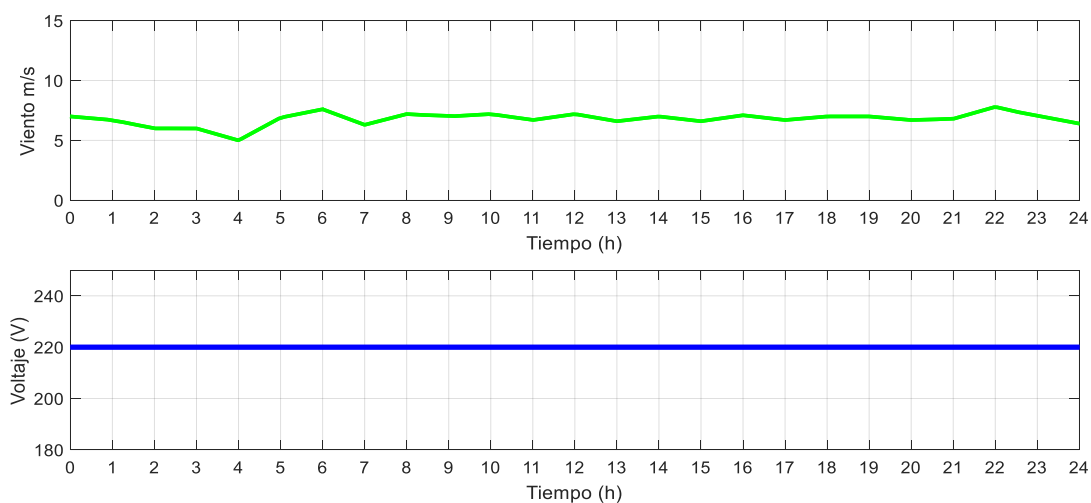
η = Eficiencia del aerogenerador

Para el aerogenerador de eje vertical también se usa la ecuación 3.13 pero ahora el área será igual a base por altura. Luego las tres potencias se suman y se despeja la corriente que se inyectara al sistema.

Las curvas de corriente, voltaje y potencia activa instantánea se observan en la figura 3.16. El voltaje línea a línea a la salida del aerogenerador es de 220V y se mantiene constante todo el tiempo.

La corriente de contribución es desequilibrada debido al comportamiento estocástico de la velocidad del viento, efecto que también se ve reflejado en la potencia instantánea. La potencia de salida es ac, pero su aporte de potencia reactiva es muy insignificante, dado a su control mediante los convertidores de potencia asociados que tiene un factor de potencia casi unitario.

La potencia instantánea más alta se obtiene aproximadamente a las 06h00 con una velocidad del viento promedio de 8,8 m/s (8kW).



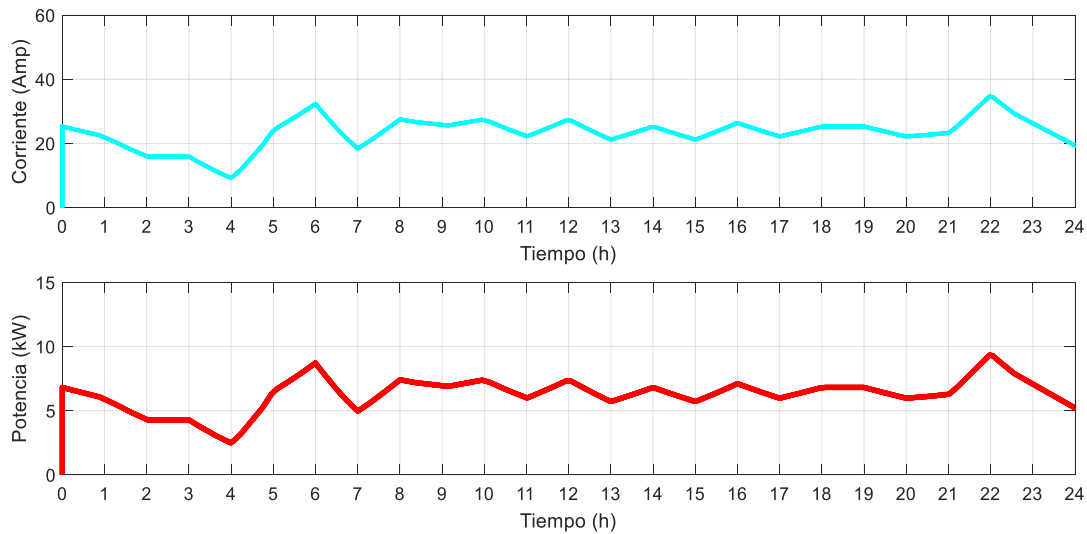


Figura 3.16 Voltaje, corriente y potencia activa de la figura 3.13

La tabla 3.5 detalla los aspectos técnicos de los aerogeneradores de la microrred del laboratorio.

Tabla 3.5 Características técnicas de los generadores eólicos [42]

Características	Tecnología	
	Aerogenerador eje horizontal	Aerogenerador eje vertical
Cantidad	2	1
Voltaje Nominal	220	220
Potencia	5.5kW	5kW
Marca	Enair-España	Darrieus H (Giromill)
Área de barrido	14.5m ²	
Número de palas	3	3
Longitud de Aspa	2.15m	5m
Velocidad nominal	11 m/s	6 m/s
Altura	18m y 24m	18m
Separación	12m	12m
Observaciones	Generador síncrono de imanes permanente trifásico de 30 polos, a 250 rpm	Generador síncrono trifásicos de imanes permanente a 100 rpm

3.4.1. Generación Mini-Hidro

El laboratorio de Balzay también cuenta con una turbina hidrocínética que se muestra en la figura 3.17. Esta turbina está instalada en un canal adjunto al río Tomebamba de 100m de longitud, cuya condición necesaria es tener un caudal como mínimo de 5m³/s para alcanzar los 5kW [42].



Figura 3.17 Hidrocinética de la microrred del laboratorio de Balzay

Al igual que la energía solar y eólica, la energía hidráulica depende del clima, es decir [11]:

- Velocidad del agua.
- Caudal de agua por metro cúbico.
- Número de veces que llueve al año.

En el modelo la potencia total generada se puede calcular con la ecuación 3.14. Adicionalmente se realizan las siguientes consideraciones:

- El caudal promedio que se usa para la simulación se muestra en la tabla 3.6 y figura 3.18
- Eficiencia promedio de 0.95
- La densidad del agua es 1000 kg/ m^3

$$P_{\text{inst}} = \gamma * Q * H * n_t * n_g * n_{\text{tr}} \quad (3.14)$$

Dónde:

P_{inst} = Potencia instalada (kW)

γ = Peso específico del agua (9.81 kN/m^3)

Q = Caudal $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

H = Altura neta (m)

n_t = Eficiencia de la turbina

n_g = Eficiencia del generador

n_{tr} = Eficiencia del transformador

Tabla 3.6 Caudal del río Tomebamba

Caudal promedio del río m ³ /s											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
11,93	32,66	30,36	29,07	30,93	20,06	18,48	11,65	21,13	19,87	24,15	6,12

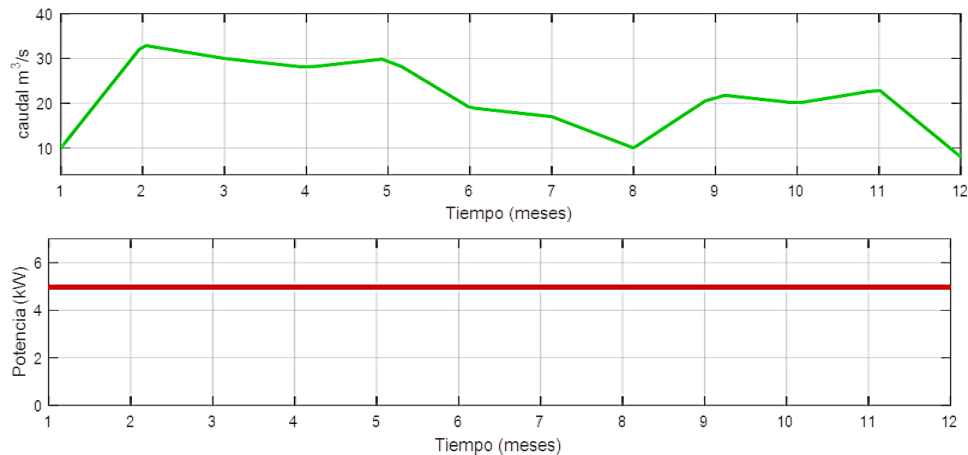


Figura 3.18 Caudal del río Tomebamba

La figura 3.18 muestra el caudal del río Tomebamba durante todo el año. Tal como se aprecia, los meses de menor caudal se producen en verano, siendo diciembre el más bajo, mientras que los niveles de mayor caudal se presentan en los meses de febrero y mayo.

La figura 3.19 muestra el diagrama de bloques correspondiente al funcionamiento de la turbina hidrocínica en MATLAB. El conjunto de bloques contiene las variables de la ecuación 3.14.

El primer bloque lee el caudal y lo compara con el de referencia, es decir, si este valor es mayor, el programa lo rechaza y asume una velocidad de 3,1 m/s, que es la velocidad máxima para alcanzar la potencia nominal (ver figura 3.20). En el siguiente paso, se despeja la corriente fase-neutro que se inyecta al sistema.

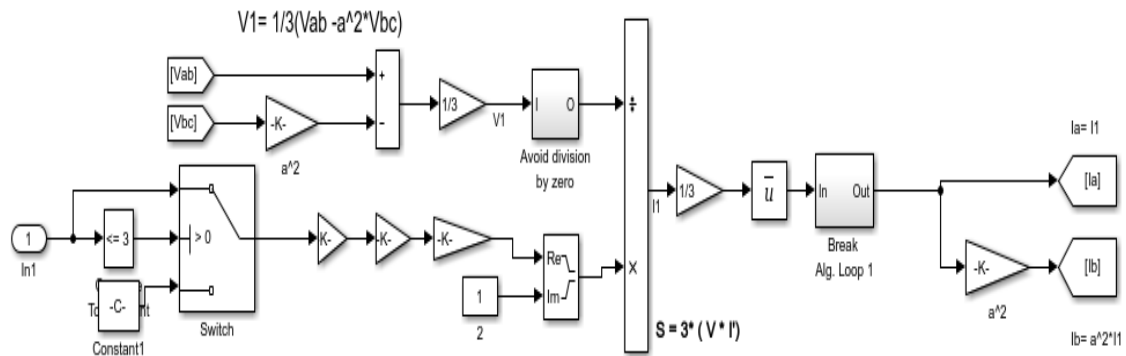


Figura 3.19 Diagrama de bloques que representa el comportamiento de la hidrocínética en MATLAB

La figura 3.20 muestra la potencia total instantánea que puede entregar la hidrocínética en función de la velocidad. Se puede observar que la máxima potencia de salida se obtiene cuando la velocidad es de 3,1m/s y entrega una potencia de aproximadamente 5kW.

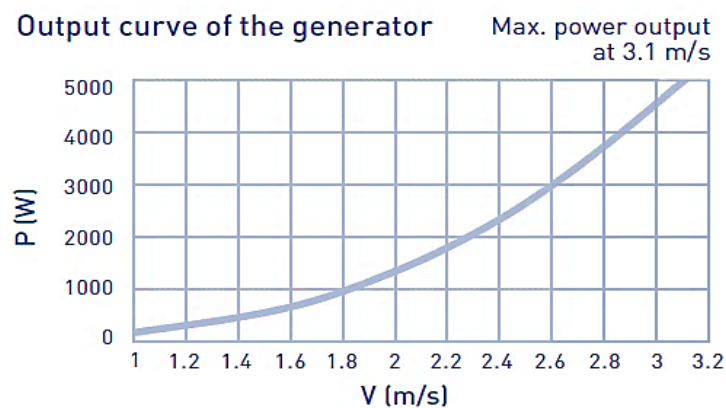


Figura 3.20 Potencia total instantánea en función de la velocidad del río [46]

Las curvas de corriente, voltaje y potencia instantánea se observan en la figura 3.21. El voltaje línea a línea a la salida de la turbina es de 220V y se mantiene constante todo el tiempo.

La potencia de salida depende de la corriente y esta a su vez del caudal del río. Su salida es ac y al igual que el generador eólico su aporte de potencia reactiva es muy pequeño debido a los inversores. De todas las fuentes

renovables es la más menos fluctuante, lo que permite tener una potencia instantánea casi constante.

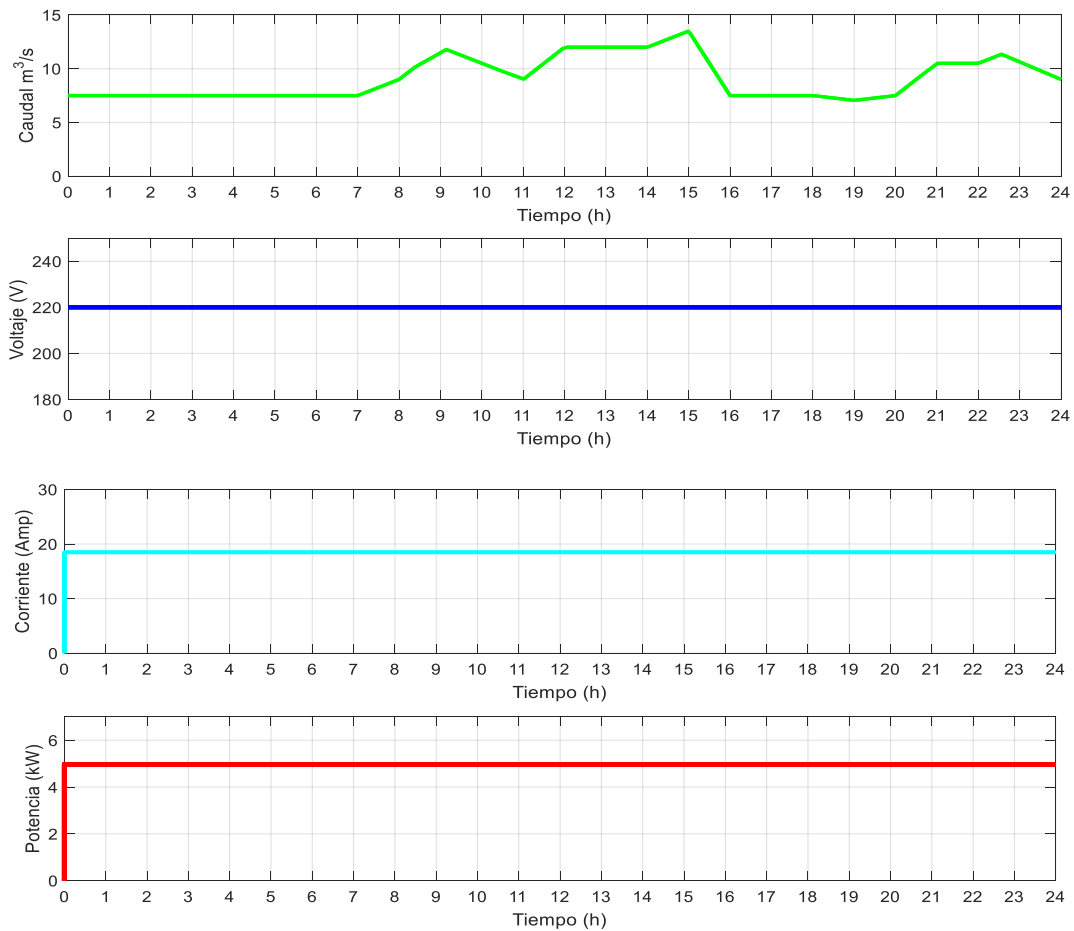


Figura 3.21 Voltaje, corriente y potencia activa de la figura 3.17

La tabla 3.7 muestra las características técnicas de la hidrocínética.

Tabla 3.7 Características técnicas de la hidrocínética del laboratorio de Balzay [42]

	Tecnología
Características	Hidroeléctrica (CA)
Cantidad	1
Potencia	5 kW
Fabricante	Smart Hydro Power (Alemania)
Tipo	Hidrocínética sumergida
Número de aspas	3
Río	Min. Profundidad: 1,1 m, Min. Anchura: 1,2 m
Velocidad	Potencia nominal a 3,1m/s
Mantenimiento	Casi no requiere mantenimiento
Observaciones	Generador síncrono de imanes permanentes, 90-230 rpm

3.4.2. Generador a diésel

Es un generador síncrono que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. La figura 3.22 muestra el generador instalado en el laboratorio de Balzay, este equipo produce un voltaje trifásico cuya amplitud y frecuencia son proporcionadas por la tabla 3.8 [42].



Figura 3.22 Generador de diésel y gas licuado de petróleo

El equipo dispone de tanques con capacidad de mil litros para almacenar el diésel, y es capaz de disminuir o aumentar su potencia de salida dependiendo de la velocidad angular [42].

Tabla 3.8 Características técnicas del generador a diésel [42]

	Tecnología
Características	Generador a diésel
Cantidad	1
Voltaje Nominal	220/127 V
Potencia	40kVA
Temperatura	575°C
Fabricante	Himoinsa (España)
Modelo	HHW-35T6
Generador	Síncrono de 4 polos, 1800 rpm, 3 fases
Conexión	Estrella-serie
Factor de potencia	0.8

La figura 3.23 muestra el diagrama de bloques correspondiente al funcionamiento del generador a diésel. El bloque de color azul es el gobernador, es decir, el encargado de ajustar la velocidad de acuerdo a las necesidades de la carga, mientras el bloque AC1A (excitatriz) es el encargado de suministrar tensión y corriente al rotor del generador. La velocidad angular es de 1 p.u.

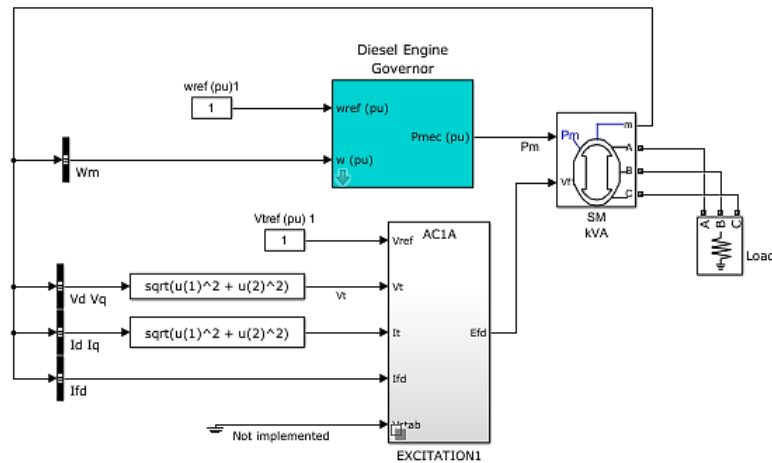


Figura 3.23 Diagrama de bloques que representa el comportamiento del generador a diésel en MATLAB

Las curvas de corriente, voltaje y potencia instantánea se observan en la figura 3.24. El voltaje línea a línea a la salida del generador es de 220V y se mantiene constante todo el tiempo.

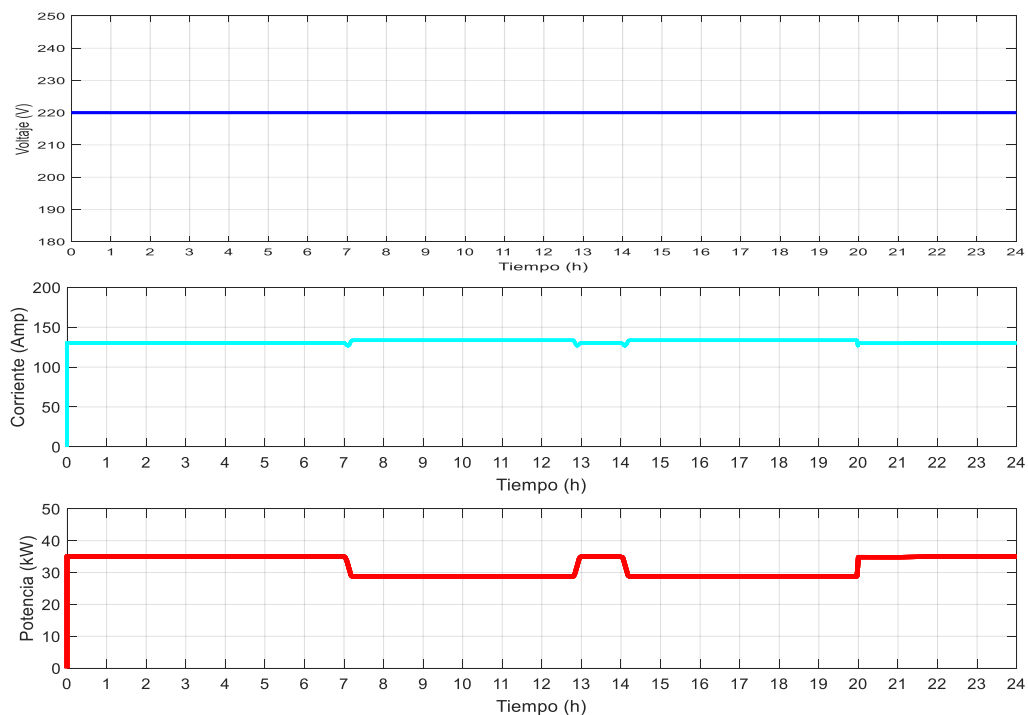


Figura 3.24 Voltaje, corriente y potencia del generador diésel y GLP

Como se observa en la figura 3.22, el generador tiene la capacidad de aportar 30kW al sistema en todo momento siempre y cuando se disponga de diésel.

3.4.3. Generador de gas licuado de petróleo (GLP)

El generador de gas licuado de petróleo (ver figura 3.20) es una tecnología flexible que proporciona energía confiable al sistema, posee un equipo de almacenamiento de 2m^3 para su uso eventual. Se recomienda que si la microrred está conectada al SEP, el generador se apague para mantenimiento. Su información técnica se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Características técnicas del generador de gas licuado de petróleo[42]

Características	Tecnología
	Generador a gas
Cantidad	1
Voltaje Nominal	220/127
Potencia	40kVA
Fabricante	Himoinsa (España)
Modelo	HGP-45T6NG
Generador	Síncrono de 4 polos, 1800 rpm, 3 fases
Factor de potencia	0.8

La figuras 3.25 muestra el diagrama de bloques que representa el funcionamiento del generador de gas licuado de petróleo en MATLAB. Su funcionamiento es parecido al generador a diésel (ver figura 3.24).

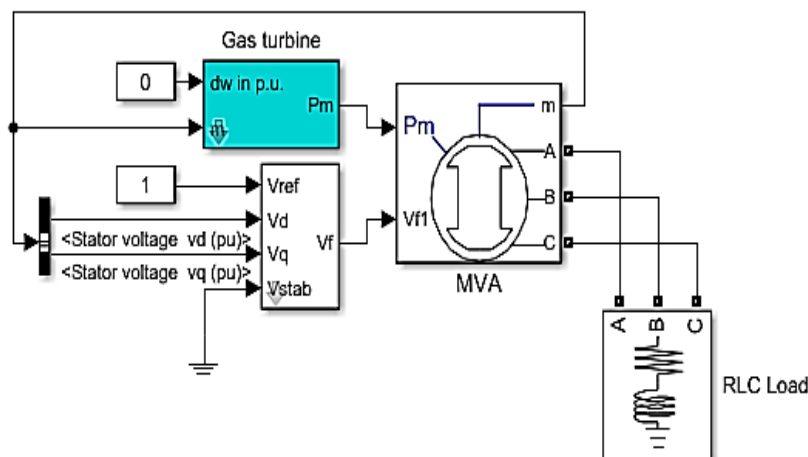


Figura 3.25 Diagrama de bloques del generador de gas licuado de petróleo en MATLAB

3.4.4. Celda de hidrógeno

El laboratorio cuenta con una celda de hidrógeno (ver figura 3.26) que usa un inversor dc/ac cuyos datos técnicos se presentan en la tabla 3.10.



Figura 3.26 Celda de hidrogeno

Tabla 3.10 Características técnicas de la celda de hidrógeno [42]

	Tecnología
Características	Celda de hidrógeno
Cantidad	1
Voltaje Nominal	48 V DC
Potencia	3 kW
Marca	Clantech (España)
Modelo	T30S1

3.4.5. Fuente programable:

El laboratorio cuenta con una fuente programable, cuyas características se detallan en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Características técnicas de la fuente programable [42]

	Tecnología
Características	Fuente programable AC
Cantidad	1
Potencia	12kVA
Marca	Pacific Power Source (USA) serie ASX
Modelo	3120-ASX
Observaciones	Alimentar cargas trifásicas
Frecuencia	15Hz hasta 1200Hz

3.4.6. Equipos de Almacenamiento

Los equipos de almacenamiento son una tecnología indispensable dentro de una microrred para equilibrar generación y demanda. No obstante, los altos costos y su corta esperanza de vida han impedido su masificación. Este equipo de almacenamiento se carga en momentos de máxima generación que generalmente es durante la noche y se descarga cuando la microrred necesite abastecer las cargas, sobre todo en horas pico [23].

El laboratorio de Balzay dispone de varias tecnologías de almacenamiento que se detallan a continuación:

- Baterías de flujo de vanadio: Contiene un par de recipientes que almacenan 5 mil litros de vanadio líquido que circulan por un conjunto de 12 módulos de celdas (ver figura 3.27).
- Baterías de plomo ácido: Las baterías de plomo ácido son elegidas por su bajo costo y amplia disponibilidad (ver figura 3.28).
- Baterías de Ion-litio: Sistemas de gestión de energía con comunicación Ethernet (ver figura 3.29).
- Banco de supercondensadores: Son una opción más costosa que las baterías. Su finalidad es disminuir los transitorios (ver figura 3.29).



Figura 3.27 Batería flujo de vanadio

Su principal ventaja es disminuir la intermitencia de las energías renovables permitiendo gestionar las cargas y estabilizar tensión y frecuencia. Es decir, cuando la microrred se desconecta de la red principal, los dispositivos de almacenamiento deben garantizar el suministro de energía, de esta manera se aumenta la fiabilidad y eficiencia del sistema [47].



Figura 3.28 Baterías de plomo ácido

Las baterías permiten una transición sin problemas para la conexión y desconexión a la red. Los beneficios específicos del equipo dependerán de su capacidad energética y su máxima potencia de salida. Cada batería aporta un nivel diferente de potencia [23].



Figura 3.29 Banco de supercapacitores (izquierda), Baterías de ion-litio (derecha)

Las baterías operan bajo algunas condiciones [48]:

- El SOC determina cuando se produce la carga/descarga
- Tienen una capacidad máxima de almacenamiento
- Cada día se establece un ciclo de carga/descarga
- Cuanto más alto es la profundidad de descarga “DOD” del inglés *deepness of discharge*, más corto es el ciclo de vida
- Cada ciclo de carga y descarga tiene efectos negativos en la vida de la batería

Los distintos tipos de almacenamiento se modelan en MATLAB como fuentes de tensión (ver figura 3.30), como condición inicial tenemos el SOC y la capacidad de almacenamiento en amperios hora. Para cargar las baterías, se compara la potencia de generación (+) y de carga (-), si la diferencia de potencia es positiva se envía a cargar las baterías usando una fórmula matemática que desglosa la corriente.

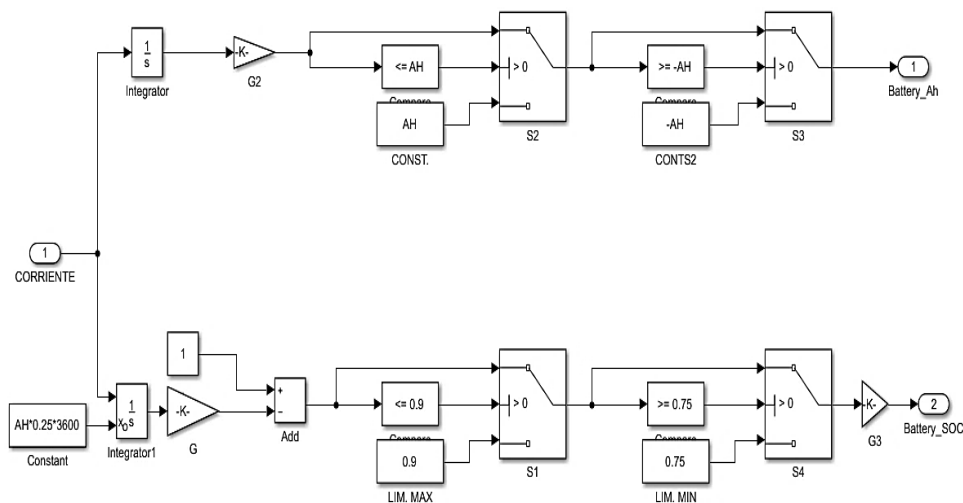


Figura 3.30 Diagrama de bloques que representa los equipos de almacenamiento en MATLAB

La figura 3.31 ilustra el ciclo de carga/descarga de las baterías, para ello, se ha supuesto que la microrred está conectada al SEP y que las baterías están descargadas. La simulación se realiza durante un día completo, se puede observar que la batería se carga casi siempre (curva azul) y se descarga por períodos (curva verde).

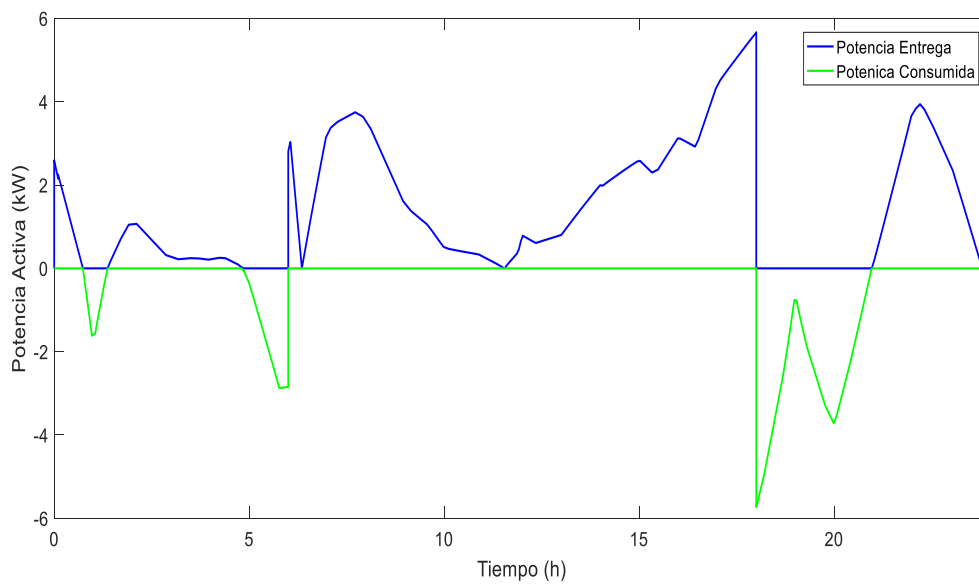


Figura 3.31 Proceso de carga/descarga

Los datos técnicos restantes se detallan en la tabla 3.12:

Tabla 3.12 Características técnicas de los equipos de almacenamiento [23], [42]

Características	Tecnología			
	Plomo ácido	Flujo de vanadio	Ion-litio	Banco de supercondensadores
Cantidad	84	1	11	10
Voltaje Nominal	2V	48 V DC	65.6 V DC	560 V DC
Potencia	50 kW	20 kW	88 kW	30 kW
Corriente de descarga	9.42A	29 A	5.98	
Capacidad de almacenamiento	1131Ah c/u C ₁₂₀	100 kWh	44kWh	13F
Número de ciclos de carga y descarga	2400 ciclos a 60% DoD C ₁₀	20.000 ciclos 100% DoD	4000 ciclos	1000000 ciclos (20% DOD)
Autodescarga	2.5%	0.27 Kw	<2%	
Conexión	Serie		Serie	Serie
Eficiencia	75%-90%	85%-90%	95%	85%-95%
Vida útil	5 años	5 años	5 años	>10 años
Temperatura	20°C	-20 - 45°C	23°C	-40-40°C
Marca	A600 Solar (USA)	Gildemeister (Austria)	Samsung (Corea)	Maxwell (USA)
Modelo	A602/1130	Cellcube FB 20-100	Celda ELPT392-0002	BMOD0130
Voltaje Total	168V DC		642V DC	130F
Observaciones	Controlado por válvula (VRLA) de Gel	Costo de mantenimiento considerable	SOC 20%, cuidado con la descarga interna	8 años de vida útil a max temp

3.4.7. Cargas

La previsión de la carga es muy importante para una correcta gestión de la energía. Conocer el perfil de carga permite al operador clasificarlas según sus características en críticas y no esenciales.

Establecer con exactitud el perfil de demanda sobre todo residencial es difícil y requiere de experiencia, por ello generalmente esta previsión se basa en datos históricos.

Como parte de las cargas también se cuenta el vehículo eléctrico, el montacargas y las cargas programables (banco de cargas trifásicas de tipo resistivo con capacidad de 150kW variable, pasos de 5kW (ver figura 3.32 y 3.33) [42].



Figura 3.32 Carga resistiva programable

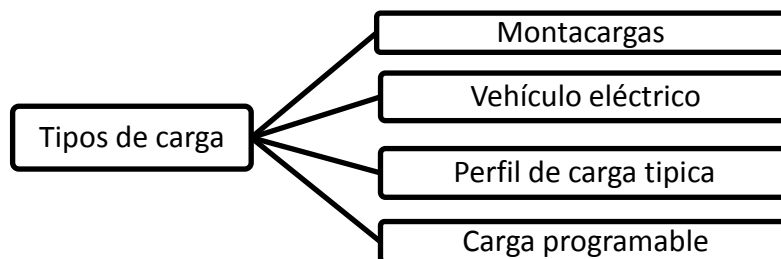


Figura 3.33 Tipos de carga de la microrred de Balzay

Los valores de cada una de las cargas mencionadas anteriormente dependen directamente de la hora, día y época del año. Además, se considera que el consumo durante los fines de semana es casi nulo y que las luminarias empiezan a funcionar alrededor de las 18h00.

3.4.7.1. Vehículo eléctrico (VE) y montacargas

Los vehículos de combustión son los principales causantes de la contaminación del aire sobre todo en las zonas urbanas, por lo tanto, en busca de una solución eficaz y una movilidad sostenible, se recurre a la electrificación del transporte.

El laboratorio cuenta con un vehículo eléctrico modelo Soul Electric del fabricante KIA (Corea) y un montacargas modelo HYUNDAI 10BTR-9 con sus respectivas estaciones de carga, permitiendo numerosos estudios que determinen si son candidatos ideales para la sustitución de vehículos convencionales en el futuro (ver figura 3.34, 3.35, 3.36) [42].



Figura 3.34 Vehículo eléctrico modelo Soul Electric del fabricante KIA

Los vehículos eléctricos pueden resolver los problemas de movilidad pero se debe tener cuidado durante las horas pico y no provocar una sobrecarga en el sistema. La cantidad de energía necesaria y el tiempo de duración dependen del tipo de vehículo y el nivel de carga.



Figura 3.35 Montacargas modelo HYUNDAI 10BTR-9

Se deben considerar los siguientes factores [30]:

- El instante en el que los vehículos están conectados a la estación de carga
- Cantidad de energía necesaria para cargar los vehículos
- Las millas conducidas son aproximadamente 160 km por carga
- Se usa la estación de carga nivel L₂ con conector j1772
- Si la distancia recorrida es mayor, el diseño y el tamaño de la batería cambian, originando un costo mayor
- El SOC de los vehículos.



Figura 3.36 Estación de carga

La tabla 3.13 muestra las especificaciones técnicas del vehículo eléctrico y el montacargas.

Tabla 3.13 Características técnicas de los vehículos eléctricos [42]

Características	Tecnología	
	Vehículo eléctrico	Montacargas
Potencia nominal	81.4 kW	4.3kW
Motor-generator	Síncrono de imanes permanentes.	Motor para la tracción de 4.3 kW y motor para el sistema de bombeo hidráulico de 9 kW.
Capacidad de carga		1.5 Ton
Batería	Ion-litio	Plomo ácido
	90 kW	Descarga profunda de 24V
	27 kWh	625Ah
	192 celdas en 8 módulos enfriadas por aire	12 celdas en serie de 2V c/u
Estación de carga	360V DC	
	Nivel L1	Nivel L2
	120V	220V
	16A	25A
		24V
		70A

	5,5kW	
	Modo 3 del estándar IEC 62196	
	Conector tipo 1, estándar SAE j1772	
Observaciones	Ambos alimentados eléctricamente con un convertidor de potencia dc/ac	

3.4.8. Monitoreo y sistemas de control

Esta categoría incluye dispositivos que aceptan información para mostrarla o analizarla, estos datos son recolectados de diversos sensores que generalmente miden el rendimiento, la potencia de salida, temperatura, vibraciones, tensión y corriente, etc (ver figura 3.37).



Figura 3.37 Interfaz de control y monitoreo

Los medidores se colocan en puntos críticos de la red de distribución y los valores medidos se envían directamente en tiempo real al operador para su análisis.

Los inversores permiten que todos los dispositivos de almacenamiento, algunas fuentes de generación y el vehículo eléctrico entreguen energía a la red usando un convertidor dc/ac. Este dispositivo monitorea el voltaje, la frecuencia, la corriente y el ángulo de fase como parte de su sistema de control estándar (ver figura 3.38) [30].



Figura 3.38 Inversores de los paneles fotovoltaicos

La tabla 3.14 muestra las características principales de los inversores que usa cada elemento de la microrred [42].

Tabla 3.14 Características técnicas de los inversores [42]

Características			
Tecnología	Capacidad nominal	Rendimiento	Observaciones
Inversor PV	5kW	97%	
Inversor para Aerogenerador de eje horizontal	5kW	97%	Primero usa un convertidor AC/DC
Inversor para Aerogenerador de eje vertical	5kW	97%	Primero usa un convertidor AC/DC
Inversor para generación mini-hidro	5kW	97%	Primero usa un convertidor AC/DC
Inversor para generación con celda de hidrógeno	3kW	97%	
Convertidor para batería de plomo ácido	50kW	97%	Transformador de aislamiento
Inversor para batería de flujo de vanadio	20kW	97%	Transformador de aislamiento trifásico
Convertidor para batería de ión-litio	50kW	97%	Bidireccional de 2 niveles
Convertidor para banco de supercondensadores	15kW	97%	Bidireccional
Convertidor para montacargas	1.8kW	97%	DC/AC
Todos los inversores usan un transformador de aislamiento por seguridad			

Algunas de las fuentes de generación usan convertidores ac/dc con el fin de estabilizar el voltaje de salida antes de conectarse al bus ac. Finalmente, los

componentes de medición y control de la microrred se puede observar en la tabla 3.12.

Tabla 3.15 Características técnicas de los equipos de control y monitoreo [42]

Tecnología	Características		
	Capacidad	Modelo	Observaciones
Emulador de Red de Distribución	500kW		La finalidad de emular líneas de transmisión de energía eléctrica en baja tensión
SCADA		Lenovo X3550 M5	Interfaz manejado por LabView®, permite el enlace con los convertidores de potencia.
Todos los dispositivos se comunican con un anillo de fibra óptica.			

CAPÍTULO 4

4. Escenarios de operación

Esta sección muestra los posibles escenarios de operación de la microrred del laboratorio de Balzay, operando en modo isla y conectada a la red.

4.1. Newton-Raphson (NR)

Un sistema eléctrico de potencia se encuentra constituido por diferentes barras que se pueden clasificar como barras PV, PQ y barra *slack*. Las barras PV son aquellas que tienen un generador o varios generadores conectados, y pueden regular el voltaje y con ello la potencia activa inyectada al sistema. Las barras PQ son aquellas donde se encuentran conectadas las cargas del sistema, consumen potencia activa y reactiva. La figura 4.1 muestra una típica barra PV y PQ. Y a barra *slack* funciona como una barra de referencia para el sistema, con modulo y ángulo de voltaje, esta barra suministra o absorbe potencia activa para equiparar la generación y la demanda [49].

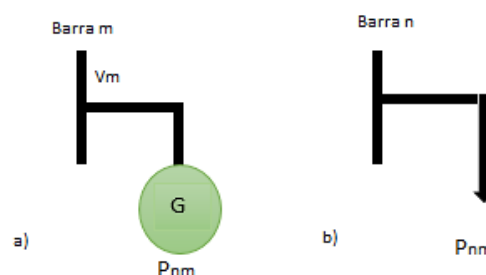


Figura 4.1 a) Barra PV, b) Barra PQ

Existen varios métodos para analizar flujos de potencia, pero por su rapidez y robustez para este trabajo se seleccionó el método de Newton-Raphson. Este método requiere conocer dos parámetros: potencia activa y reactiva y calcular la magnitud con su respectivo ángulo de voltaje[49].

Las ecuaciones del sistema, son funciones no lineales del voltaje de las barras. Además, si las potencias de generación y de carga inician con un valor, el vector solución contiene las magnitudes y ángulos de los voltajes [49].

Las potencias de cada barra se pueden calcular a partir de las ecuaciones de la potencia compleja S_B , corriente en la barra I_B , la matriz admitancia del sistema Y_B y el voltaje de la barra V_B [49].

$$S_B = V_B * I_B' \quad (4.1)$$

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (4.2)$$

$$I_B = Y_B * V_B \quad (4.3)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij}\text{sen}\theta_{ij}) * (\text{cos}\theta_{ij} + j\text{sen}\theta_{ij}) * V_j \quad (4.5)$$

En donde con algoritmos matemáticos se deduce la potencia activa es:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}\text{cos}\theta_{ij} + B_{ij}\text{sen}\theta_{ij}) * V_j \quad (4.6)$$

Y la potencia reactiva es:

$$V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i * (G_{ij}\text{cos}\theta_{ij} + B_{ij}\text{sen}\theta_{ij}) * V_j \quad (4.4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}\text{sen}\theta_{ij} - B_{ij}\text{cos}\theta_{ij}) * V_j \quad (4.7)$$

El desarrollo de la matriz Jacobiana se divide en dos partes, las ecuaciones para encontrar la diagonal principal y, las que se encuentran fuera de ella para cada subíndice j , existe uno y solo un término distinto de cero.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i * (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) * V_j \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i * (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) * V_j \quad (4.8)$$

Luego tenemos:

$$V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i * (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) * V_j \quad (4.9)$$

La ecuación de la diagonal principal está dada por:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -V_i * \sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) * V_j - B_{ii} * V_i^2 \quad (4.10)$$

Debido a que para cada $i=j$:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} B_{ii} \text{sen} \theta_{ii} V_i^2 = 0 \quad (4.11)$$

De igual manera se realiza para la ecuación de la potencia activa y reactiva:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i * \sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) * V_j - G_{ii} * V_i^2 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i * \sum_{j=1}^n (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) * V_j - G_{ii} * V_i^2 \quad (4.13)$$

Para cada $i=j$:

$$V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) * V_j + G_{ii} * V_i^2 \quad (4.14)$$

Para cada $i=j$:

$$V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_i \frac{\partial}{\partial V_i} G_{ii} \cos \theta_{ii} V_i^2 = 2 * G_{ii} * V_i^2 \quad (4.15)$$

La sumatoria contiene solo un $G_{ii} * V_i^2$

$$V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) * V_j - B_{ii} * V_i^2 \quad (4.16)$$

Con $i=j$:

$$V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -V_i \frac{\partial}{\partial V_i} B_{ii} \cos \theta_{ii} V_i^2 = -2 * B_{ii} * V_i^2 \quad (4.17)$$

Todo lo mencionado anteriormente sirve para obtener la potencia y las pérdidas de cada barra y se resume en el diagrama de flujo de la figura 4.2.

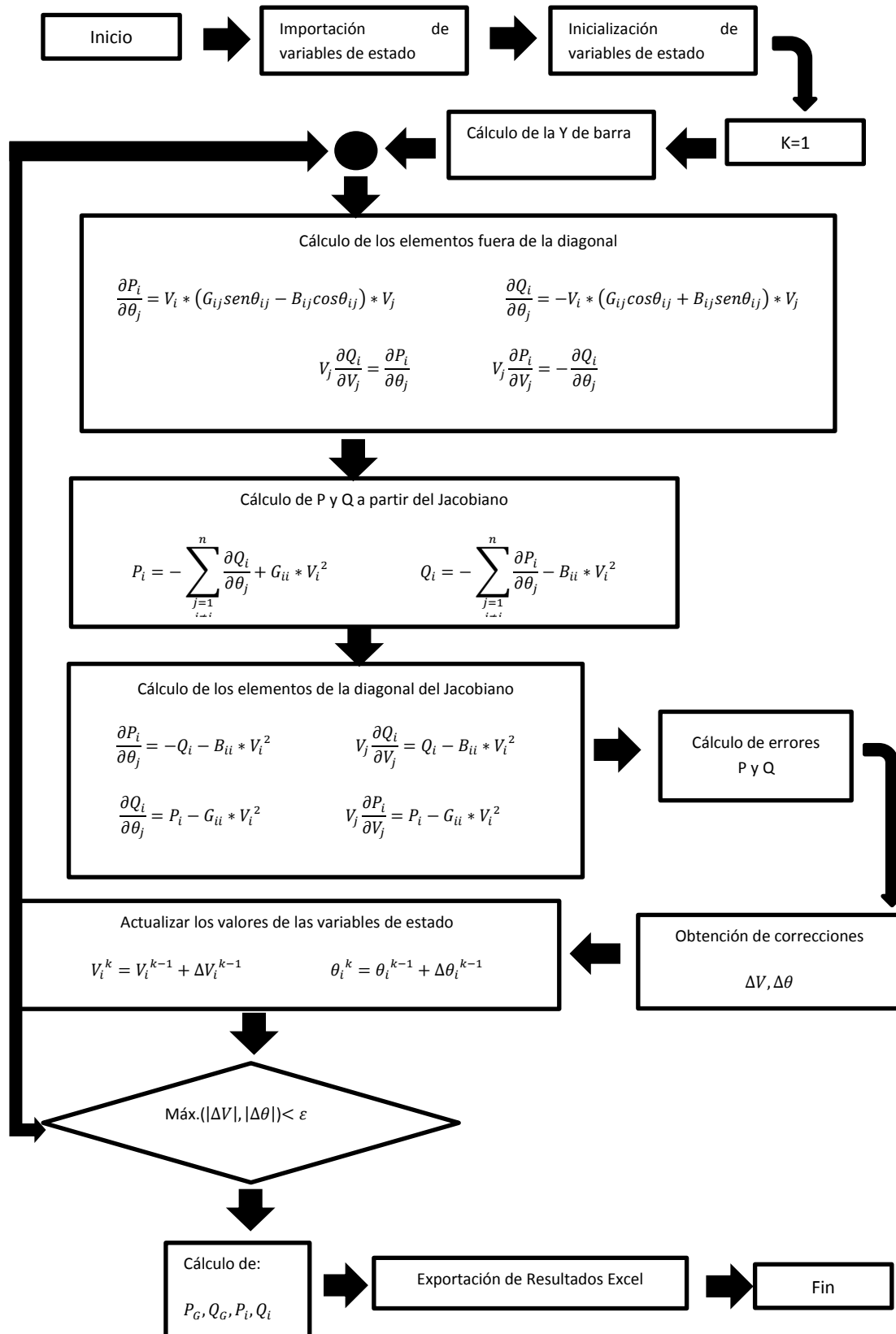


Figura 4.2 Mapa conceptual para encontrar las potencias usando NR

4.2. Simulación de la microrred en estado estacionario

La estructura de una microrred es compleja, pero puede ser modelada de forma sencilla, con el fin de facilitar la comprensión de su estructura sin dañar el sistema. El modelo construido en la plataforma de MATLAB es simple (ver figura 4.3), pero tiene implementado todas las características para obtener un perfil de potencia cercano a la realidad.

El modelo representa una microrred en anillo formada por 4 barras (ver tabla 4.1), con voltaje de referencia de $1\angle 0$ V:

Tabla 4.1 Nombres de las barras que forman la microrred

Número de Barra	Nombre de la Barra	Descripción
1	Slack	Es el punto de acoplamiento entre la microrred y el SEP
2	Generación	Es el punto de conexión de todas las fuentes de generación
3	Carga	Es el punto donde se conecta la carga del laboratorio y el vehículo eléctrico.
4	Almacenamiento	Es el punto de conexión de todos los sistemas de almacenamiento.

El software de MATLAB brinda la facilidad de ejecutar la simulación en diferentes períodos de tiempo, dependiendo de las necesidades del usuario; para nuestro caso de estudio la simulación se realizó en el dominio fasorial, de tal manera que el comportamiento de la microrred se pueda obtener en segundos, minutos, horas y días.

Las simulaciones fasoriales reducen significativamente el esfuerzo computacional y las necesidades de memoria [50], además permite añadir más componentes y tecnologías sin mayor dificultad. La falta de inversores y convertidores ac/dc–dc/dc se sustituye internamente con modelos eficientes.

La simulación de la microrred se ejecutó integrando todos los equipos que la componen, interconectados a través de un transformador, líneas de transmisión y barras obtenidas de la caja de herramientas de *SimPowerSystem* y una estructura diseñada con bloques como en el capítulo 3.

La microrred se simula bajo las siguientes condiciones de operación[9]:

- No existen pérdidas por distancia, efecto Joule o efecto capacitivo

- No presenta ninguna inercia
- La impedancia de las líneas es muy pequeña
- La carga/descarga de las baterías no se produce en forma lineal, su comportamiento depende de la demanda
- La red tiene 60Hz y una potencia estimada de 10MVA
- Los datos de entrada son los mismos que se usaron el capítulo 3

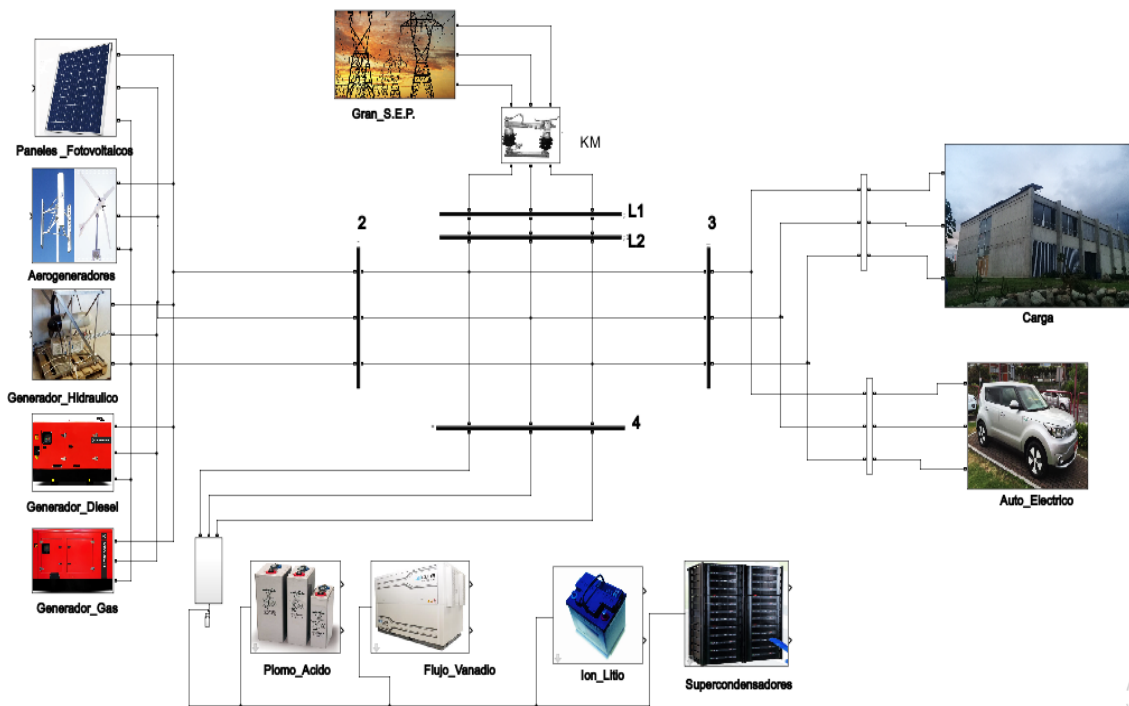


Figura 4.3 Diseño en MATLAB de la microrred de Balzay

4.3. Criterios de funcionamiento

El Centro Científico, Tecnológico y de Investigación Balzay, es un laboratorio creado con el fin de incentivar la investigación en el campo de las energías renovables, permitiendo realizar varios experimentos basados en diferentes configuraciones. Sin embargo, aprovechando que el laboratorio cuenta con una estructura completa de lo que se considera una microrred, este trabajo propone dos criterios de funcionamiento, con el objetivo de conocer la viabilidad que tendría la instalación de una microrred sobre la red de baja tensión.

- 1) La microrred funciona como un prototipo experimental y alimenta únicamente las cargas del laboratorio.
- 2) La microrred se simula como una entidad comercial que vende y compra energía eléctrica al sistema eléctrico de potencia.

4.3.1. La microrred como un prototipo experimental

Bajo este criterio de funcionamiento, la microrred alimenta únicamente la carga del laboratorio y el vehículo eléctrico con fuentes de generación no gestionables por razones ecológicas. El consumo del montacargas no se estimó ya que este se usara ocasionalmente y no tiene mayor impacto sobre la curva de demanda.

Una unidad de generación puede ser gestionable o no gestionable en términos de control de flujo. Las fuentes de generación gestionables son todas aquellas que mediante un sistema de control externo se puede controlar su potencia de salida activa y reactiva (motor de combustión interna). Mientras que las no gestionables son normalmente controladas en la condición de operación óptima de su fuente de energía primaria y carecen de capacidad de despacho, por ejemplo, generador eólico [51].

La carga se estimó en base al comportamiento diario del personal que labora en el laboratorio, es decir:

- En el intervalo de 23h00-08h00 se produce el mínimo consumo
- En el intervalo de 08h00-13h00 el consumo que existe será el realizado por el personal administrativo.
- En el intervalo de 13h00-15h00 el consumo decae por ser horas de almuerzo.
- En el intervalo de 15h00-18h00 el consumo que existe nuevamente será el realizado por el personal administrativo.
- El vehículo eléctrico se carga a partir de las 18h00, pero luego de recorrer 160km aproximadamente. Sin embargo, se considera que en un día normal no se realiza este recorrido.

La figura 4.4 muestra la carga total (kW) durante tres días.

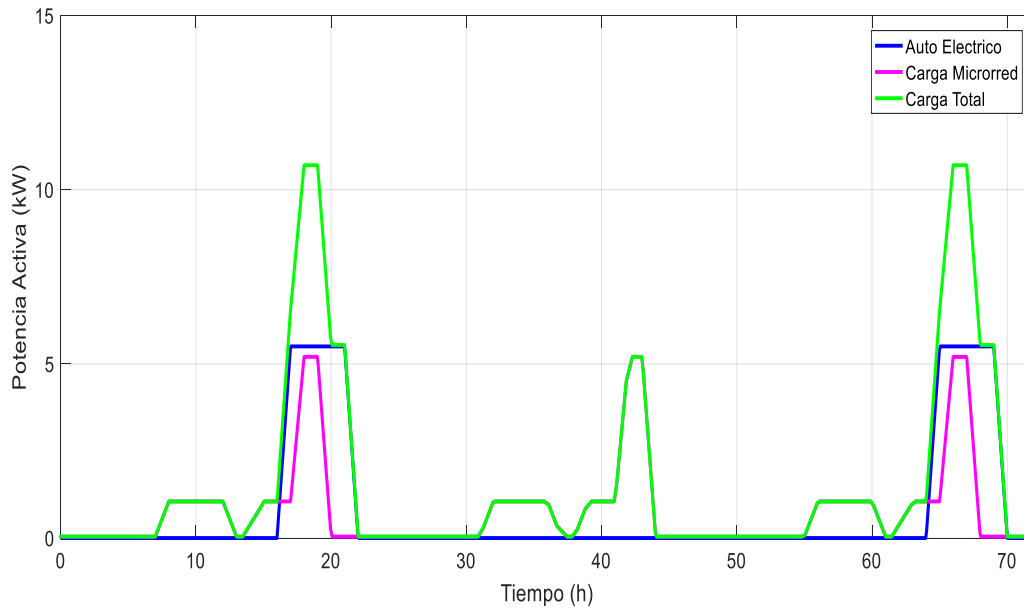


Figura 4.4 Carga total del laboratorio de Balzay

Como se puede observar, el primer día a las 18h00 y 19h00 se produce un incremento de la carga, debido a que el vehículo eléctrico empieza a cargarse y se encienden las luminarias. Este comportamiento tiene un lapso de aproximadamente cinco horas que es el tiempo que tarda el VE en cargarse. No obstante, el segundo día como el VE no necesita cargarse, la carga total es muy pequeña. La curva total de demanda en el tercer día tiene un comportamiento muy similar al primero

Adicionalmente, para garantizar el óptimo funcionamiento de la microrred se debe tener en cuenta los valores de la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Porcentajes de carga y descarga de los equipos de almacenamiento

Equipo de almacenamiento	Porcentaje mínimo de descarga (%)	Porcentaje máximo de carga (%)
Plomo ácido	75	90
Flujo de vanadio	0	100
Ión-litio	80	90
Supercondensadores	0	100

A partir del conocimiento de la carga y operación de las baterías se pueden establecer dos modos de operación:

4.3.1.1. Aislada de la red

La microrred trabaja en modo isla si el interruptor KM está abierto, KM=0 (ver figura 4.3), en este modo las fuentes de generación se adaptan continuamente a la carga y el voltaje y la frecuencia son establecidos por los inversores.

Para apoyar el análisis se presenta 3 posibles escenarios variando la disponibilidad de los recursos renovables:

4.3.1.1.1. Generación renovable disponible

En este caso, todas las fuentes de generación no gestionables se encuentran disponibles. El objetivo es comprobar si la potencia instantánea puede cubrir la demanda durante los tres días.

En la figura 4.5 se presenta esta situación, el perfil de demanda corresponde a la figura 4.4 y los datos de generación al capítulo 3.

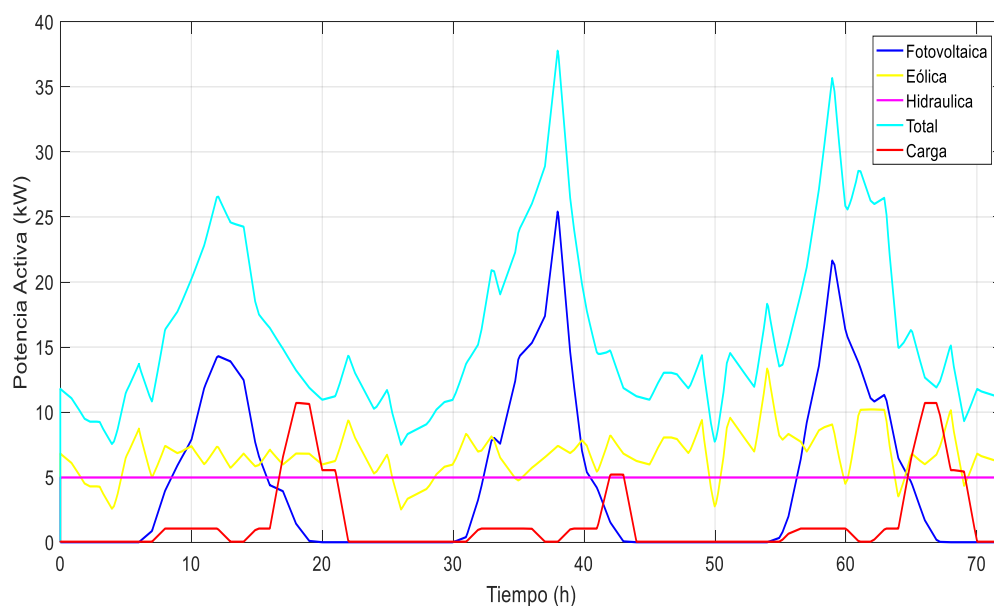


Figura 4.5 Generación total instantánea de las fuentes no gestionables

Se puede observar que la curva de demanda es menor a la curva de potencia total instantánea durante los tres días. En esta situación, el exceso de generación se aprovecharía para cargar las baterías.

4.3.1.1.2. Ausencia de una de las fuentes de generación renovable

En este escenario se presenta una situación desfavorable al sacar de operación una de las fuentes de generación no gestionables. El objetivo de este escenario es comprobar si las baterías están en la capacidad de abastecer la carga en caso de que una fuente de generación este en mantenimiento o las condiciones climáticas no sean favorables para la producción de energía eléctrica.

1) Ausencia de energía fotovoltaica

La figura 4.6 muestra el impacto que tiene la falta de energía fotovoltaica en la microrred.

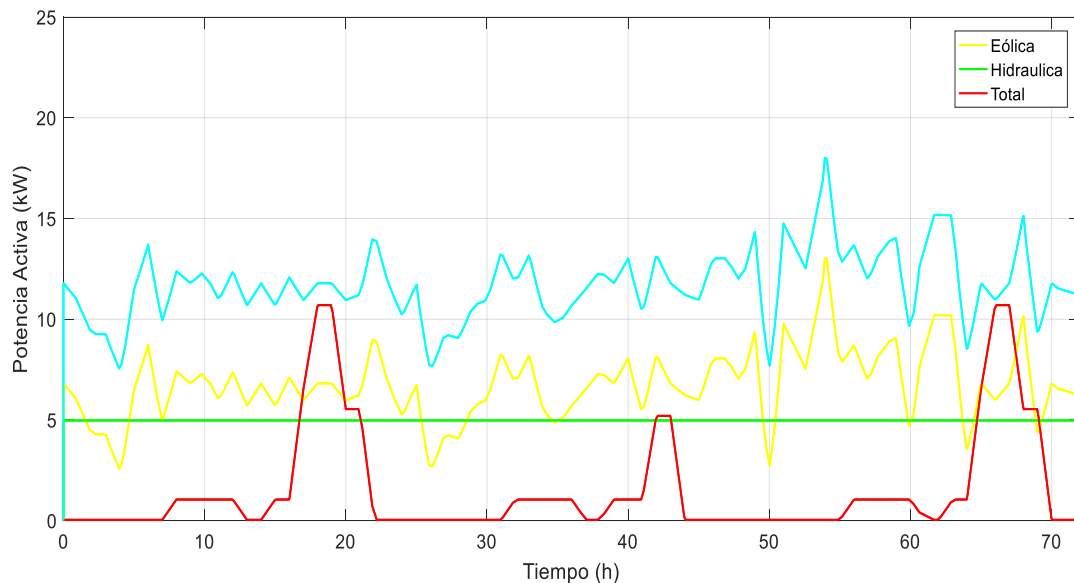


Figura 4.6 Ausencia de los paneles fotovoltaicos

Como se puede observar la potencia total se reduce significativamente, sobre todo en el intervalo de 11h00 a 14h00. No obstante, la energía eólica e hidráulica puede cubrir la demanda durante los tres días, por lo tanto no es necesario el uso de equipos de almacenamiento.

2) Ausencia de energía eólica

La figura 4.7 muestra el impacto que tiene la falta de energía eólica en la microrred.

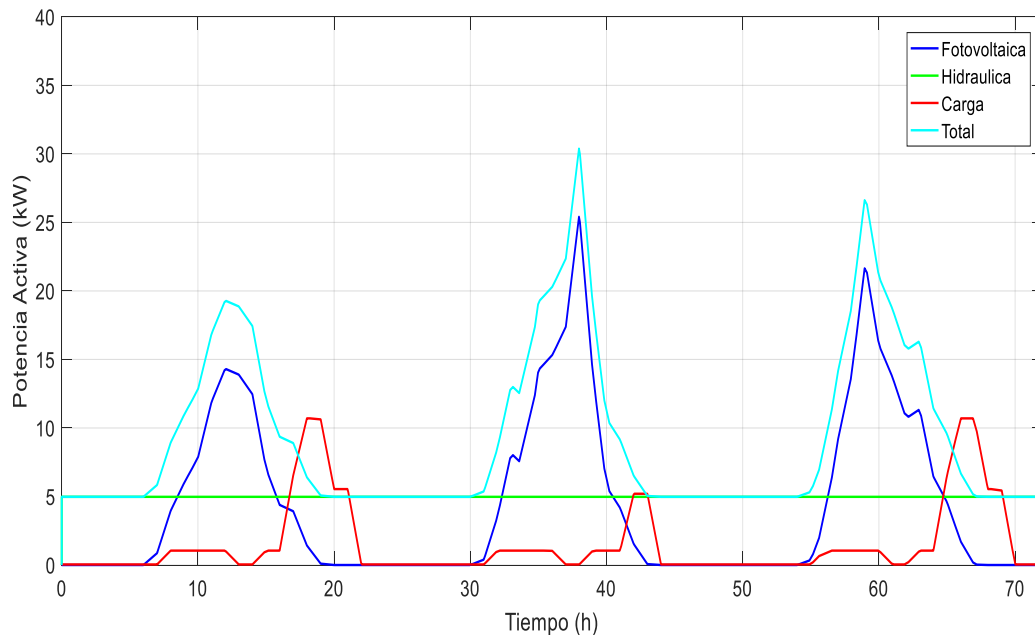


Figura 4.7 Ausencia de energía eólica

Como se puede observar la ausencia de energía eólica afecta en gran medida la curva de generación, sobre todo el primer y tercer día que es donde se carga el VE. La diferencia entre generación y demanda en el intervalo de 18h00 a 23h00 es de aproximadamente 5kW dependiendo del día, por lo tanto, es necesario que los equipos de almacenamiento aporten energía durante ese intervalo de tiempo.

En base a las características técnicas presentadas en la tabla 3.9 y la tabla 4.2, la batería de flujo de vanadio es la mejor opción. Esta batería tiene la capacidad de entregar 20kW durante 5 horas, tiempo y capacidad suficiente para cubrir la falta de generación.

3) Ausencia de la energía hidráulica

La figura 4.8 muestra la ausencia de energía hidráulica y el impacto que tiene sobre la curva de generación total.

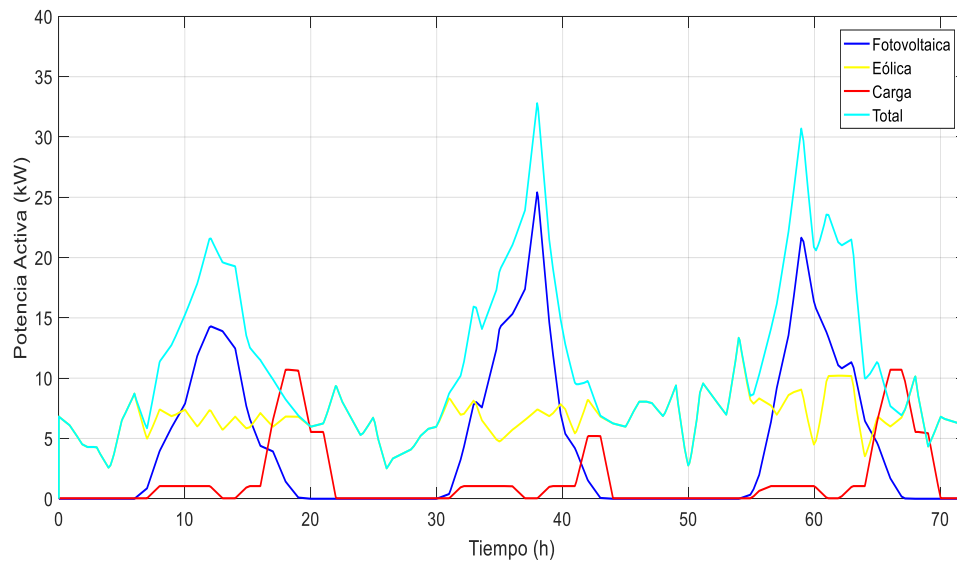


Figura 4.8 Ausencia de energía hídrica

Como se puede observar en la figura 4.8, el impacto que tiene la falta de energía hídrica sobre la curva de generación es mucho menor a la falta de energía eólica. El intervalo donde la demanda es mayor a la generación ocurre el primer y tercer día durante las 18h00 y 23h00. Esta diferencia es de aproximadamente 2kW y se usa la batería de flujo de vanadio para cubrirla.

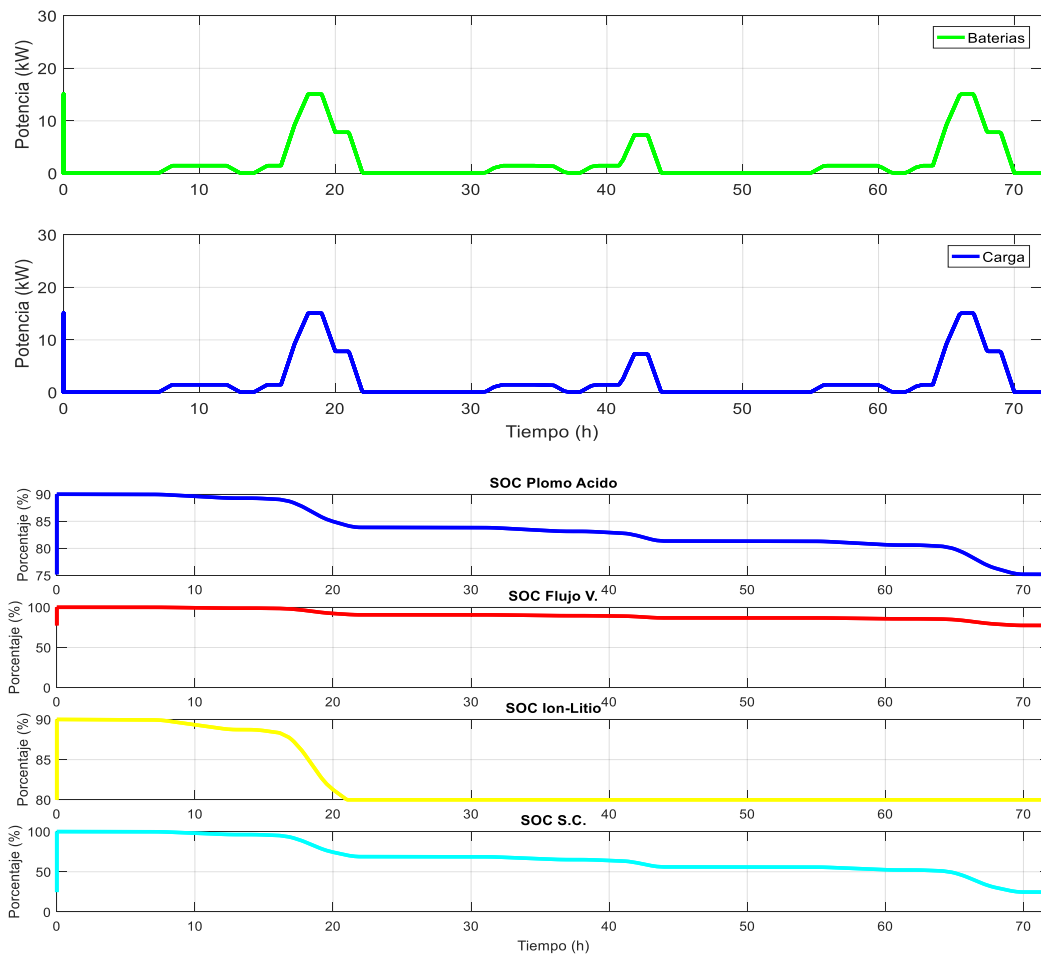
4.3.1.1.3. Ausencia de fuentes de generación

Este caso se considera el peor escenario porque existe ausencia total de las fuentes de generación no gestionables. Este escenario se plantea con el objetivo de verificar si los equipos de almacenamiento son capaces de cubrir la demanda de la microrred sobre todo en el intervalo de 18h00 a 23h00, para ello se supone que todas las tecnologías de almacenamiento se encuentran totalmente cargadas.

Las tecnologías de almacenamiento operaran bajo las siguientes consideraciones:

- La potencia que puede aportar cada equipo (ver tabla 3.9)
- Los valores mínimos de descarga y máximos de carga (ver tabla 4.2)

Basados en las condiciones anteriores, resulta mucho más factible que las baterías de plomo ácido y flujo vanadio cubra la mayor parte de la demanda (ver figura 4.9).



N

Figura

4.9 Aporte de cada uno de los equipos de almacenamiento para cubrir la demanda

Como se puede observar las baterías pueden cubrir la demanda sin ningún problema, incluso durante el intervalo de 18h00 a 23h00. La demanda se cubre de la siguiente manera: la batería de plomo ácido aporta el 40% que equivale aproximadamente a 10kW; la batería de flujo de vanadio aporta el 40% es decir la mitad de su capacidad nominal instantánea (10kW), mientras que la batería de ión-litio y supercapacitores aportan el 10% que equivale a 2.5kW.

Con esto se demuestra que si existen equipos de almacenamiento de respaldo, la microrred es capaz de funcionar con fuentes de generación fuera de servicio y condiciones climáticas no adecuadas.

4.3.1.1.4. Conectada a la red

La microrred está conectada a la red de media tensión si el interruptor KM está cerrado, es decir $KM=1$ (ver figura 4.3). El voltaje y la frecuencia son establecidos por el SEP en el momento de la conexión.

Este caso es el peor escenario desde el punto de vista ecológico, es decir, las fuentes de generación gestionables como el generador a diésel y generador de gas licuado de petróleo se ponen en funcionamiento. El objetivo es alimentar el campus donde funcionara la microrred del laboratorio, suponiendo que el suministro eléctrico fallo debido a un apagón. Si este escenario se llevara a la realidad el operador de la microrred debe preparar las instalaciones para que la conexión no tenga ningún inconveniente.

Se estima que la carga total del campus será superior a la generación de la microrred, por ello, solo se podrá abastecer una parte, es decir, la carga no debe superar los 90kW; para ello se debe dar prioridad a las cargas críticas.

La figura 4.10 muestra la potencia total que puede entregar la microrred suponiendo que todas las fuentes de generación están aportando.

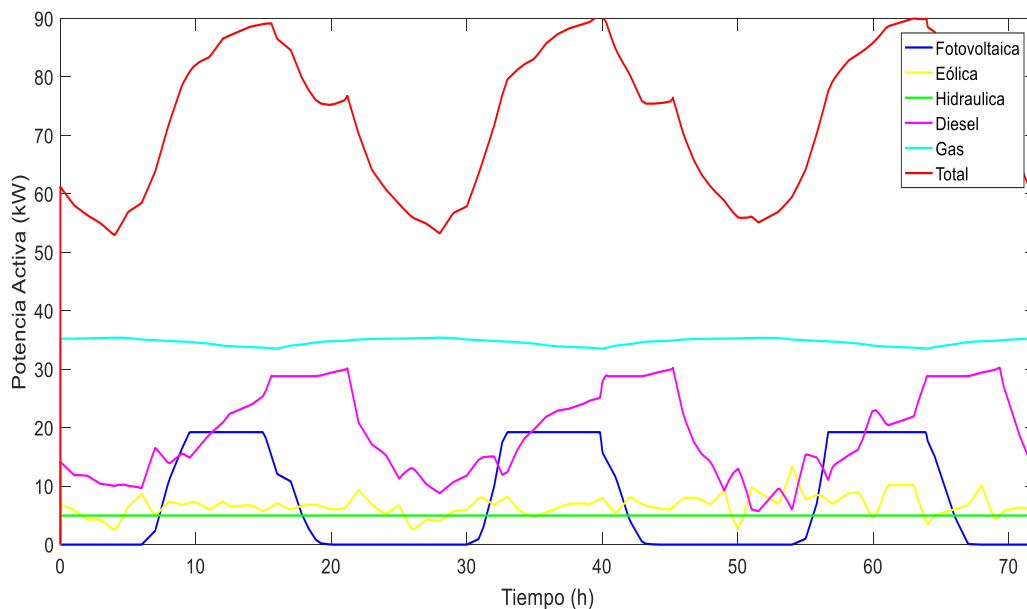


Figura 4.10 Potencia total instantánea cuando todos los equipos de generación de la microrred operan

Como se observa en la figura 4.10, la potencia instantánea puede alcanzar aproximadamente 90kW, pero, este valor puede variar dependiendo de la estación del año, las condiciones climáticas y hora del día.

Adicionalmente, para analizar con mayor detalle lo que ocurre durante un día, en el anexo D se muestra todos los escenarios simulados durante 24 horas.

4.3.2. La microrred como una entidad comercial

El objetivo fundamental de este criterio de funcionamiento es demostrar que mediante la conexión de la microrred a la red de distribución se puede conseguir una curva de generación y consumo más homogéneos, con la participación activa de las fuentes de energías renovables.

La conexión se realiza siempre y cuando se cumpla con las normas de las subestaciones (*IEEE 1547*), por lo tanto, los elementos de generación y carga no deben interferir ni causar perturbaciones en la red y la energía eléctrica se contabiliza a través de un medidor de energía comercial.

En el caso de que las condiciones de operación no sean aceptables, la microrred se desconecta y debe funcionar de forma autónoma. Estos eventos pueden ser provocados por el hombre o una calamidad ambiental (mantenimiento, caídas de voltaje, cortocircuitos, etc) [30].

Cuando la microrred opera conectada al SEP el flujo de potencia es bidireccional, es decir, puede entregar o consumir energía eléctrica de acuerdo a las necesidades de la microrred.

El SEP sirve como reserva rodante si la previsión de las condiciones climáticas tiene errores. En base a lo expuesto anteriormente se establecen los siguientes principios de operación:

- La microrred debe conectarse a un SEP robusto, para que no exista problemas como falta de generación.
- Todas las fuentes de generación deben operar, pero se debe dar prioridad a las fuentes no gestionables.

- Las baterías se cargan durante la noche y primeras horas de la mañana donde el precio de la energía eléctrica es menor, y se descargan durante las horas pico donde el costo de generación es mayor.
- Si existe exceso de generación y las baterías están cargadas, entonces se vende el excedente a la red.
- Se ha supuesto que la demanda total de la microrred está formada por tres cargas residenciales (7,5kW c/u) y dos cargas comerciales (28kW c/u), estos datos se tomaron de un ejemplo del programa *Homer Energy*, que son datos estimados a partir de estudios previos.

La figura 4.11 muestra el caso en donde la microrred opera sin estar conectada al sistema eléctrico de potencia.

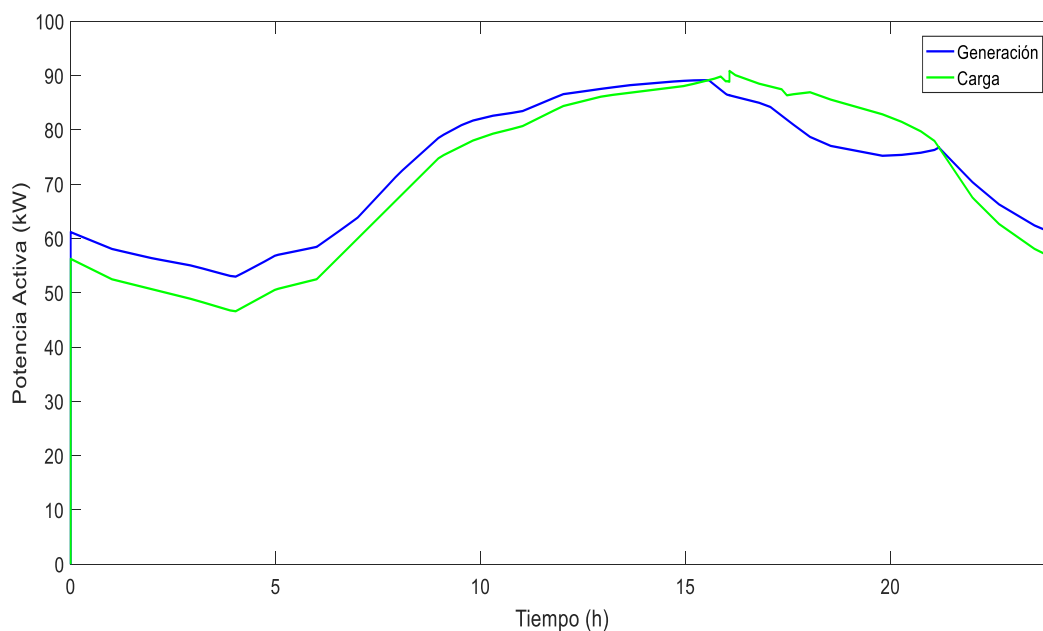


Figura 4.11 Comportamiento de la microrred antes de la interconexión con la red

Se puede observar que en el intervalo de 00h00 a 10h00 la generación es mayor a la demanda, este exceso se puede aprovechar para cargar las baterías. A partir de las 10h00 la demanda crece, lo que es lógico ya que nos aproximamos a la hora pico, en este lapso de tiempo las fuentes de generación únicamente cubren la demanda, es decir, las baterías dejan de cargarse.

En el intervalo de 16h00 a 23h00 aproximadamente, la curva de demanda es mayor a la curva de generación, esto se debe a que la microrred deja de

percibir energía eléctrica por parte de los paneles fotovoltaicos, por lo tanto, es necesario que los equipos de almacenamiento cubran la otra parte de la demanda. Si las tecnologías de almacenamiento no pueden cumplir con este objetivo, la microrred entra a un estado de emergencia, donde para mantener la estabilidad se recurre al deslastre de cargas; para este caso no se simula esta condición por tratarse de un sistema dinámico y estar fuera del alcance de este trabajo.

En contraste, la figura 4.12 muestra a la microrred conectada al SEP.

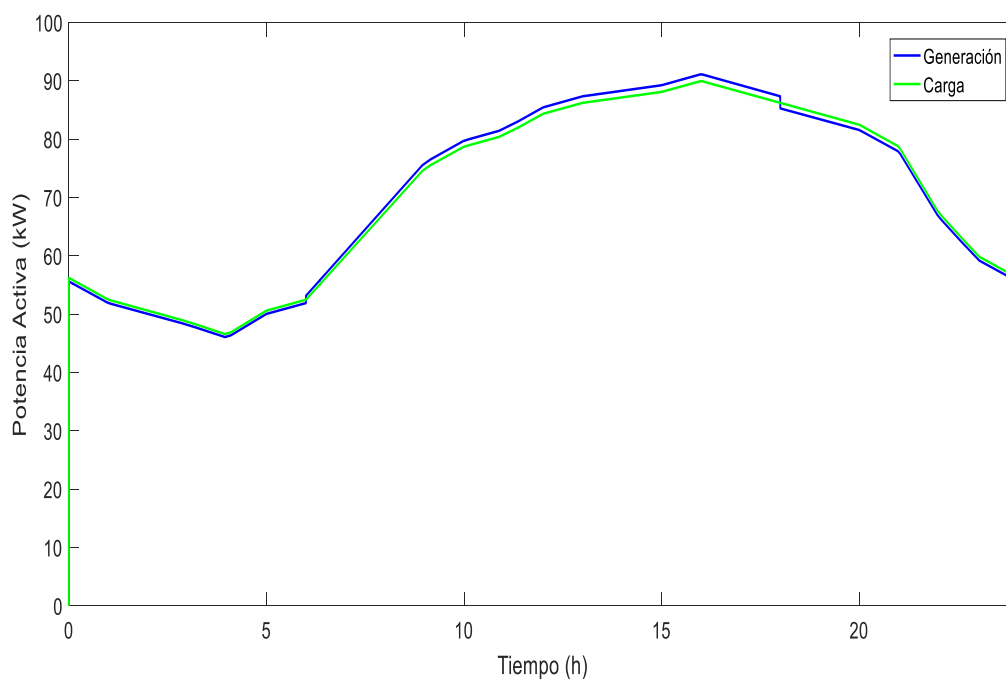


Figura 4.12 Comportamiento de la microrred luego de la conexión con la red

Se puede observar que en las primeras horas de la mañana y parte de la noche ya no existe exceso de generación porque la energía eléctrica se está entregando al SEP. La falta de energía que se produce en el intervalo de 16h00 a 23h00 se cubre sin ningún problema porque se importando de la red.

Como resultado de la conexión de la microrred al SEP se tiene un sistema balanceado en donde todo lo que se genera se consume.



CAPÍTULO 5

5. Eficiencia Energética

Este capítulo presenta un modelo que determina cuánto vender y a qué precio, considerando aspectos operacionales, técnicos y económicos. La finalidad es mejorar la fiabilidad de la fuente de alimentación y aumentar el uso de las energías renovables.

El análisis se hace en el programa de prueba Homer Energy.

5.1. Definición de eficiencia energética

La eficiencia energética busca el uso consciente de la energía eléctrica, por medio de políticas que incentiven el ahorro de energía en los hogares y en la industria, usando fuentes amigables con el medio ambiente y creando normas y reglamentos que impulsen la transformación de la matriz energética [41],[52].

La entidad responsable es el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), quien mediante el Art. 74 ha impulsado muchos proyectos.

Art. 74.- Objetivos.- La eficiencia energética tendrá como objetivo general la obtención de un mismo servicio o producto con el menor consumo de energía. En particular, los siguientes:

- Fomentar la eficiencia energética en la economía y en la sociedad en general, y en particular en el sistema eléctrico.
- Promover valores y conductas orientados al empleo racional de los recursos energéticos, priorizando el uso de energías renovables.
- Propiciar la utilización racional de la energía eléctrica por parte de los consumidores o usuarios finales.
- Incentivar la reducción de costos de producción a través del uso eficiente de la energía, para promover la competitividad.

- Disminuir el consumo de combustibles fósiles.
- Orientar y defender los derechos del consumidor o usuario final; y,
- Disminuir los impactos ambientales con el manejo sustentable del sistema energético.

Para cumplir con los objetivos propuestos se crea el Art. 75, el cual establece normas y políticas de eficiencia energética. El Art. 76, define incentivos o castigos para que las normas y políticas se cumplan.

5.2. Modelos de eficiencia energética en Ecuador

Los proyectos que promueven el uso eficiente de la energía, impulsados por el MEER con ayuda del Gobierno Ecuatoriano, son [41]:

- Sustituir refrigeradores.
- Sustituir las luminarias de alumbrado público.
- Eficiencia energética en la actividad industrial.
- Eficiencia energética en edificios públicos.

Sustitución de refrigeradores: El MEER en cooperación con el ministerio de industrias y productividad, inicio la sustitución de 330.000 refrigeradores en mal estado y con consumo excesivo de energía alrededor del país con el plan RENOVA. La tabla 5.1¹ muestra la cantidad de frigoríficos repartidos desde el año 2012 [41].

Tabla 5.1 Ahorro promedio por sustitución de refrigeradores [41]

		Unidades	Ahorro (kWh/mes)
Sierra	Tarifa Dignidad	86.400	35,5
	Tarifa Normal	57.600	48,9
	Total Sierra	144.000	40,9
Costa	Tarifa Dignidad	111.600	64,1
	Tarifa Normal	74.400	66,5
	Total Costa	186.000	65,1
	Total País	330.000	54,5

Sustitución de luminarias de alumbrado público: El MEER a través de las empresas distribuidoras, inicio el cambio de 65.000 luminarias de vapor de

¹ La tarifa dignidad hace regencia a los consumidores residenciales cuyos consumos no sobrepasen de 110kWh-mes en la región sierra, y 130kWh-mes en la región costa, oriente e insular [41]

mercurio por luminarias de vapor de sodio e inducción en el alumbrado público [41]. En la tabla 5.2, se muestra la cantidad de lámparas sustituidas por cantones.

Tabla 5.2 Número de lámparas por empresa [41]

Empresa	Lámparas
CNEL-Bolívar	5.500
CNEL-EI Oro	17.300
CNEL-Esmeraldas	15.900
CNEL-Guayas Los Ríos	20.500
CNEL-Los Ríos	8.900
CNEL-Manabí	40.600
CNEL-Milagro	10.000
CNEL-Sta. Elena	14.000
CNEL-Sto. Domingo	13.500
CNEL-Sucumbíos	7.600
E.E. Ambato	12.400
E.E. Azogues	2.400
E.E. Centro Sur	18.800
E.E. Cotopaxi	6.800
E.E. Norte	400
E.E. Quito	14.400
E.E. Riobamba	48.000
E.E. Sur	6.000
Eléctrica de Guayaquil	9.600
E.E. Galápagos	32.400
Total	305.000

Eficiencia energética en la actividad industrial: Alrededor de 400 empresas en todo el país están involucradas en esta iniciativa, su compromiso es mejorar y optimizar sus sistemas de gestión [41]. En la tabla 5.3 se muestra que cinco empresas distribuidoras concentran la mayor parte de industrias del país.

Tabla 5.3 Ahorro en el sector industrial [41]

Empresa	Unidad	2014	2015	2016	2017
CNEL-Guayas Los Ríos	MWh	-9.181	-18.363	-36.725	-36.725
CNEL-Manabí	MWh	-4.238	-8.475	-16.950	-16.950
E.E. Centro Sur	MWh	-4.944	-9.888	-19.775	-19.775
E.E. Quito	MWh	-21.188	-42.375	-84.750	-84.750
Eléctrica de Guayaquil	MWh	-31.075	-62.150	-124.300	-124.300
Total	MWh	-70.625	-141.250	-282.500	-282.500

Eficiencia energética en edificios públicos: El plan de eficiencia energética se concentra en la ciudad de Quito, con ayuda de la Empresa Eléctrica Quito S.A. En la tabla 5.4, se observa el plan de ahorro energético en los últimos 4 años, iniciando en el 2014, cuando se desarrolló este proyecto.

Tabla 5.4 Ahorro energético de edificios públicos [41]

Empresa	Unidad	2014	2015	2016	2017
E.E. Quito	MWh	-2.863	-2.863	-2.863	-2.863
Total	MWh	-2.863	-2.863	-2.863	-2.863

5.3. Despacho económico

El despacho económico ajusta el perfil de precios de horas o días y se actualizan regularmente a intervalos que varían de cinco minutos a cada hora. El objetivo es optimizar la generación y el consumo de energía eléctrica en la microrred [49].

En general, con el pronóstico de producción se espera mejorar el uso de los recursos y unidades de almacenamiento, reducir la congestión y minimizar el costo de producción; incluyendo los impactos ambientales, precios del mercado y la potencia eléctrica disponible de la microrred.

El método propuesto más simple consiste en la estimación de la carga máxima que dependerá de la actividad económica, períodos de vacaciones, horas estándar de trabajo, consumo histórico, etc.

Los precios son dinámicos, por ejemplo, el precio de las unidades de diésel y gas licuado de petróleo está asociado a los costes de puesta en marcha / parada y combustible. Mientras que el de las unidades de energía fotovoltaica y eólica a su alta costo de instalación.

Para nuestro caso de estudio se usó el programa *Homer Energy*, que tiene un estándar global para la optimización de microrredes. El estudio muestra el costo en kWh y el aporte de gases nocivos en kg/yr.

La programación económica supone que las ofertas de la microrred refleja los costes de combustible e inversión.

5.3.1. Despacho económico microrred aislada

La tabla 5.5 muestra el costo inicial, el costo del combustible y el costo de operación y mantenimiento de cada uno de los equipos que forman la microrred. Este último se basa en un tiempo estimado de 10 años a partir del funcionamiento del proyecto donde aún no se necesita cambios o renovación de los equipos.

Tabla 5.5 Costos estimados de los equipos de la microrred

Unidad	Potencia	Costo inicial (USD)	O y M ² (USD)	Combustible (USD)
Sistema fotovoltaico	35 kW	150.000	1.200	0,00
Generadores eólicos eje horizontal	10 kW	50.000	2.500	0,00
Generador eólico eje vertical	5 kW	40.000	1.250	0,00
Grupo termoelectrico a diése	40 kVA	70.000	10.000	70.000
Grupo termoelectrico a gas	40 kVA	80.000	10.000	90.000
baterías plomo acido	50 kW	20.000	–	0,00
Baterías ion – litio	80 kW	55.000	150	0,00
Batería de flujo de vanadio	20 kW	280.000	–	0,00
Supercondensadores	30 kW	90.000	–	0,00

Con los valores estimados en la tabla 5.5 se procede a plantear tres posibles escenarios para satisfacer la demanda requerida, para esto se varía las diferentes fuentes de generación hasta obtener el menor costo.

La tabla 5.6 muestra que el menor costo se obtiene cuando todas las fuentes de generación están operando y se usa la batería de ión-litio. El menor costo corresponde a un valor de 0,462 \$/kWh.

² O y M significa costos de operación y mantenimiento en el programa *Homer Energy*

Tabla 5.6 Costo del kWh de la microrred

G. Fotovoltaico	G. Eólico vertical	G. Eólico Horizontal	G. Diésel	G. Gas	B. Flujo de vanadio	B. Ión Litio	B. Plomo ácido	Supercapacitores	Microturbina	C.N. \$/kWh
√	√	√	√	√		√			√	0,462
√	√	√	√	√			√		√	0,501
√	√	√	√	√	√				√	0,517

En base al menor costo que se obtuvo en la tabla 5.6, la figura 5.1 muestra el aporte energético de cada una de las fuentes de generación.

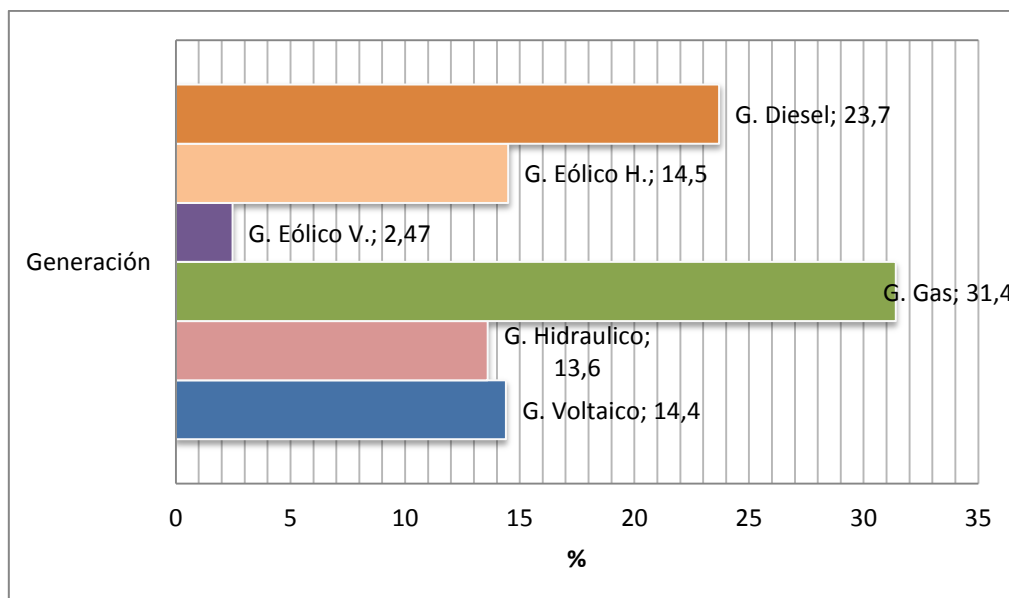


Figura 5.1 Aporte de las diferentes tecnologías de generación en modo aislada de la red

La tabla 5.7 muestra la cantidad de elementos nocivos que se evita al año cuando se usa las diferentes tecnologías de la microrred. Siendo las energías renovables no convencionales las que más aportan a la eliminación de estos gases de efecto invernadero.

Tabla 5.7 Elementos nocivos ahorrados por la generación de la microrred

Cantidad	Unidades (kg/yr)
Dióxido de carbono	183.100
Monóxido de carbono	533
Hidrocarburos incombustos	59,1
Material particulado	40,2
Dióxido de azufre	226
Óxidos de nitrógeno	4.758

5.3.2. Despacho económico de la microrred conectada al SEP

En Ecuador luego del compromiso por transformar la matriz energética del país, la implementación de proyectos basados en tecnologías amigables con el medio ambiente han tenido un trato preferencial. Estos precios dados en centavos de dólar americanos por kWh, fueron establecidos por el CONELEC y se muestran en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Costo del kWh, de las diferentes generaciones [41]

Centrales	Precio $\left(\frac{\text{cUSD}}{\text{kWh}}\right)$ Territorio continental	Precio $\left(\frac{\text{cUSD}}{\text{kWh}}\right)$ Territorio insular Galápagos
Eólicas	9.39	12.21
Fotovoltaicas	52.04	57.24
Biomasa y biogás	9.67	10.64
Geotérmicas	9.28	10.21
Pequeñas centrales hidroeléctricas hasta 5MW	5.80	6.38

A partir de los precios establecidos en la tabla 5.8 se realiza la optimización del sistema, dando prioridad a las fuentes de generación de la microrred, tal como se muestra en la tabla 5.9.

Para este caso de estudio se implementaron cuatro escenarios, el más viable desde el punto de vista económico se da cuando el SEP aporta la mayor cantidad de energía eléctrica y de la microrred únicamente opera la microturbina. El costo natural es de 0,106 \$/kWh. No obstante, como el objetivo de este trabajo es conocer el menor costo de operación cuando la microrred participe activamente en el mercado eléctrico, el precio que se escoge es el de 0,229 \$/kWh.

Tabla 5.9 Costo del kWh de la microrred conectada al SEP

G. Fotovoltaico	G. Eólico vertical	G. Eólico Horizontal	G. Diésel	G. Gas	SEP	B. Flujo de vanadio	B. Ión Litio	B. Plomo ácido	Supercapacitores.	Microturbina	C.N. \$/kWh
					√					√	0,106
√	√	√	√	√	√	√				√	0,229
√	√	√	√	√	√		√			√	0,231
√	√	√	√	√	√			√		√	0,237

La tabla 5.10 muestra el precio estimado del costo del proyecto en los próximos 10 años tomando en cuenta los costos de operación y mantenimiento.

Tabla 5.10 Costo estimado de los equipos de la microrred conectada

Unidad	Potencia	Costo inicial (USD)	O y M (USD)	Combustible (USD)
S. E. P	—	20.000	—	—
Sistema fotovoltaico	35 kW	150.000	1.200	0,00
Generadores eólicos eje horizontal	10 kW	50.000	2.500	0,00
Generador eólico eje vertical	5 kW	40.000	1.250	0,00
Grupo termoeléctrico a diésel	40 kVA	70.000	10.000	25.000
Grupo termoeléctrico a gas	40 kVA	80.000	10.000	35.000
baterías plomo ácido	50 kW	20.000	—	0,00
Baterías ion – litio	80 kW	55.000	—	0,00
Batería de flujo	20 kW	280.000	7,45	0,00
Supercondensadores	30 kW	90.000	—	0,00

La figura 5.2 muestra la cantidad de energía que aporta cada uno de los generadores en porcentaje (%) para solventar la demanda, con el menor costo (kWh) de operación obtenido en la tabla 5.9.

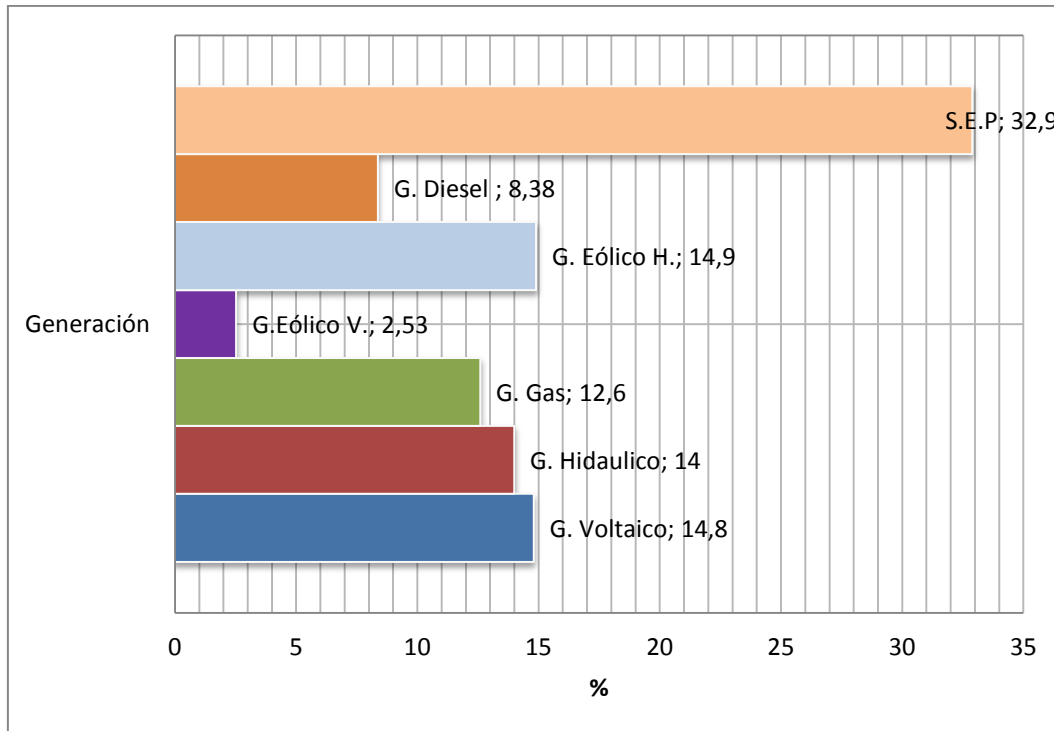


Figura 5.2 Aporte de las diferentes tecnologías de generación en modo conectada a la red

Finalmente la tabla 5.11, muestra la cantidad de elementos nocivos que se eliminan del medio ambiente al año al conectar la microrred al SEP.

Tabla 5.11 Elementos nocivos ahorrados por la generación de la microrred conectada

Cantidad	Unidades (kg/yr)
Dióxido de carbono	160.066
Monóxido de carbono	209
Hidrocarburos incombustos	23,1
Material particulado	15,7
Dióxido de azufre	472
Óxidos de nitrógeno	2.050

CAPÍTULO 6

6.1 Conclusiones

- El objetivo fue simular la microrred eléctrica que se implementó en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Este objetivo fue alcanzado con éxito, ya que se consiguió integrar los diferentes equipos que componen la microrred y simularlos conjuntamente, obteniendo parámetros estimativos como potencia activa, tensión y corriente.
- La energía de la red pública puede ser utilizada para cubrir la demanda o cargar las baterías de la microrred, pero el objetivo principal es asegurar el suministro de energía eléctrica a las cargas no controlables.
- El impacto de perder una sola fuente de generación después de un fallo o por condiciones climáticas no adecuadas, no es tan importante como la conexión o desconexión de varias fuentes de generación ya que esta última puede dar paso a que el sistema entre a un estado de emergencia.
- Los parámetros de entrada dependen de la hora del día, la estación del año y periodos vacacionales, por ello, para cada escenario la microrred se comportara de una manera diferente, evidenciando la gran dependencia de la naturaleza para un óptimo funcionamiento.
- Durante el día la potencia entregada por la microrred es mayor debido al funcionamiento de los paneles fotovoltaicos y decae por la noche cuando estos dejan de aportar. Esto se cumple siempre y cuando se tenga días soleados.
- La función principal de las baterías es ser un ente regulador que equipara la generación y la demanda, es decir, que cuando exista exceso de generación estas se cargan y cuando la carga aumente entregan energía a la microrred. Este comportamiento cíclico dependerá

de la demanda estimada, que cambiara de acuerdo al lugar y costumbre de los consumidores

- Si la microrred se opera como una entidad comercial es importante que se conecte a una red fuerte para que no exista ningún problema relacionado con la falta o exceso de energía y los valores de referencia (voltaje o de frecuencia), de tal manera que la eficiencia, robustez y confiabilidad del sistema aumenten.
- Las curvas de generación y demanda de la microrred se equilibran al conectarse al sistema eléctrico de potencia, sobre todo en los momentos de máxima demanda, esto permite mejorar la eficiencia de los equipos, almacenar los excesos de energía, brindar un servicio continuo y cargar el vehículo eléctrico.
- En base a los escenarios analizados en el capítulo 4, el peor escenario se presenta cuando la microrred trabaja de forma autónoma y los equipos de generación y almacenamiento no son capaces de cubrir la demanda.

6.2. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se propone un modelo que analice:

- Modificar la interfaz, de tal manera que se pueda simular la microrred en régimen dinámico, tomando en cuenta el análisis y resolución de fallas como cortocircuitos, etc.
- Diferentes técnicas de control para el deslastre de carga ante la falta de generación.
- Un algoritmo que permita una transición suave al momento de conectar y desconectar la microrred del sistema eléctrico de potencia.

Bibliografía

- [1] E. M. Hermitte, “Banco Mundial sobre el consumo eléctrico per cápita,” 2015. [Online]. Available: <http://www.oetec.org/nota.php?id=1166&area=1>. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [2] E. Santacana, T. Zucco, X. Feng, J. Pan, M. Mousavi, and L. Tang, “Tecnologías de transmisión y distribución, claves para la eficiencia energética,” *ABB*, vol. 2, pp. 1–8, 2007.
- [3] P. Basak, S. Chowdhury, S. Halder Nee Dey, and S. P. Chowdhury, “A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5545–5556, 2012.
- [4] N. Ardeshtna and B. H. Chowdhury, “Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation,” *IEEE*, pp. 1–8, 2010.
- [5] T. L. Vandoorn, B. Meersman, L. Degroote, B. Renders, and L. Vandeveldel, “A Control Strategy for Islanded Microgrids With DC-Link Voltage Control,” Belgium, 2011.
- [6] A. Fernández, “Microrredes, una posible revolución energética para los consumidores,” *EROSKI CONSUMER*, 2009. [Online]. Available: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/03/12/183966.php. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [7] T. Hughes, *Electrification in Western Society 1880-1930*. Baltimore and London: Networks of Power, 1993.
- [8] G. Dafermos *et al.*, “Conocimientos libres, energía distribuida y empoderamiento social para un cambio de matriz energética,” 01-Jun-2015. [Online]. Available: <http://book.floksociety.org/ec/2-4-energia-conocimientos-libres-y-empoderamiento-social-para-un-cambio-de-matriz-energetica/>. [Accessed: 12-Oct-2017].
- [9] M. Pedrasa and T. Spooner, “A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation,” *Proc. Aust. Univ. Power Eng. Conf. (AUPEC)*, no. August 2016, pp. 10–13, 2006.
- [10] D. M. Falcão, “Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid,” *IEEE*, p. 5.
- [11] M. Peláez and J. L. Espinoza, *Eficiencia energetica y ahorro de energia*

- en el Ecuador*, Primera. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2015.
- [12] C. F. Belda and E. U. Grande, “Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación,” *Univ. Pontif. Comillas*, p. 11.
- [13] FEDIT, “Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones,” España, 2011.
- [14] J. Alaminos *et al.*, “Aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales,” *Energía sin fronteras*, pp. 1–124, 2014.
- [15] T. Niknam, F. Golestaneh, and A. Malekpour, “Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind / photovoltaic / fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and self-adaptive gravitational search algorithm,” *ELSEVIER*, vol. 43, no. 1, pp. 427–437, 2012.
- [16] R. Kempener, P. Komor, and A. Hoke, “Smart Grids and renewables,” Colorado, 2013.
- [17] M. V. Herrera, “Descripción de redes inteligentes (Smart Grids) y su aplicación en los sistemas de distribución eléctrica,” Escuela Politécnica Nacional, 2013.
- [18] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, “Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems,” *ELSEVIER*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, 2011.
- [19] J. P. Fossati, “Memoria de trabajos de difusión científica y técnica.,” vol. 1, 2011.
- [20] G. Ackermann, Thomas Andersson and L. Söder, “Distributed Generation: A Definition,” in *Electric Power System Research*, 2011.
- [21] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, “Distributed Generation Interface to the CERTS microgrid,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1598–1608, 2009.
- [22] I. std 1547.4, “IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems,” New York, 2011.
- [23] L. Mariam, M. Basu, M. F. Conlon, L. Mariam, M. Basu, and M. F. Conlon, “A Review of Existing Microgrid Architectures, A Review of Existing Microgrid Architectures,” *J. Eng. J. Eng.*, vol. 2013, 2013, p. e937614, 2013.
- [24] R. Viral and D. K. Khatod, “Optimal Planning of Distributed Generation Systems,” 2012.
- [25] C. T. de la E. y del M. CETENMA, “Generación eléctrica distribuida,

- Potencial de electricidad fotovoltaica sobre cubiertas en Murcia,” Murcia, 2012.
- [26] M. Tolón and I. Tamara, *Operación y gestión de microrredes energeticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energetica y ambiental*. Barcelona, 2013.
- [27] J. Maragues and A. Rapallini, “Energía Eólica,” p. 20, 2003.
- [28] M. . Calle and J. E. Gómez, “Energías renovables-Hidroelectrica,” *Waste Magazine*. [Online]. Available: <http://waste.ideal.es/hidroelectrica.htm>. [Accessed: 14-Oct-2017].
- [29] J. Almandoz Berrondo and I. Mongelos Oquiñena, Maria Pellejero Salaberria, “Centrales Hidroelèctricas,” in *Apuntes de Màquines Hidràulicas*, E. U. P. U. E. Politeknikoa, Ed. Donostia- San Sebastián, 2007.
- [30] A. Keyhani and M. Marwali, *Smart Power Grids 2011*. Ohio State: Springer, 2011.
- [31] N. Xi. Santacruz, “Problema de Pre-despacho de unidades con representación de almacenamieto a base de baterías,” Universidad de chile, Santiago de Chile, 2014.
- [32] O. M. Micheloud and R. A. Vicini, *Smart Grids: Fundamentos, Tecnologías y Aplicaciones*, Cengage Le. 2012.
- [33] D. C. Washington, “The Hydrogen and Fuel Cell Technical Advisory Committee,” 2013.
- [34] D. Trebolle, “La Generación Distribuida en España,” Madrid, 2006.
- [35] T. M. de B. Institut d’Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC), UPC; SENER Ingeniería y Sistemas, S.A.; (TMB), “OPTIGEN: Regeneración de energía en sistemas de transporte.”
- [36] J. I. San Martín, I. Zamora, V. San Martín, J. Aperribay, and P. Eguía, “Energy Storage Technologies for Electric Applications,” 2011.
- [37] U. de Cantabria, “Regulacion, control y protección de máquinas eléctricas,” Santander.
- [38] F. H. Frutos, “Análisis de la influencia del vehículo eléctrico en la demanda eléctrica,” Madrid.
- [39] L. Corrales, “Sistema SCADA,” in *Interfaces de Comunicacion Industrial*, 2007.
- [40] D. P. Weranga, K. S. K Kumarawadu, Sisil Chandima, *Smart Metering Design and Applications*. 2014.
- [41] C. N. D. E. (CONELEC), “Plan de Electrificación 2013-2022,” Ecuador,

- 2013.
- [42] J. L. Espinoza, L. G. González, and R. Sempértegui, “Micro grid Laboratory as a Tool for the Investigation of Non-Conventional Energy Sources in Ecuador,” 2017.
 - [43] ARCONEL, “SISDAT -Sistematización de Datos del Sector Eléctrico.” [Online]. Available: [http://www.centrosur.gob.ec/sites/default/files/m%29Indicadores técnicos de la CENTROSUR - Feb_2015.pdf](http://www.centrosur.gob.ec/sites/default/files/m%29Indicadores_técnicos_de_la_CENTROSUR_-_Feb_2015.pdf).
 - [44] Aeolos, “Vertical Wind Turbine V 10kW,” London.
 - [45] H. Aeolos and H. Aeolos, “Aeolos - H 5KW,” London.
 - [46] S. H. Power, “Smart Free Stream Turbine,” p. 1, 2000.
 - [47] P. Piagi and R. H. Lasseter, “Autonomous control of microgrids,” 2006 *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, no. June, p. 8 pp., 2006.
 - [48] S.-J. Oh, C.-H. Yoo, I.-Y. Chung, and D.-J. Won, “Hardware-in-the-Loop Simulation of Distributed Intelligent Energy Management System for Microgrids,” *Energies*, vol. 6, no. 7, pp. 3263–3283, 2013.
 - [49] J. Jativa, G. Constante, and G. Cabrera, “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” 2014.
 - [50] G. Dudgeon and P. Brunelle, “Performing Power System Studies - YouTube,” 2015. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=SEb_kHuKVBo. [Accessed: 17-Oct-2017].
 - [51] P. Pérez, “Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial,” Universidad de Valladolid, 2017.
 - [52] P. L. Llamas, “Eficiencia Energética y Medio Ambiente,” p. 847, 2009.

ANEXOS

ANEXO A

Diagrama Unifilar del Laboratorio de la microrred de Balzay

A continuación se muestra el diagrama unifilar del Centro Científico y Tecnológico Balzay.

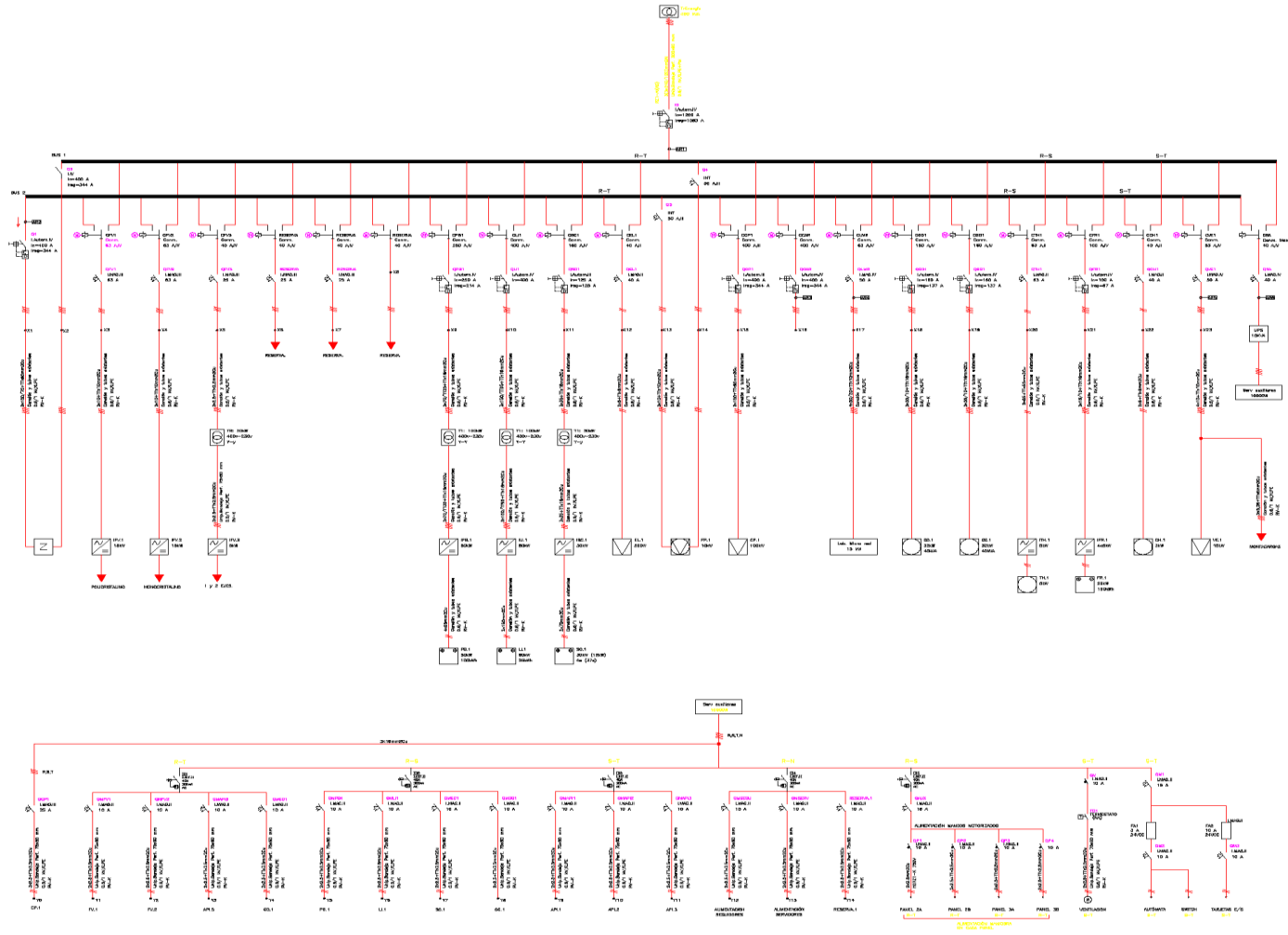


Figura A.1 Diagrama Unifilar

ANEXO B

Bloque de Irradiancia

La fórmula para obtener la potencia activa se obtiene a partir de la ecuación 3.3

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{A * P_{sol}} * 100$$

Dónde:

- A = Área del panel solar (cm^2)
- P_{sol} = Potencia luminosa del sol ($\frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}$)

El numerador se reemplaza por P_{\max} de la ecuación 3.2.

$$P_{\max} = I_{sc} * V_{oc} * FF$$

$$P_{\max} = \frac{A * P_{sol} * \eta}{100}$$

ANEXO C

Voltaje de fase

La fórmula para obtener el voltaje de fase a partir de los voltajes de línea es:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2 V_{bc})$$

Esta ecuación se obtiene a partir de:

$$\overrightarrow{V_{ab1}} = \frac{1}{3} * (\overrightarrow{V_{ab}} + a \overrightarrow{V_{bc}} + a^2 \overrightarrow{V_{ca}})$$

$$\overrightarrow{V_{bc1}} = a^2 \overrightarrow{V_{ab1}}$$

$$\overrightarrow{V_{ca1}} = a \overrightarrow{V_{ab1}}$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1x e^{j120} = 0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 = a^*$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = a^2 = 1 \angle 0^\circ$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

Realizando el cambio $V_{ca} = aV_{ab}$ tenemos:

$$V_{ab} = \frac{1}{3}(2V_{ab} + aV_{bc})$$

Luego se tiene que $a = -a^2 - 1$

$$V_{ab} = \frac{1}{3}(2V_{ab} - a^2 V_{bc} - V_{bc})$$

Se realiza el cambio $V_{ab} = aV_{bc}$ tenemos:

$$V_{ab} = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2 V_{bc} + aV_{bc} - V_{bc})$$

$$V_{ab} = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2 V_{bc} + V_{bc}(a - 1))$$

$$V_{ab} - \frac{1}{3}(V_{bc}(a-1)) = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

En la parte izquierda se realiza el cambio $V_{bc} = a^2V_{ab}$

$$V_{ab} - \frac{1}{3}(a^2V_{ab}(a-1)) = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

$$V_{ab}(1 - \frac{1}{3}a^2(a-1)) = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

El voltaje de fase sería entonces:

$$V_{an} * \sqrt{3}(1 - \frac{1}{3}a^2(a-1)) = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

Dónde:

$$W = \sqrt{3}(1 - \frac{1}{3}a^2(a-1))$$

$$V_{an} * W = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

$$\sqrt{3} - \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) * (a^3 - a^2)$$

$$\sqrt{3} - \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) * (1 - a^2)$$

$$\sqrt{3} = 1,73 \quad \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577$$

Reemplazando se tiene:

$$1,73 - 0,57 * (1 - 1\angle 240^\circ) = 1,73 - 0,57 + 0,57\angle 240^\circ$$

$$1,16 + 0,57\angle 240^\circ = 1,16 - 0,49j - 0,28$$

$$W = 0,875 - 0,49j = 1\angle -30^\circ$$

$$\dot{V}_L = \sqrt{3} |\dot{V}_F| e^{j(\theta+30^\circ)} = \sqrt{3} V_F\angle 30^\circ$$

Finalmente queda:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_{ab} - a^2V_{bc})$$

ANEXO D

A continuación, se muestran los distintos escenarios del capítulo 4 durante 24 horas.

D.1. Generación renovable disponible

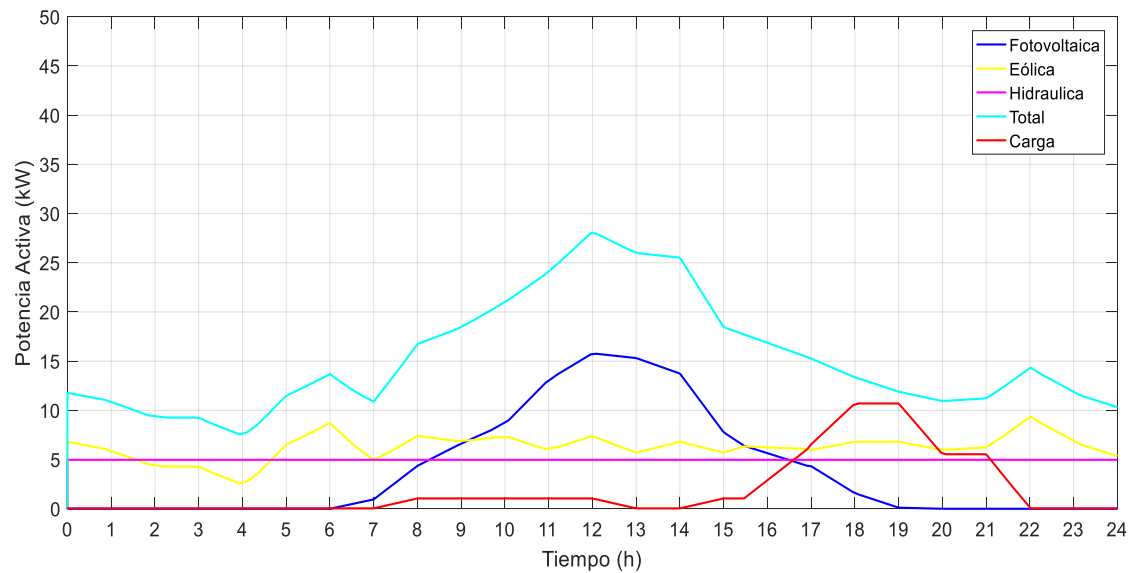


Figura D.1 Generación renovable disponible

D.2. Ausencia de energía fotovoltaica

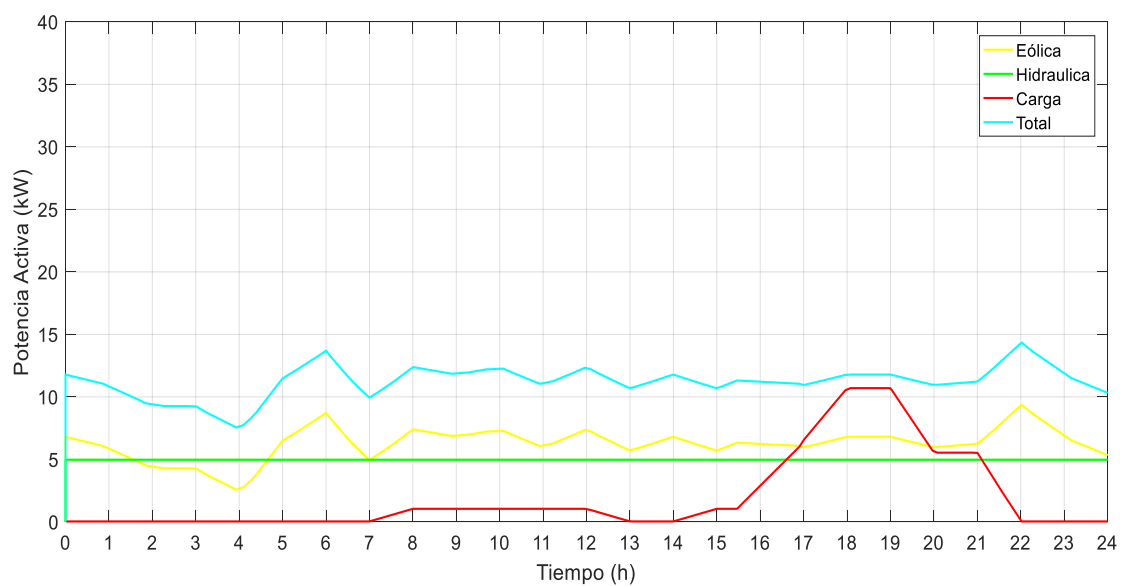


Figura D.2 Ausencia de energía fotovoltaica

D.3. Ausencia de energía eólica

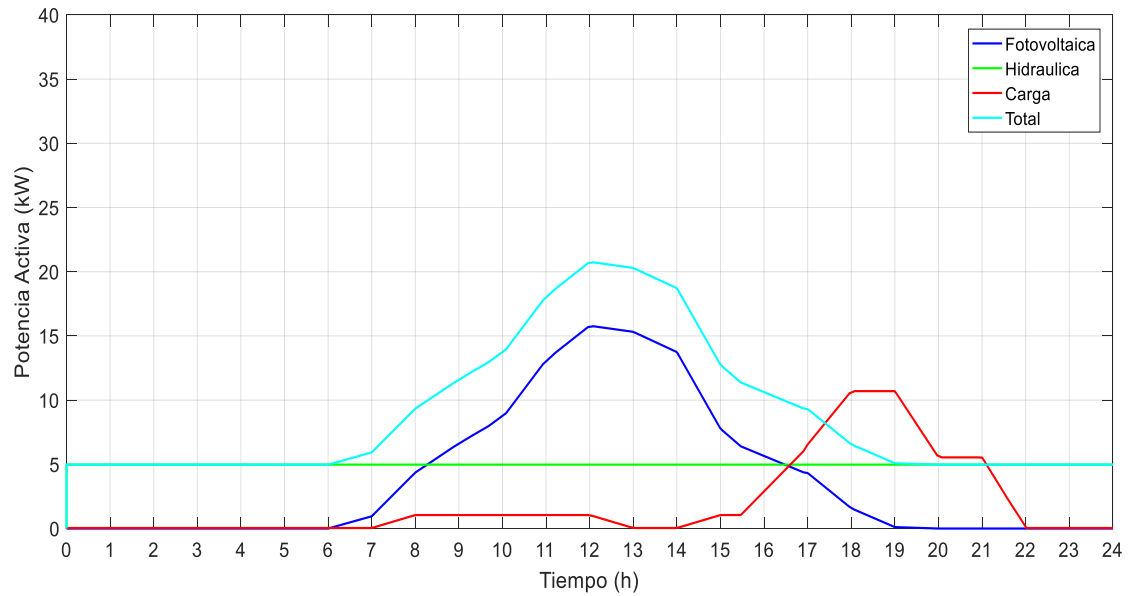


Figura D.3 Ausencia de energía eólica

D.4. Ausencia de energía hídrica

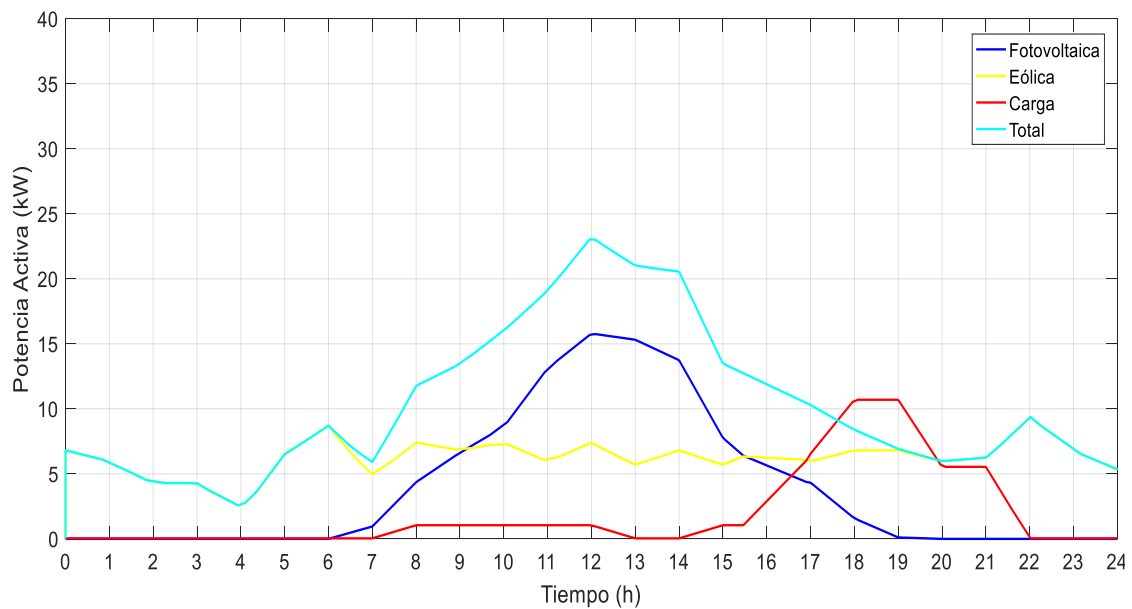


Figura D.4 Ausencia de energía hídrica

D.5. Ausencia de fuentes de generación

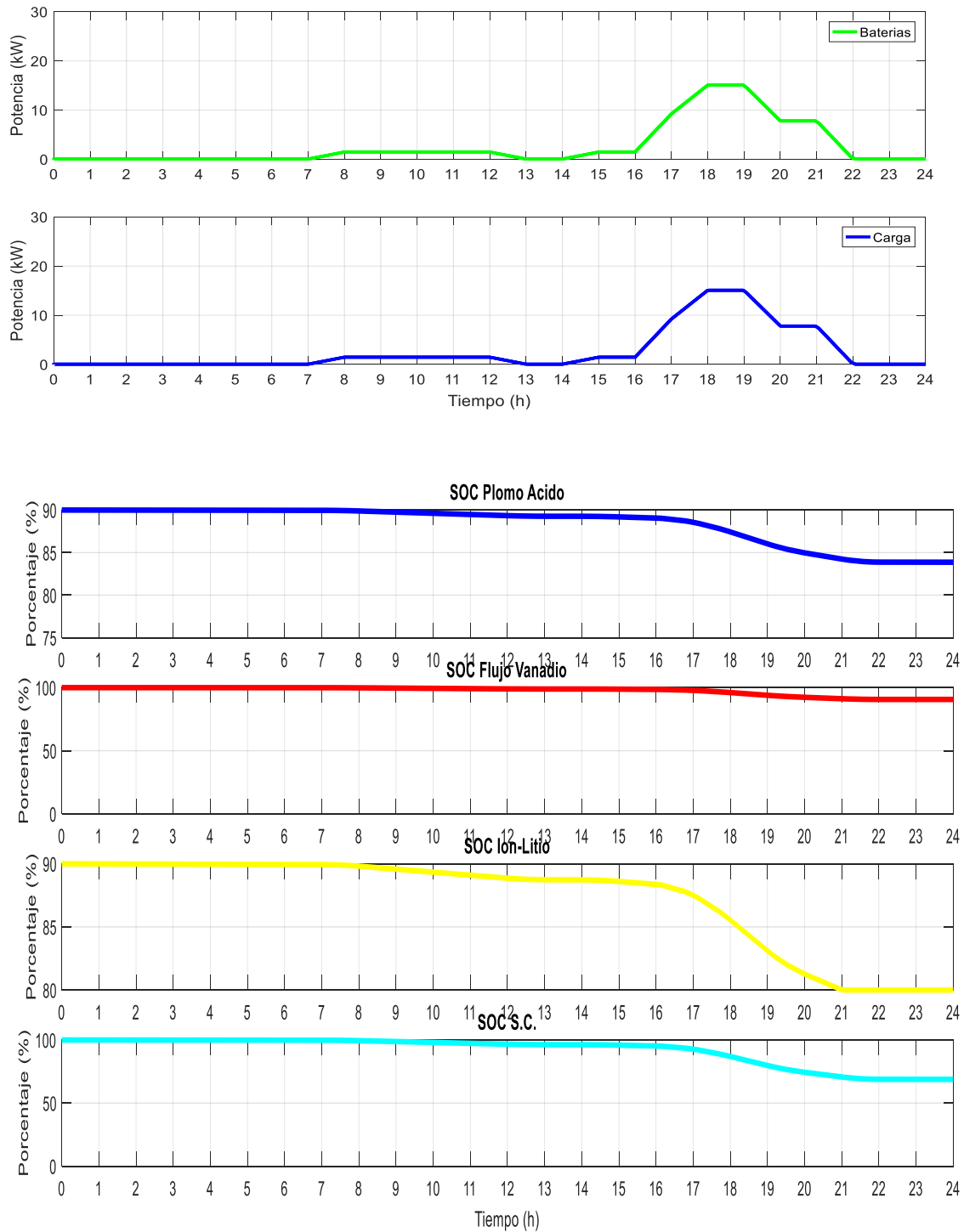


Figura D.5 Ausencia total de energías renovables







