



**Sistema de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes operando
en modo isla.**

Pinto Calispa, Bryan Alexander y Torres Taco, Luis Gonzalo

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

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

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario. PhD

10 de enero del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido



TESIS-MG-PINTO-TORRES.pdf

Scanned on: 19:51 January 10, 2023 UTC



	Word count
Identical	89
Minor Changes	5
Paraphrased	985
Omitted	1240

jacqueline pinto
050252703-9



Departamento de Eléctrica y Electrónica
Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación “Sistema de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes operando en modo isla”. Fue realizado por los señores Pinto Calispa, Bryan Alexander y Torres Taco, Luis Gonzalo; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 10 de enero de 2023

Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario Ph.D. (c)

C.C.: 0502527039

DIRECTORA DEL PROYECTO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, Pinto Calispa, Bryan Alexander y Torres Taco, Luis Gonzalo, con cédulas de ciudadanía 1723406912 y 1725134108 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Sistema de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes operando en modo isla". Es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 10 de enero del 2023

Pinto Calispa, Bryan Alexander

C.C.: 1723406912

Torres Taco, Luis Gonzalo

C.C.:1725134108



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros, Pinto Calispa, Bryan Alexander y Torres Taco, Luis Gonzalo, con cédulas de ciudadanía 1723406912 y 1725134108, autorizamos a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Sistema de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes operando en modo isla" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 10 de enero del 2023

Pinto Calispa, Bryan Alexander

C.C.: 1723406912

Torres Taco, Luis Gonzalo

C.C.:1725134108

Dedicatoria

El presente trabajo escrito es el resultado de una larga etapa universitaria, el sacrificio, el tiempo, logros y fracasos se lo dedico en primer lugar a Dios, por darme la fe y fuerzas para llegar a la etapa final y cumplir unos de mis sueños más anhelados. A mis padres, Efraín Pinto y María Calispa, que no me alcanzara la vida para agradecerles y demostrarles el inmenso amor que les tengo, por todo el sacrificio que han hecho para verme surgir, cada logro, alegría y lágrimas se la dedico a ustedes. A mi esposa Yadira Morales, por ser un apoyo incondicional desde mi adolescencia, por apoyarme en cada etapa de mi vida universitaria y darme buenos consejos en tiempos difíciles, muchas gracias amor. A mis hermanos, Mario, Doris y Diego, quienes han sido mi apoyo fundamental en esta etapa de mi vida, sin ustedes nada de esto sería posible.

Pinto Calispa Bryan

Dedicatoria

En primer lugar, le dedico a Dios por brindarme la sabiduría para poder sobrellevar todos los problemas y brindarme salud para poder culminar esta etapa de mi vida.

Con cariño este trabajo de titulación se lo dedico a mis padres Gonzalo y Piedad, que con su amor, trabajo y dedicación son un pilar fundamental en toda mi vida.

A mis hermanas Cynthia y Melissa quienes son mis compañeras y siempre me apoyaron para poder alcanzar mis metas. A mi abuelito que siempre me brindo su cariño. A mis tíos, primos y demás familiares que de alguna forma me apoyaron en este proceso y a mis amigos que junto con ellos supimos sobrellevar y alcanzar nuestro objetivo.

Torres Taco Luis

Agradecimiento

Siempre agradecido con mi Dios, por bendecirme cada día y darme la salud y energías de levantarme cada mañana para alcanzar un nuevo objetivo, para ser un mejor profesional, mejor persona, mejor ser humano.

A toda mi familia, en especial a mis padres y hermanos, que siempre se preocuparon y creyeron en mí, Dios les pague.

A mi amigo y compañero de trabajo de titulación, Luis Torres, por su persistencia y gallardía para llevar a cabo este proyecto de investigación, que hoy en día está reflejado en este escrito.

A mi tutora de tesis Ing. Jacqueline Llanos PhD., por haber compartido todos sus conocimientos con nosotros y guiarnos en cada proceso y a su esposo el Ing. Diego Ortiz PhD., que gracias a su intelecto y sabios consejos permitieron que este tema se desarrolle satisfactoriamente, son unos excelentes profesionales y tutores a quienes estoy inmensamente agradecido.

A mis grandes amigos y compañeros de clase Henry, Bryan, Luis, John, Roberto, José y Jessi, que junto a ellos viví una etapa universitaria increíble e inolvidable.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a mi querida universidad, a quien se convirtió en mi segundo hogar en Latacunga, por forjarme y prepararme con los mejores docentes, haciéndome sentir parte de esta gran familia politécnica.

Pinto Calispa Bryan

Agradecimiento

Primero quiero agradecer a Dios por brindarme salud y empuje para poder cumplir una meta más en mi vida profesional.

A mis padres Gonzalo Torres y Piedad Taco que son mi ejemplo de trabajo, perseverancia, honestidad, respeto y me enseñan que lo más importante es la familia, es por ello que de manera especial les quiero agradecer por todos los sacrificios que hicieron para que juntos logremos alcanzar esta meta. A mis hermanas Cynthia y Melissa que me apoyaron en todo este proceso y espero que ellas también puedan cumplir sus metas.

A mi compañero y amigo de tesis Bryan Pinto, por su dedicación y esfuerzo para poder concluir este proyecto con satisfacción.

A los todos los docentes que tuve el agrado de conocer durante mi vida universitaria, de forma especial a la Dra. Jacqueline Llanos, tutora de este proyecto, gracias por su paciencia y consejos con los cuales nos supo guiar desde el primer momento para poder sacar adelante este trabajo, además de ser un ejemplo de superación y a su esposo el Dr. Diego Ortiz que nos ayudó con consejos para darnos otro enfoque del desarrollo de este tema y poder culminarlo satisfactoriamente.

A mis amigos John, Roberto, Bryan, José, Jessi, Henry y demás compañeros de la universidad con quienes compartimos tantos momentos buenos y malos llenos de anécdotas que hicieron llevadera esta etapa.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas, que supo acogerme durante esta etapa de mi vida y de la cual me llevo grandiosos recuerdos de experiencias que me ayudaron a formar mi carácter.

Torres Taco Luis

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de auditoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenidos	10
Índice de figuras	15
Índice de tablas	17
Nomenclatura	18
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I: Problemática.....	21
Antecedentes.....	21
Planteamiento del problema	25
Justificación e Importancia.....	27
Objetivos	28
Objetivo General.....	28

<i>Objetivos específicos</i>	29
Capítulo II: Estado del arte	30
Recurso energético mundial.....	30
Recurso energético en el Ecuador.....	31
Generación de energía en Ecuador	31
Disponibilidad de energías renovables en el Ecuador.....	32
Centrales con fuente de energía renovable.....	33
Microrredes.....	33
<i>Jerarquías de control para una microrred</i>	34
<i>Características de una microrred</i>	35
<i>Objetivos de una microrred</i>	36
Sistema de gestión de energía para una microrred (EMS)	36
<i>Generación fotovoltaica</i>	37
<i>Generación eólica</i>	39
<i>Generación hídrica</i>	40
<i>Sistema de generación a Diesel (GDS)</i>	43
<i>Sistema de Generación a Gas (GGS)</i>	44
<i>Sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS)</i>	45
Modos de operación de la microrred.....	45
<i>Microrred aislada</i>	46
<i>Microrred conectada a la red</i>	46

	12
Marco Regulatorio en el Ecuador.....	46
Regulación Nro. ARCERNR 002/2021	46
Estudios Relacionados.....	47
Capítulo III: Metodología	49
Modelamiento de las microrredes participantes.....	50
Identificación de las microrredes aisladas	51
Diseño del sistema de gestión óptima de la energía EMS supervisorio.....	51
<i>Parámetros de entrada</i>	<i>52</i>
<i>Función objetivo.....</i>	<i>53</i>
<i>Ecuación de balance.....</i>	<i>53</i>
<i>Restricciones</i>	<i>53</i>
Evaluación del alcance.....	54
<i>Análisis de operación antes del EMS supervisorio</i>	<i>54</i>
<i>Análisis de operación después del EMS supervisorio</i>	<i>55</i>
<i>Análisis de complementariedad y flujos de potencia</i>	<i>56</i>
Capítulo IV: Desarrollo de la propuesta.....	57
Diseño de los sistemas de gestión EMS locales.....	57
Diseño de fuentes de generación y perfiles de carga	57
Recurso Renovable.....	58
Recurso Solar	58
Recurso eólico en la microrred 1	59

Recurso hídrico en la microrred 2	60
Diseño y elementos de las microrredes.....	60
<i>Componentes de la microrred 1</i>	<i>60</i>
<i>Diseño del EMS local para la microrred 1</i>	<i>65</i>
<i>Componentes de la microrred 2</i>	<i>67</i>
<i>Diseño del EMS local para la microrred 2</i>	<i>72</i>
<i>Componentes de la microrred 3</i>	<i>74</i>
<i>Diseño del EMS local para la microrred 3</i>	<i>78</i>
Diseño del sistema de gestión EMS supervisorio.	80
<i>Entradas y salidas del EMS supervisorio.....</i>	<i>83</i>
<i>Planteamiento de la función objetivo</i>	<i>84</i>
<i>Planteamiento de la ecuación de balance.....</i>	<i>85</i>
<i>Restricciones</i>	<i>86</i>
Flujos de potencia para la coordinación de microrredes	88
<i>Ecuaciones de balance.....</i>	<i>89</i>
<i>Restricciones de flujo</i>	<i>91</i>
Capítulo V: Análisis de resultados	93
Resultados de operación de las microrredes operando en modo isla.	93
<i>Operación microrred 1</i>	<i>93</i>
<i>Operación microrred 2.....</i>	<i>96</i>
<i>Operación microrred 3.....</i>	<i>99</i>

Resultados de operación con la implementación del EMS supervisorio	102
<i>Cambios de operación en la microrred 3</i>	<i>103</i>
Resultados de flujos de potencia.....	106
Resultados con restricción de flujos de potencia	107
Costos de operación.....	109
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	112
Conclusiones	112
Recomendaciones	114
Bibliografía	115
Anexos	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Producción energética del Ecuador al 2022</i>	32
Figura 2 <i>Gráfica típica de la radiación global</i>	38
Figura 3 <i>Imagen detallada del Atlas Solar Mundial</i>	39
Figura 4 <i>Sistema de Información Fotovoltaica (PVGIS)</i>	40
Figura 5 <i>Ciclo para la obtención de energía eléctrica a partir de la energía hídrica</i>	41
Figura 6 <i>Esquema de una central térmica de ciclo combinado</i>	44
Figura 7 <i>Diagrama metodológico general</i>	49
Figura 8 <i>Diagrama metodológico para el modelamiento de los EMS locales</i>	50
Figura 9 <i>Diagrama metodológico para el modelamiento del EMS supervisorio</i>	52
Figura 10 <i>Diagrama metodológico para el análisis de resultados y evaluación del alcance</i>	54
Figura 11 <i>Sistema de información geográfica fotovoltaico</i>	59
Figura 12 <i>Global Win Atlas</i>	60
Figura 13 <i>Componentes de la microrred 1</i>	61
Figura 14 <i>Datos de irradiancia microrred 1</i>	61
Figura 15 <i>Datos velocidad del viento microrred 1</i>	63
Figura 16 <i>Datos demanda en la microrred 1</i>	64
Figura 17 <i>Componentes de la microrred 2</i>	68
Figura 18 <i>Datos irradiancia microrred 2</i>	68
Figura 19 <i>Datos de caudal correspondiente a la microrred 2</i>	70
Figura 20 <i>Datos de demanda correspondiente a la microrred 2</i>	71

Figura 21 Componentes de la microrred 3.....	74
Figura 22 Datos de irradiancia de la microrred 3.....	75
Figura 23 Datos de demanda en la microrred 3.....	77
Figura 24 Estructura gráfica de la coordinación de microrredes	82
Figura 25 Entradas y salidas del EMS supervisorio.....	84
Figura 26 Coordinación de las microrredes y dirección de flujos de potencia	89
Figura 27 Abastecimiento energético de la MG 1 operando en modo isla.....	94
Figura 28 Vertimiento energético de la MG 1 operando en modo isla.	95
Figura 29 Comportamiento de la batería de la MG 1 operando en modo isla.	96
Figura 30 Abastecimiento energético de la MG 2 operando en modo isla.....	97
Figura 31 Vertimiento energético de la MG 2 operando en modo isla.	98
Figura 32 Comportamiento de la batería de la MG 2 operando en modo isla.	99
Figura 33 Abastecimiento energético de la MG 3 operando en modo isla.....	100
Figura 34 Vertimiento energético de la MG 3 operando en modo isla.	101
Figura 35 Comportamiento de la batería de la MG 3 operando en modo isla.	102
Figura 36 Abastecimiento energético de la MG 3 operando en coordinación.....	103
Figura 37 Vertimiento energético de la MG 3 operando en coordinación.	104
Figura 38 Comportamiento de la batería en la MG 3 operando en coordinación.	105
Figura 39 Resultados de flujos de potencia para la coordinación de microrredes.....	107
Figura 40 Abastecimiento energético de la MG 3 con restricción de flujos de potencia.....	108
Figura 41 Resultados con restricción de los flujos de potencia.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Trabajos de investigación acerca de coordinación de microrredes</i>	23
Tabla 2 <i>Trabajos de investigación acerca de sistemas de gestión de energía en microrredes</i> . 24	
Tabla 3 <i>Fuentes de energía renovables en el Ecuador al año 2018</i>	33
Tabla 4 <i>Clasificación de Hidroeléctricas</i>	42
Tabla 5 <i>Casos de operación de las microrredes</i>	81
Tabla 6 <i>Costo de operación de forma aislada</i>	110
Tabla 7 <i>Costo de operación de forma coordinada</i>	110
Tabla 8 <i>Costo de operación con restricción de flujos</i>	111

Nomenclatura

GD: Generación Distribuida

MG: Microrred (Microgrid)

EMS: Sistema de gestión de la energía (Energy Management System)

RES: Energías Renovables (Renewable Energy Sources)

DER: Recursos Energéticos Distribuidos

BESS: Sistemas de almacenamiento de energía por baterías

SNI: Sistema nacional interconectado.

ZNI: Zonas no Interconectadas

ZI: Zonas Interconectadas

IEA: International Energy Agency

PVGIS: Sistema de Información Fotovoltaica

PCH: Pequeña Central Hidroeléctrica

CH: Central Hidroeléctrica

GLP: Gas licuado de petróleo

GDS: Sistema de generación a diesel

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

ENS: Energía no suministrada (Energy Not Served)

Resumen

En el presente trabajo se desarrolla un sistema de gestión óptima de la energía EMS mediante el cual se permitirá la coordinación de varias microrredes que se encuentren operando fuera de la red. El diseño será aplicable a MG que por lo general están ubicadas en localidades rurales o remotas, donde aún existen limitaciones al acceso de energía, y que a su vez cuentan con recursos que podrían ser utilizados para generar electricidad a partir de fuentes de energías renovables. El proyecto consta de tres microrredes que están operando independientemente, cada una de ellas está constituida por DER (Recursos energéticos distribuidos) y unidades BESS (Sistema de almacenamiento controlado), dentro cada microrred se diseña previamente un EMS local, lo cual garantiza el buen funcionamiento y optimización de sus recursos.

Posteriormente se desarrolla el EMS supervisorio, el cual recibe la información de los EMS locales de cada MG como: abastecimiento energético, energía no suministrada o suministrada por fuentes no renovables y el vertimiento de cada microrred, logrando a la salida puntos de ajuste y acciones de control para las unidades despachables, lo cual busca minimizar el costo operativo de las microrredes, minimizar en lo posible los costos que implican la puesta en marcha y parada de los generadores a base de combustibles fósiles. La metodología propuesta fue validada mediante la aplicación en tres microrredes que constan con diferentes fuentes de energía, los resultados indican que al aplicar este sistema de interconexión se minimiza el uso de fuentes de energía no renovable, disminuye los costos de operación y reduce la energía no suministrada principalmente en lugares de difícil acceso. Además, se ejecuta los flujos de potencia correspondientes a la interconexión de las tres microrredes, validando una vez más la correcta coordinación y ejecución del EMS supervisorio, es así que se logra obtener una nueva perspectiva del funcionamiento más apegada a la realidad.

Palabras clave: microrredes aisladas, sistema de gestión óptima de la energía,

EMS supervisorio, flujos de potencia, coordinación e interconexión.

Abstract

This paper develops an optimal EMS energy management system that will allow the coordination of several microgrids operating off-grid. The design will be applicable to MGs that are generally located in rural or remote locations, where there are still limitations to energy access, and which in turn have resources that could be used to generate electricity from renewable energy sources. The project consists of three microgrids that are operating independently, each of them is constituted by DER (Distributed Energy Resources) and BESS (Controlled Storage System) units, within each microgrid a local EMS is previously designed, which guarantees the proper functioning and optimization of its resources. Subsequently, the supervisory EMS is developed, which receives information from the local EMS of each MG such as: energy supply, energy not supplied or supplied by non-renewable sources and the discharge of each microgrid, achieving at the output set points and control actions for the dispatchable units, which seeks to minimize the operating cost of the microgrids, minimizing as much as possible the costs involved in the start-up and shutdown of fossil fuel-based generators. The proposed methodology was validated through the application in three microgrids with different energy sources. The results indicate that the application of this interconnection system minimizes the use of non-renewable energy sources, reduces operating costs and reduces the energy not supplied, mainly in places of difficult access. In addition, the power flows corresponding to the interconnection of the three microgrids are executed, validating once again the correct coordination and execution of the supervisory EMS, this is how it is possible to obtain a new perspective of the operation more attached to reality.

Keywords: isolated microgrids, optimal energy management system,

Supervisory EMS, power flows, coordination and interconnection.

Capítulo I

Problemática

Antecedentes

El incremento poblacional no cesa en todo el mundo y con ello el desafío de abastecer el consumo eléctrico que acarrea algunos problemas ambientales, ante esta situación se exige el uso de nuevas fuentes de energía que se adapten a reducir las emisiones de carbono, es por ello que algunos países firmaron el acuerdo de París en donde se comprometen a reducir de sus emisiones de efecto invernadero (Gallagher, 2016). Además, la demanda de energía eléctrica aumenta en forma paralela al aumento de la población, incluso en áreas remotas en donde no existe infraestructura para brindar el servicio de energía eléctrica. En 2018, cercanos a 860 millones de individuos no tenían acceso a la electricidad. Es por ello que hoy en día se exponen soluciones eficientes para suministrar energía y respetuosos con el medio ambiente (Maurilio. R, 2021).

La capacidad de producción de energía renovable instalada tiene una tendencia creciente en los últimos años en varios países del mundo, teniendo como principales fuentes de energía a el sol y el viento. Muchos gobiernos han presentado iniciativas, por ejemplo, Alemania con un objetivo del 50% de compartir renovables para 2030, California y Estados Unidos con el objetivo de abastecer el 33% de su demanda minorista de energía mediante fuentes renovables (Olivares, 2014). En cuanto a la capacidad de energía renovable por habitante, Islandia es el líder mundial, seguida de Dinamarca y Suecia (H. Murdock, 2020).

Ecuador es parte del acuerdo regional sobre el acceso a la información, participación pública y acceso a la justicia en asuntos ambientales en América Latina y el Caribe conocido como el acuerdo de ESCAZÚ ante la Naciones Unidas. Esta acción ratifica el compromiso que

tiene el gobierno para impulsar la implementación de nuevas tecnologías en beneficio del medio ambiente (Ministerio del Ambiente, 2020).

Las microrredes prácticamente fueron implementadas a partir de la necesidad de acoplar fuentes de generación con energía primaria diferente que por lo general son de baja potencia, es por eso que se utilizan para suministro de energía local. Estas pueden estar conectadas a la red o pueden operar en forma aislada. (Lopes & Madureira, 2006).

Según (Mahmood, Michaelson, & Jiang, 2015) cuando una microrred se encuentre instalada en modo aislado, para esto se requiere el uso de baterías, para poder suplir la demanda en el tiempo que sea requerida y poder mantener un equilibrio entre la generación y la carga, así como ayudar a mantener estables las fuentes renovables de energía (RES) para el funcionamiento adecuado de la microrred en modo isla, es necesario disponer de una fuente que regule la frecuencia y el voltaje es decir que actúe como la red (Vandoorn, Vasquez, Kooning, & Guerrero, 2013).

Es fundamental precisar de una arquitectura de verificación para coordinar el funcionamiento de las diferentes fuentes de energía, está también permite conocer cuanta es la potencia generada, la capacidad de almacenamiento y la demanda de la carga, con la información se puede realizar toma decisiones de operación y coordinación según el tiempo del día en el que se encuentre.

La coordinación de múltiples microrredes, se da con el objetivo de organizarlas como agentes independientes pero que pueden tener comunicación entre ellas para poder abastecer su demanda interna y colaborar a suplir la demanda de una microrred vecina o abastecerse de energía cedida por una microrred vecina (Dagdougui & Sacile, 2014).

Existen formas de gestión una microrred o la interconexión entre ellas: gestión centralizada, descentralizada y distribuida (J. Llanos, 2013). Los enfoques centralizados son los más adecuados para microrredes aisladas con equilibrios críticos, oferta y demanda e infraestructura fija, mientras que las microrredes conectadas a la red se utiliza un enfoque descentralizado al tener múltiples propietarios y un número de unidades DER que cambia rápidamente (Olivares, 2014). En un enfoque distribuido, muestran un buen desempeño en las microrredes aisladas, pero requieren de un buen ancho de banda para las comunicaciones (Llanos, Olivares, Simpson, Kazerani, & Sáenz, 2019).

Tabla 1

Trabajos de investigación acerca de coordinación de microrredes.

Tema	Discusión	Referencia
Hierarchical Coordination of a Community Microgrid with AC and DC Microgrids.	Planteamiento de una microrred comunitaria con múltiples microrredes de CA y CC operando como entidades autocontroladas de forma individual con requisitos de frecuencia y voltaje. Se expone una estrategia de coordinación jerárquica con coordinación primaria, secundaria y terciaria para la operación económica de una comunidad isleña.	(Che, Shahidehpour, Alabdulwahab, & Turki, 2015)
Economic Dispatch for Optimal Management of Isolated Microgrids	Desarrollo de un algoritmo para lograr el funcionamiento óptimo de una microrred, gestionado mediante un despacho económico que utiliza los perfiles de carga y generación de una microrred real operativa como entradas de la simulación. Logrando resultados bastante similares al funcionamiento real de una microrred.	(Llanos, Ortiz, Sáez, & Olivares, 2016)

Nota. En la tabla 1 se indican algunos trabajos de investigación más relevantes acerca de coordinación y despacho económico de microrredes aisladas de la red, donde se especifica el tema, la discusión del trabajo relacionado y su respectiva referencia bibliográfica.

Actualmente se han desarrollado varios proyectos y estudios acerca de las microrredes en modo isla y conectadas a la red, los cuales se van convirtiendo en bases fundamentales para nuevas investigaciones y el crecimiento de las MG a nivel mundial, es así que algunos trabajos de mayor influencia se muestran en la Tabla 1.

En la tabla 2 se encuentran algunos trabajos de investigación más recientes a favor de las microrredes operando en modo isla, para lo cual es preciso destacar el aporte de cada uno de los estudios para lograr un sistema de gestión de energía óptimo basado en fuentes de energías renovables, y enfocados a brindar un servicio energético de mejor calidad en zonas interconectadas.

Tabla 2

Trabajos de investigación acerca de sistemas de gestión de energía en microrredes.

<i>Tema</i>	<i>Discusión</i>	<i>Referencia</i>
Energy Management System Optimization in Islanded Microgrids.	Estudio mediante el cual se da a conocer un sistema de gestión de energía (EMS), visto desde el punto de vista de optimización para ser aprovechadas en microrredes aisladas de la red.	(Maurilio. R, 2021)
Sistema de gestión energética y regulación terciaria en arquitecturas de control jerárquico para microrredes aisladas	Estudio basado en una estructura de alto nivel y arquitectura de control jerárquico para microrredes. Un sistema de gestión energética dedicado a la asignación de recursos energéticos en cada intervalo de tiempo en función de los costos marginales de producción.	(Graells, 2015)

Nota. En la tabla 2 se indican algunos trabajos de investigación más relevantes acerca de sistemas de gestión de energía en microrredes aisladas de la red, donde se especifica el tema, la discusión del trabajo relacionado y su respectiva referencia bibliográfica.

La esencia de estos trabajos son el mejoramiento del servicio energético en zonas aisladas que en la mayoría de los casos son rurales en donde se hace uso aun de fuentes de energía a base de combustibles fósiles, lo cual le proporciona ciertas limitaciones a la hora de cubrir sus demandas.

Por otro lado, analizando los resultados de la tabla 2, aun no se evidencia propuestas de coordinación de varias microrredes operando en modo isla, es por ello que en este trabajo de tesis tendrá gran relevancia la metodología de un sistema de gestión de energía EMS.

Planteamiento del problema

(Vázquez, 2020). Menciona sobre la constante preocupación por el cambio climático a causa de la emanación de gases de efecto invernadero, esto ha provocado una búsqueda permanente de soluciones con el fin de mitigar las fuentes de energías tradicionales no limpias.

Dotar de energía eléctrica es un trabajo constante en el que se ve comprometida la humanidad, aun mas con el incremento poblacional (Chipantiza & Guaita, 2021). Para las empresas eléctricas ha sido difícil dotar de energía eléctrica a lugares donde la accesibilidad hacia dichos lugares, los cuales representan un problema considerable y de gran interés para grupos de investigación (Rodriguez, 2020).

Según (Chica & Guamán, 2017) es alta la dificultad a la que se enfrentan las empresas de distribución en el afán de tratar de cubrir la mayor parte de la demanda en zonas rurales y este problema es aún más palpable en países subdesarrollados o en vías de desarrollo.

Las microrredes van ganando espacio en países de primer mundo y traen consigo avances tecnológicos y grandes ventajas para los sistemas de distribución. En el Ecuador actualmente no se ha implementado una microrred, pero se espera que para la década entrante estas tecnologías sean adoptadas apropiadamente y para ello se necesita de investigaciones que validen su fiabilidad. (Maurilio. R, 2021).

En base a lo anterior, surgen varias incógnitas que requieren un interés de carácter investigativo y para ello se destacan las ideas principales que dan lugar al siguiente problema planteado:

Dado el caso de implementación de dos o más microrredes con un principio de operación aisladas de la red, ¿Qué metodología se puede proponer o cual estrategia se puede realizar para lograr agrupar estas microrredes y hacer que las mismas trabajen coordinadamente?, además nace la incertidumbre sobre que variables se deberían tener en cuenta para realizar una coordinación de microrredes aisladas, encontrar un sistema que sea lo suficientemente óptimo posible con el fin de gestionar la energía de este conjunto de microrredes. Para dar una idea más clara de la problemática, se plantean las siguientes situaciones específicas.

Otra problemática es que actualmente las microrredes estarán operando y suministrando energía independientemente a sus cargas, pero llegara un determinado momento en que alguna de ellas comience a experimentar una mayor demanda a la cual no la va a poder cubrir, mientras que por otro lado habrá alguna microrred que cuente con exceso de energía o la tenga almacenada en un banco de baterías, entonces por medio de una coordinación entre las microrredes se puede suplir esta problemática planteada.

Justificación e Importancia

Las microrredes están ganando espacio e importancia de investigación en la última década, según (Köbrich, 2020) estas son una alternativa prometedora que servirán de gran ayuda a cubrir la creciente demanda de energía de manera limpia y sostenible.

Es así que se plantea el concepto de microrred como una posible solución energética para las zonas no interconectadas o aisladas de la red, con lo cual se puede reducir el impacto ambiental y minimizar la emanación de gases en la generación de energía, mediante el aprovechamiento de los recursos naturales propios de las zonas, como pueden ser; recurso eólico, hídrico, radiación solar y biomasa (Gaviria & Gómez, 2018).

Actualmente las redes de distribución eléctrica se encuentran operando en algunos casos a su máxima capacidad y deben estar frecuentemente realizando adaptaciones en su sistema para hacer frente a problemas medioambientales, esto ocurre con mayor probabilidad en las zonas rurales o de difícil acceso (Bordons, Félix, & Valverde, 2015). Esto se puede mitigar mediante la efectiva integración de las microrredes y para ello se necesita de un alto impacto investigativo y desarrollo de metodologías que validen su confianza y sostenibilidad.

Para mejorar la entrega de energía eléctrica y llegar a tener un servicio energético eficiente en el presente trabajo se plantea una metodología de gestión de microrredes operando de forma coordinada. Teniendo en cuenta que la forma de gestionar las microrredes es centralizada, adecuada para microrredes aisladas donde se requiere un funcionamiento seguro y económicamente viable (Llanos, Ortiz, Sáez, & Olivares, 2016).

Actualmente en las últimas investigaciones se encuentran metodologías de control, coordinación y sistemas de gestión de energía aplicadas únicamente para una microrred, pero en el presente trabajo se propone una alternativa que va más allá, y esta se enfoca en asociar a varias microrredes las cuales inicialmente estaban operando independientemente aisladas de

la red. Además, para el desarrollo de la propuesta se hace uso del Software FICO Xpress, el cual es un solucionador de modelos de optimización, que permite realizar un programa flexible al momento de diseñar un sistema de gestión de energía óptimo y que permita coordinar varias microrredes desde un EMS supervisorio.

El presente tema de investigación tiene gran relevancia para el desarrollo e implementación de las microrredes, ya que es la nueva tendencia de generación energética que se está desarrollando actualmente a nivel mundial y el Ecuador no está muy lejos de adoptar esta tecnología y de una posible implementación de microrredes y para cuando esto suceda se debe estar preparados bajo un sustento investigativo.

En el trabajo a desarrollar se plantean varias etapas a desarrollar, las cuales se presentan a continuación: Generar un sistema de gestión de energía (EMS) por cada microrred propuesta, luego se analiza el comportamiento y abastecimiento de energía de cada una de las microrredes consideradas, posteriormente se propone una estrategia o metodología más adecuada que permita la coordinación de este conjunto de microrredes, consiguiente a ello se puede plantear y diseñar un EMS supervisorio con enfoque centralizado basado en un esquema de control terciario, finalmente se analiza el comportamiento del conjunto de microrredes que se enlazaron y trabajan coordinadamente para apoyarse energéticamente.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema supervisorio de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes que estén operando en modo isla, con el fin de aprovechar la energía basada en recursos naturales disponibles.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica acerca de las metodologías que permitan desarrollar la coordinación de microrredes aisladas.
- Diseñar y evaluar un sistema de gestión óptima de la energía EMS para cada microrred a coordinar, que permita gestionar la operación segura, confiable y económica de cada microrred aislada.
- Proponer, diseñar y validar un sistema supervisorio basado en un problema de optimización que permita la coordinación de varias microrredes aisladas.
- Analizar la propuesta de operación coordinada de microrredes en comparación con las microrredes operando independientemente.

Capítulo II

Estado del arte

Recurso energético mundial

En general se especifica que un recurso energético, es cualquier materia capaz proporcionar energía en cualquiera de sus formas. La mayor parte de la energía del mundo proviene de la irradiación solar y gran parte de ella se puede utilizar directa o indirectamente, por ejemplo, la energía en: el viento, el agua, las olas (Martínez, 2017). El problema radica en la posesión de energía útil y el grado de dificultad para obtenerla, lo que lleva a diferentes valoraciones sobre fuentes energéticas disponibles, o dicho de otra manera no todos los recursos se pueden utilizar para obtener energía útil con la tecnología que contamos hasta el momento (Gaviria & Gómez, 2018).

En la actualidad la energía a nivel mundial está realizando cambios y las fuentes de energía renovables están desempeñando una función cada vez más importante para ayudar a los países a ejecutar sistemas energéticos más seguros modernos. La disminución de los costos de la energía limpia ayuda a realizar este cambio. Además, las redes inteligentes, los medidores bidireccionales, sistemas de datos geoespaciales, entre otros mecanismos, han ayudado a una mejor planificación energética. La adopción a gran escala de nuevas tecnologías que combinan la electrificación conectada a la red y sin conexión, también han contribuido resultados impresionantes para el acceso a la energía en otros lugares las microrredes que muestran resultados prometedores para cerrar las brechas de acceso a la misma. Además, los sistemas solares domésticos son más económicos y eficientes, por lo que son más asequibles en el sur de Asia y el África subsahariana, que son regiones con acceso limitado de energía (Banco Mundial, 2020).

La Agencia Internacional de Energía (IEA) informa que, en 2015 de la producción total de energía eléctrica mundial, el 68,5% provino de plantas de producción a base de combustibles fósiles. Las centrales hidroeléctricas aportan el 16%, el 10,6% provienen de fuentes nucleares, geotérmicas, solares, eólicas, mareomotriz y sumado a otras alcanza 4,9% y los biocombustibles, desechos entre otros son el 2,2% (International Energy Agency, 2017).

Recurso energético en el Ecuador

El suministro y consumo de energía en Ecuador cambia constantemente, como los cambios en el tipo de recurso que se utiliza. Esto se produce por la adopción de nuevas tecnologías, del crecimiento económico, avance de la conciencia ambiental del uso de la energía. Para entender estos cambios, se debe tener una planificación futura en el sector energético del país tomar decisiones correctas de política e inversiones en el sector eléctrico (Ministerio de Energías y Minas, 2021).

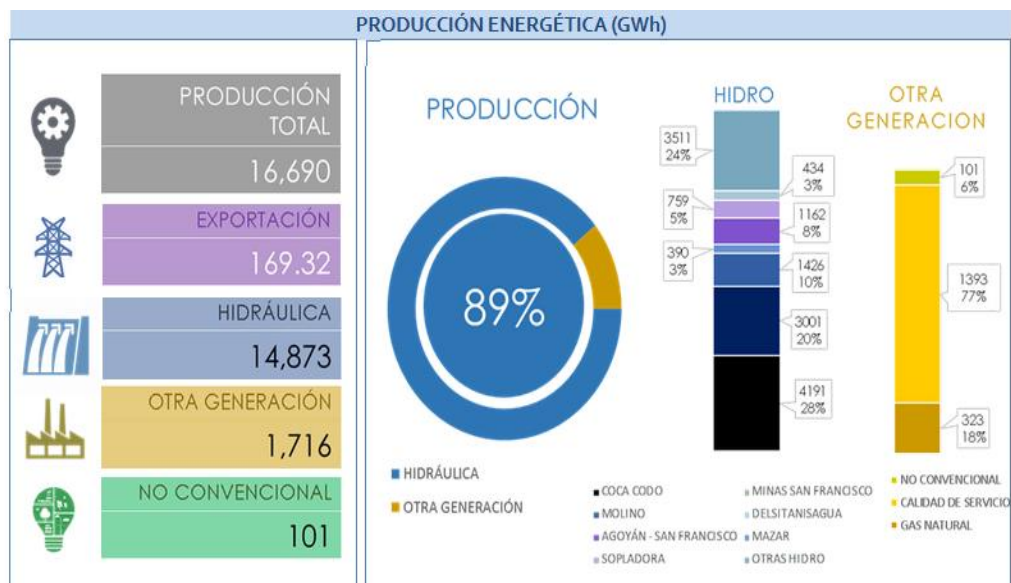
Generación de energía en Ecuador

La fuente de energía más productiva de Ecuador entre 2010 y 2020 es el petróleo. La producción de petróleo anual se mantiene con una media de 190 millones de barriles, con su máximo histórico en 2014, produciendo 203 millones de barriles.

Las fuentes de energía renovables en la producción de energía primaria tuvieron menor participación que la del gas natural y el petróleo. Pero está ha sufrido grandes avances entre 2010 y 2021, teniendo un crecimiento del 118% principalmente por la entrada en funcionamiento de céntricas hidroeléctricas, además de proyectos eólicos, entre otros (CENACE, 2022).

Figura 1

Producción energética del Ecuador al 2022



Nota. En la gráfica se observa que la generación hidráulica es la que prevalece dentro del Ecuador, seguida por el aporte de generación térmica y que el aporte de generación con energías renovables no convencionales es pequeña. Tomado de Centro Nacional de Control de Energía (CENACE, 2022).

Disponibilidad de energías renovables en el Ecuador

El Ministerio de Energía y Minas por medio del Plan Maestro de Electricidad y como ente rector del sector eléctrico, una de sus funciones es ampliar la producción de energía además de disminuir su dependencia del petróleo como fuente primaria básica, para realizar un cambio energético en el Ecuador. Con ello se dispone a impulsar proyectos que ayuden a fomentar una matriz energética basada en mayor porcentaje por energía renovable, concluyendo en una producción más limpia (Ministerio de Energías y Minas, 2021).

Centrales con fuente de energía renovable

Entre los tipos de energía renovable, las centrales hidroeléctricas tienen la mayor capacidad instalada (96,2 %) entre las de tipo renovable. Las plantas están instaladas en las tres regiones del Ecuador: la costa, la sierra y amazonia (ARCERNNR, 2020).

La Tabla 3 se muestra algunos tipos de centrales existentes.

Tabla 3

Fuentes de energía renovables en el Ecuador al año 2018

Tipo	Número de centrales Eléctricas	Potencia real (MW)
Hidráulica	71	5041
Biomasa	3	136.40
Eólica	3	21.15
Fotovoltaica	34	26.74
Biogás	2	6.50

Nota. En la tabla se muestra como prevalece la generación con fuentes de energía hidráulica, con 71 centrales en todo el país como principal fuente de generación energética renovable. Tomado de (ARCERNNR, 2020).

Microrredes

Según (Taha, Cagil, & Aladin, 2011), una microrred eléctrica permite la distribución bidireccional de generación eléctrica, permitiendo llegar la energía desde la unidad de generación hasta el consumidor, facilitando la integración de fuentes de energía renovables con el fin de ahorrar energía reducir costos y mejorar la confiabilidad.

Las microrredes son conocidas en varias partes del mundo con definiciones similares, la cual se asemeja mas es que son un conjunto de generadores pequeños: generación eólica, generación fotovoltaica, generador diésel, generador hidráulico, además de convertidores de energía de las olas, almacenamiento de energía como baterías y las cargas. También pueden contar con un sistema de control para la gestión de la energía y de la carga, sistemas de monitoreo y técnicas de mantenimiento preventivo.

Según (Ubilla, Jimenez, Hernandez, Reyes, & Hernandez, 2014). Las microrredes podrían estar conectadas a la red principal de un país con la probabilidad de vender energía o comprar según sea necesario. Pero también la microrred puede trabajar en modo isla, en la que el consumo y la generación son producidas en el área local. En este caso la problemática es saber gestionar los limitados recursos renovables y no renovables disponibles cercanas a los consumidores.

Jerarquías de control para una microrred

Según (Olivares, 2014) se tienen tres jerarquías para una microrred las cuales van desde el control interno, el sistema de gestión y el sistema de coordinación:

Control primario: Este tipo de control es básicamente conocido como un control base o interno, uno de sus propósitos es estar pendiente del voltaje, corriente y frecuencia de la MG, siendo así una respuesta inmediata o rápida.

Control secundario: Es gestionado por el Energy Management System (EMS) el cual es un sistema de gestión de la energía el cual es responsable de operar la microrred tomado como referencia costos, seguridad y confiabilidad para obtener una programación óptima para el estado de encendido o apagado de los generadores y sus maniobras para lograr la estabilidad de microrred.

Control terciario: Este es el nivel más alto, en el cual se coordinan varias microrredes interconectadas por medio de una comunicación entre los EMS de las diferentes microrredes esto permite una mayor fiabilidad del sistema, además del mejor aprovechamiento de los recursos y la reducción de costos de operación de los mismos.

Características de una microrred

Según (Medina, 2014), dentro de las características más importantes tenemos la autonomía, la calidad de la energía, la eficiencia, la compatibilidad y escalabilidad. Además de costos de recuperación, estándares de equipos como se detalla a continuación:

Oferta de regulación: Esta puede ser primaria, secundaria o de servicios complementarios de la red, al considerarse a cada microrred como una central tradicional o convencional, en el caso que se encuentre conectada a la red.

Autonomía: Al encontrarse las fuentes de energía cerca a los consumidores, están permiten abastecer de energía a sus cargas conectadas en su cobertura, en el periodo en que se encuentre operando en modo isla.

Calidad de energía: Las cargas conectadas a la microrred reciben una mayor disponibilidad y continuidad del servicio eléctrico, obteniendo como mínima la energía no suministrada.

Eficiencia: Al encontrarse las fuentes de energía cerca al consumo, se reduce las pérdidas por transmisión, se aprovecha al máximo las fuentes de energía disponibles, además se optimiza el uso de la red existente.

Costos: El tiempo de recuperación de la inversión de los sistemas, equipos y mano de obra que se utilizó para la implementación de estas microrredes, dependiendo del tipo de generación pueden ser altos debido a que la tecnología para la obtención de estas energías se

encuentra en desarrollo, por lo que para el incentivo del uso de estos equipos debe ser promovido por los Gobiernos.

Estándares de equipos: Al ser una tecnología en desarrollo, existen varias normas, formatos y requerimientos según la marca de equipos a utilizar por lo que se busca unificar los estándares de todos estos productos al encontrarse desarrollando avances en paralelo en diferentes centros de investigación en el mundo.

Objetivos de una microrred

Según (Medina, 2014), las MG es una solución para el manejo de la energía distribuida que está conectada a cargas locales, por lo que se debe tener etapas de diseño y planificación para obtener los resultados esperados y así cumplir las metas planteadas como son:

- Reducir costos de transmisión y generación, con altos parámetros de calidad.
- En caso de estar conectada a la red, definir los puntos óptimos en los que esta pueda ser un aporte a la misma.
- Con respecto al punto anterior se debe establecer normas contratos para la compra y venta de energía y de servicios complementarios de la red.
- Dimensionar y ubicar sistemas de almacenaje de energía.
- Responder a los cambios que se puedan presentar en el sistema

Sistema de gestión de energía para una microrred (EMS)

Las microrredes son principalmente de energía limpia y a un bajo costo al estar cerca la generación de la carga. Por ello es importante una gestión óptima de la energía al conocer que algunas de estas fuentes de energía son dependientes del recurso y este es variable en el transcurso del día como el solar que no está disponible en horarios nocturnos, mientras que el eólico funciona en estado estocástico, es decir de forma intermitente (Bordons, Félix, & Valverde, 2015).

El Sistema de Gestión de la Energía es necesario por los puntos tratados y en especial si se trata de un sistema que no está conectado a la red. Este programa trabaja con datos históricos de demanda y la capacidad de generación de las unidades, adicionando parámetros de restricción obteniendo el costo mínimo de operación, con el mayor aprovechamiento de recursos con costos cero (Saenz, 2015). Las funciones de los EMS son:

- Definir el voltaje y potencia de la MG
- Cubrir la demanda de las cargas.
- Reducir pérdidas en el sistema y minimizar emisiones.
- Obtener la mayor eficiencia en el sistema.
- Manejar la desconexión y conexión de los componentes de la microrred.

A continuación, se muestran los principales tipos de generación que se utilizan en las microrredes y las características que la describen a cada una de ellas.

Generación fotovoltaica

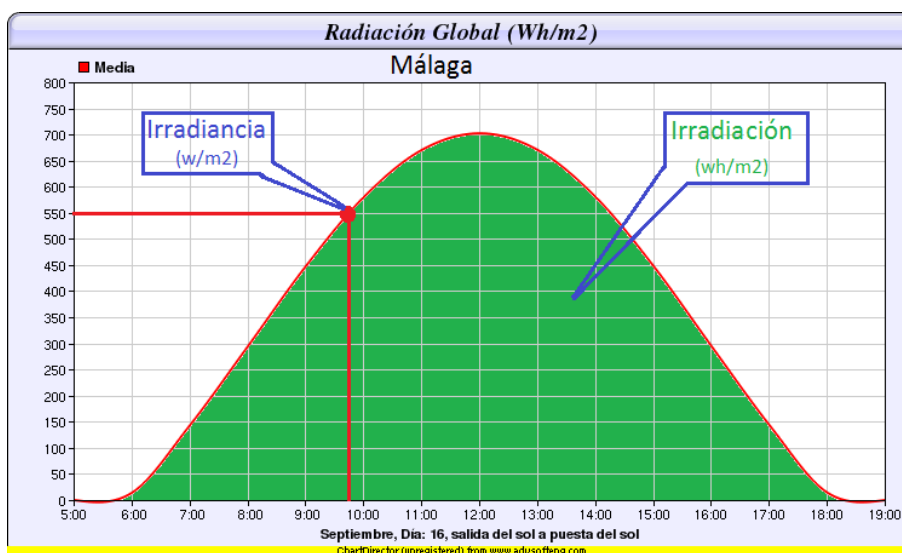
Considerada como energía verde y una de las más versátiles en el desarrollo de tecnologías, la generación de electricidad basada en el aprovechamiento de la radiación solar es una de las más utilizadas actualmente en el mercado, principalmente en instalaciones de bajas capacidades (Chica & Guamán, 2017).

Hoy en día este tipo de tecnologías es considerado como energía sostenible a largo plazo, no aporta a la contaminación ambiental y su funcionamiento es silencioso en comparación con otro tipo de fuentes de generación. Sin embargo, presenta algunas desventajas como el alto costo de instalación en comparación con la baja eficiencia energética, además que su instalación es considerada en sitios estratégicos donde el recurso solar es bastante bueno, muchos de estos factores han interferido en la penetración de esta tecnología a gran escala (Mariam, Basu, & Conlon, 2013).

Cuando se trata de aprovechar la incidencia solar que posee un sitio en particular se alude a dos términos como son la irradiancia e irradiación. Según se puede ver en la figura 2. La irradiancia es la radiación solar que incide sobre la superficie en un instante de tiempo y se expresa en forma de potencia [W/m^2], mientras que la irradiación es la radiación solar que incide sobre la superficie durante un periodo de tiempo y se expresa en forma de energía [Wh/m^2] (Bach & De la Torre, 2017).

Figura 2

Gráfica típica de la radiación global

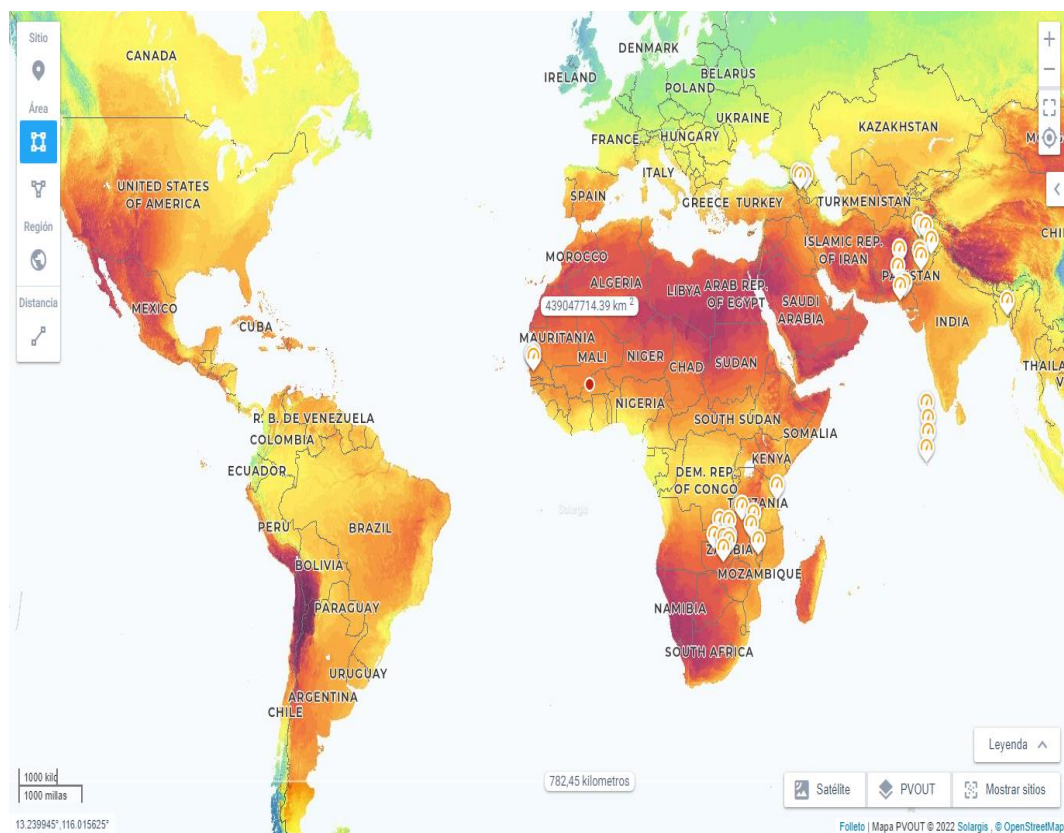


Nota. Figura típica de la radiación global, irradiancia e irradiación. Tomado de (Bach & De la Torre, 2017). Radiación global de la provincia de Málaga, España.

En el mundo cada región posee una cierta cantidad de recurso solar, algunas partes del planeta no son muy aventajados de esta energía, mientras que en otros lugares es abundante la radiación provocada gracias a la luz del sol que varía con el pasar de las horas. En la figura 3 se muestra el mapa de irradiación horizontal global actualizado en tiempo real.

Figura 3

Imagen detallada del Atlas Solar Mundial



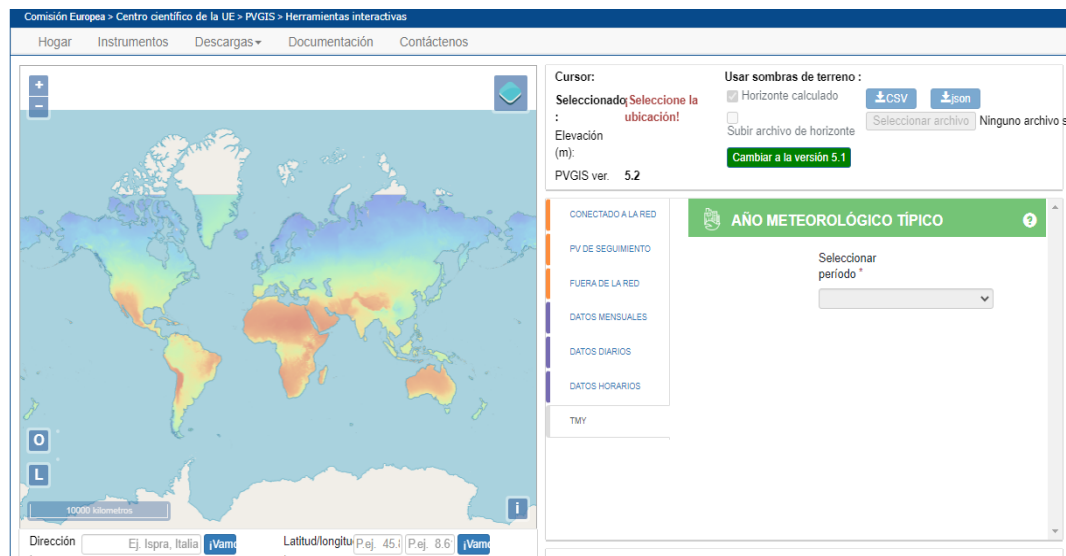
Nota. Captura del Atlas Solar Mundial, Tomado de ATLAS SOLAR MUNDIAL (2022).

Generación eólica

Para un estudio de diseño de una central eólica se debe realizar el análisis de la velocidad del viento y producción eólica en una localidad geográfica determinada, es así que se puede hacer uso de varias plataformas digitales que brindan información más detallada como es el caso del Sistema de Información Fotovoltaica (PVGIS) que se muestra en la figura 4.

Figura 4

Sistema de Información Fotovoltaica (PVGIS)



Nota. El Sistema de Información Fotovoltaica (PVGIS), Tomado de (European Commission, 2022).

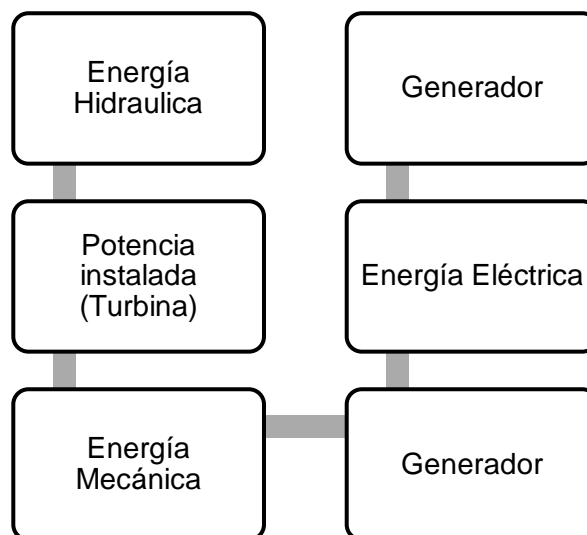
Existen gran cantidad de modelos, tipos y tamaños de aerogeneradores que sus capacidades oscilan desde 1 kW hasta máquinas que alcanzan los 12 MW de potencia, logrando obtener una eficiencia de aproximadamente el 57%, lo cual representaría la máxima capacidad de potencia que se aprovecharía de la máquina (Tolón & Tamara, 2013).

Generación hídrica

La energía hidráulica se basa en el aprovechamiento de energía cinética y potencial de las masas de agua en movimiento. Una vez pasado por este proceso, el agua es nuevamente conducido al río o canal para ser aprovechada aguas abajo para riego, consumo o una siguiente central hidráulica (Gaviria & Gómez, 2018). En la figura 5 se puede observar los ciclos para obtención de energía eléctrica a partir de la energía hídrica.

Figura 5

Ciclo para la obtención de energía eléctrica a partir de la energía hídrica



Nota. Ciclos del cual está compuesto el sistema de generación de energía eléctrica a partir del movimiento del agua. Recuperado de (Chica & Guamán, 2017).

Actualmente la energía hídrica es la más utilizada en el mundo como fuente de energía limpia, representando una quinta parte de la generación eléctrica del planeta y de baja contaminación, ya que no emana gases contaminantes, no obstante, la implementación de una central hídrica tiene un efecto ambiental debido a la construcción de su infraestructura, se altera la dirección del agua y afectación a la flora y fauna de la localización, mientras más grande sea la central conlleva mayor impacto ambiental (Gaviria & Gómez, 2018).

En función a su capacidad de generación se las puede clasificar de la siguiente manera como se muestra a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4*Clasificación de Hidroeléctricas*

Clasificación	Capacidad (kW)	Aplicación
Pico-centrales	0,5 - 5	Lugares muy remotos.
Micro-centrales	5 - 50	Casos aislados de ZI.
Minicentrales	50 - 500	Casos aislados de ZI
Pequeña Central Hidroeléctricas (PCH)	500 - 20000	Aplicable en ZNI y zonas interconectadas con posibilidades de participación en despacho eléctrico.
Centrales Hidroeléctricas (CH)	➤ 20000	Aplicable en zonas interconectadas con participación en despacho eléctrico.

Nota. En la tabla 4 se indica la clasificación de las hidroeléctricas de acuerdo a su capacidad de instalación de generación, además la aplicación de cada una de ellas. Tomado de Atlas Potencial Hidro energético de Colombia (2018).

La generación hídrica cumple una de las funciones más importantes en el sistema, como es la de soportar las diferentes variaciones que se producen al cubrir una demanda, además es una de las fuentes de generación más óptimas ya que las turbinas que se utilizan son una de las más eficientes con un rendimiento promedio del 80%.

Dependiendo de sitio donde se encuentren implementadas y del tamaño del embalse se pueden clasificar en dos tipos de turbinas (Calle & Gomez, 2017).

- **Turbinas de acción:** Su principio de funcionamiento se basa en el uso del flujo del agua para ocasionar el movimiento de las turbinas, aunque la altura de la presa y el caudal sean muy bajos, por lo que se trata de turbinas a velocidades bajas como son las turbinas Pelton.
- **Turbinas de reacción:** Este grupo de turbinas se basa en el aprovechamiento de la energía cinética del agua para mover el rodete, a diferencia de las turbinas de acción estas manejan una mayor altura de la presa y caudal, se encuentran turbinas tipo Francis, Kaplan, Deriaz y Bulbo).

Sistema de generación a Diesel (GDS)

Son uno de los electrógenos con motores de combustión interna más comunes en los grupos de fuentes de energía, este tipo de generadores se encuentran muy a menudo como generación de energía eléctrica de respaldo en casos de presentarse un black out, por el costo elevado de operación y el efecto invernadero que involucra este tipo de tecnología, se trata de utilizar al mínimo estos generadores que su fuente primaria de energía es el diésel, además de que es importante considerar el transporte del combustible y el grado de complejidad para mantener almacenado en zonas remotas o de difícil acceso (Chipantiza & Guaita, 2021).

La eficiencia energética de los generadores diésel bordea el 40%, además dependerá de la temperatura en la que se combustionen los gases, la capacidad del generador y la calidez del combustible fósil, se estima que las máquinas electrógenas tienen un promedio de vida útil de 25 años (Chica & Guamán, 2017).

En localidades rurales o sitios remotos al hacer uso de generadores de bajas capacidades les permite una fácil movilidad a localidades donde se requiera de electricidad.

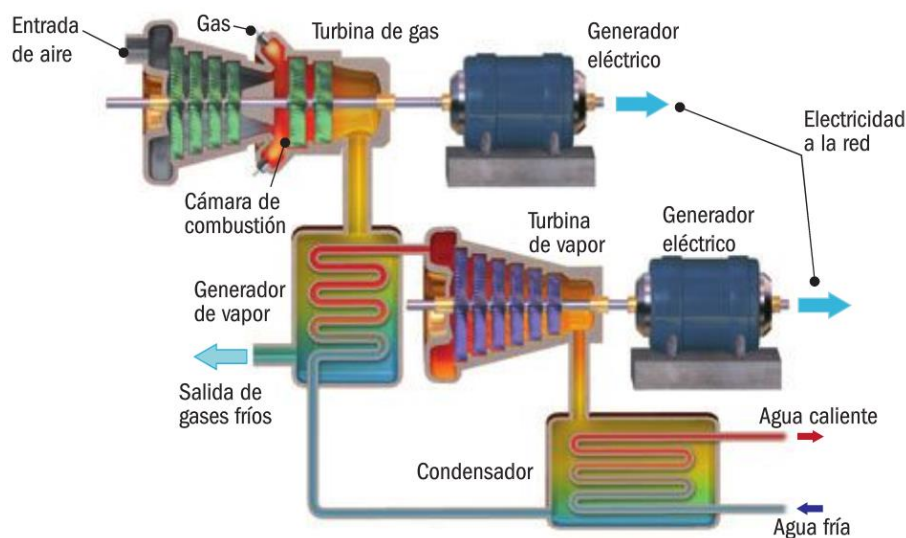
Sistema de Generación a Gas (GGS)

Los generadores de gas licuado de petróleo (GLP) han ido creciendo en avances y desarrollos tecnológicos, esto gracias a la impulsión en la rama de la aeronáutica. Este tipo de electrógenos mantienen una eficiencia que bordea el 30%, dependiendo además de la temperatura de combustión de los gases y calidad de los mismos.

En este tipo de tecnologías se maneja un alto estándar de seguridad y llaman la atención de la industria por el doble propósito que brinda al momento de generar electricidad, también se pueden aprovechar los gases y las altas temperaturas de combustión para la obtención de vapor mediante otro tipo de procesos como el de ciclo combinado que se muestra en la figura 6 (Tolón & Tamara, 2013).

Figura 6

Esquema de una central térmica de ciclo combinado



Nota. Esquema de una central térmica de ciclo combinado, donde se observa el principal aprovechamiento de la energía primaria del gas para obtener electricidad y vapor a la vez, mediante el uso de la turbina de gas y turbina de vapor. Tomado de Energía térmica grupo13, (2018).

Sistema de almacenamiento de energía por baterías (BESS)

En una microrred se evidencian grandes variaciones de energía eléctrica debido al uso de fuentes de generación con intermitencia, es por ello que la implementación de un sistema de almacenamiento de energía es vital para un adecuado despacho de la misma y garantizar la continuidad en el abastecimiento de la demanda, actualmente existen gran variedad de baterías como son: Litio, AGM de gel, Tubular estacionaria, etc. No obstante, se encuentran vigentes estudios donde se plantean alternativas eficientes para manejar los desechos contaminantes que provocan las baterías después de haber cumplido su vida útil (Keyhani & Marwali, 2011) (Gaviria & Gómez, 2018).

En los sistemas independientes de energía que comúnmente se encuentran en las microrredes, se necesita de algún sistema de almacenamiento de energía que se obtuvo en las horas de mayor aprovechamiento de los recursos renovables. En los casos de microrredes aisladas de la red, los BESS que en inglés significa (Battery Energy Storage System), son los sistemas idóneamente instalados (Chipantiza & Guaita, 2021).

Modos de operación de la microrred

La desconexión de una microrred del sistema eléctrico de potencia muchas de las veces son de forma intencional a causa de factores externos, en este caso se ejecuta una reconexión posteriormente para que la MG vuelva a integrarse al SEP y para que se cumpla este procedimiento sin problema se debe asegurar que se haya alcanzado los rangos de voltaje, frecuencia y ángulo de fase estandarizados en ANSI C84.1-2006. Una vez establecido la reconexión de la microrred al sistema, las fuentes deben mantenerse bajo el estándar de la IEEE 1547 (IEEE, 2012).

Microrred aislada

Este tipo de MG operan con un sistema de control el cual les permite definir valores de voltaje y frecuencia., con el fin de suministrar la energía eléctrica de calidad a los usuarios y siempre tratando de cubrir la mayor demanda posible y evitar que exista energía no suministrada ENS (Energy Not Served). En este modo de operación de la microrred, cuenta con una vasta reserva de energía en cuanto a generación distribuida y en los sistemas de almacenamiento de baterías (IEEE, 2012).

Microrred conectada a la red

Este tipo de MG opera bajo estándares muy estrictos en los cuales se enfoca la sincronización de voltaje, frecuencia y ángulos de fase tanto de la microrred como del SEP. La conexión se ejecuta cuando se logra alcanzar los rangos permitidos y es ahí cuando la microrred asegura un despacho óptimo a las cargas existentes y cubre la totalidad de la demanda, además adopta nuevas formas de funcionamiento en base a los requerimientos del SEP (IEEE, 2012).

Marco Regulatorio en el Ecuador

En el Ecuador existen regulaciones en vigencia dados por la (ARCERNNR) en la que se regula las fuentes de generación para el autoabastecimiento.

Regulación Nro. ARCERNNR 002/2021

En esta regulación se plantea las condiciones técnicas y comerciales para la operación desarrollo de centrales de generación para el autoabastecimiento, de propiedad de empresas que sean habilitadas por el ministerio rector (ARCERNNR-002/21, 2021).

La conexión de la generación puede ser en Medio Voltaje o Alto Voltaje. Solo pueden ser operadas por empresas habilitadas por el ministerio de energía y recursos naturales no renovables. Estas plantas se deben conectar cerca al consumo.

La regulación de las microrredes no está detallada en su totalidad, ya que al momento en el que ellas operan en modo isla provocan incertidumbre sobre su correcta operación y abastecimiento de la carga es por ello que la utilización de microrredes aisladas es factible utilizarlas en zonas rurales que se encuentren alejadas del SIN, Pero deben seguir cumpliendo con las regulaciones de voltaje y frecuencia por medio de los convertidores para así proteger a los equipos electrónicos.

Estudios Relacionados

Control predictivo distribuido robusto para la coordinación de microrredes.

En el presente trabajo se da a conocer propuestas de implementación de sistemas de gestión de energía para coordinar microrredes de forma distribuida conectadas a la red, inicialmente se plantea un control predictivo basado en modelos MPC, el cual se va mejorando con la finalidad de resolver el problema de optimización más completo y consiguiendo formalizar el controlador a un MPC Distribuido. Además, se utilizan dos métodos de optimización de los cuales; el primero se basa en un método de direcciones alternas de los multiplicadores y el segundo es el método de interactivo.

Se realiza un estudio de caso con valores semejantes a la realidad para validar el trabajo y se considera un ejemplo de pérdida de comunicación entre los agentes de los controladores distribuidos, logrando identificar una operación independiente de cada microrred hasta que se restablezca la comunicación (Echavarri, 2020).

Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas

En el presente proyecto se realiza un diseño metodológico que permita optimizar los recursos energéticos en una microrred, lo que busca esta propuesta es minimizar el costo de la energía para las zonas no interconectadas, incluyendo un número adecuado de unidades de generación que conforman la microrred y se da como prioridad a las fuentes de energía a base de recurso renovables, excluyendo a generadores Diesel o gas. Para validar el trabajo se realiza una simulación en el software HOMER, considerando cuatro localidades, el método seleccionado permite diseñar una microrred para cada localidad dependiendo de su demanda y recursos disponibles en la zona, finalmente se analizan estas microrredes operando al mínimo costo de generación de energía y con la configuración más adecuada obtenida mediante la metodología planteada (Cataño & Leal, 2018).

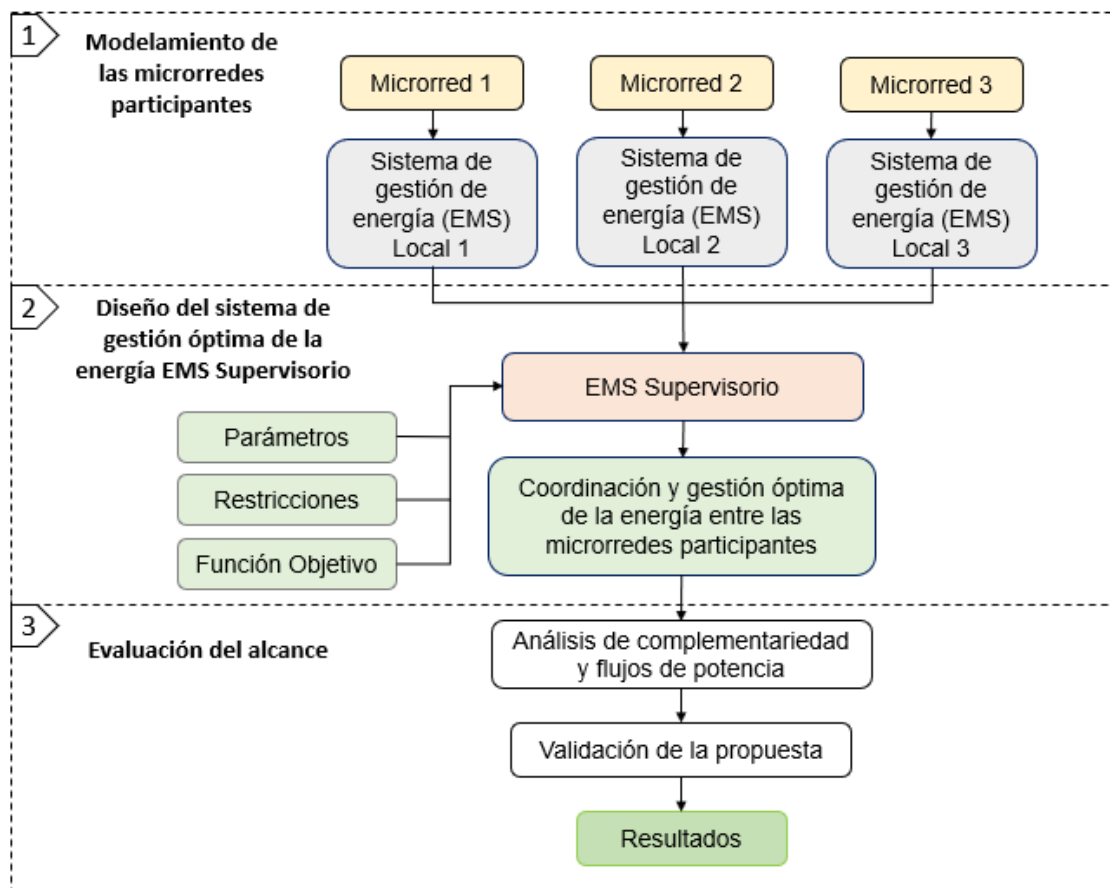
Capítulo III

Metodología

En el presente capítulo se detalla la metodología propuesta para el sistema de gestión óptima de la energía para la coordinación de microrredes operando en modo isla. La metodología se da a conocer en 3 etapas muy importantes, para ello se muestra la figura a continuación.

Figura 7

Diagrama metodológico general



Nota. La figura representa la metodología propuesta por el grupo de investigación, con enfoque en la coordinación de múltiples microrredes.

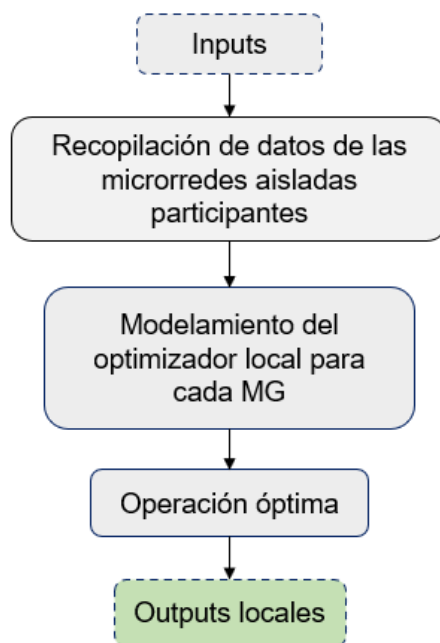
A continuación, se detalla cada una de las tres etapas planteadas anteriormente y cuáles han sido los pasos a seguir para lograr la metodología basada en la optimización de recursos y coordinación de microrredes aisladas.

Modelamiento de las microrredes participantes

La primera etapa consiste en el modelamiento de las microrredes aisladas participantes haciendo uso del software solucionador de optimización FICO Xpress, identificando los parámetros establecidos dentro de cada microrred, reconociendo el recurso renovable disponible, se establecen las fuentes de energía como solar, fotovoltaica, mini hidro, diésel, entre otras y su respectivo sistema de almacenamiento por baterías, todos estos serán los inputs de cada MG. En primera instancia se identifica el grupo de microrredes que se pretende coordinar y para ello se plantea subetapas mostradas a continuación en la figura 8.

Figura 8

Diagrama metodológico para el modelamiento de los EMS locales



Nota. Subetapas para el modelamiento y optimización de las microrredes independientes.

Identificación de las microrredes aisladas

En esta sección se identifican las microrredes aisladas, para ello en el presente estudio se plantean tres microrredes de diferentes características y componentes. Se realiza la recopilación de datos de cada microrred aislada participante, como son: perfiles de demanda, perfiles de radiación solar, velocidades de viento, capacidades de las baterías y si cuenta con algún tipo de grupo electrógeno. Estos datos serían las entradas para posteriormente realizar la formulación del problema de optimización.

Con los datos obtenidos se realiza el diseño de los EMS locales de cada microrred, en esta etapa se plantean las ecuaciones de balance, función objetivo y las restricciones que debe cumplir cada una de las MG para que se encuentren operando de forma aislada y segura.

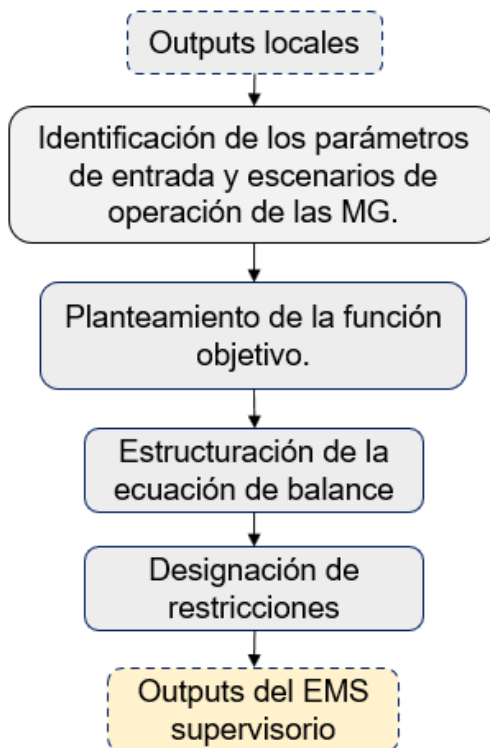
Consecuentemente de haber realizado el modelamiento matemático de cada microrred se procede a modelar el sistema de gestión óptima de la energía local para cada Microrred, esta maneja en forma óptima cada componente del entorno y nos entregara datos de excedencia o déficit de energía. Además, se obtiene el costo inicial en el que despacha la energía cada microrred, este valor es importante ya que servirá de referencia para validar si se reduce o se mantiene el costo de operación luego de la implementación de la coordinación de las tres microrredes. Una vez obtenidos los resultados en la operación diaria de cada microrred, estos datos se procesan y son enviados a las entradas del EMS supervisorio.

Diseño del sistema de gestión óptima de la energía EMS supervisorio

En esta segunda etapa se procede a diseñar el EMS supervisorio para la coordinación de las microrredes ya establecidas, tomando como datos otorgados por cada microrred y este establece como se dará el intercambio de energía. Para ello se plantea subetapas mostradas a continuación en la figura 9.

Figura 9

Diagrama metodológico para el modelamiento del EMS supervisorio



Nota. Subetapas a seguir para el modelamiento del sistema de gestión óptima de la energía EMS supervisorio.

Parámetros de entrada

Para el diseño y optimización de los recursos disponibles en las microrredes aguas abajo, se tiene como parámetros de entrada, los datos obtenidos en el EMS local de cada una de ellas, los datos principales que se toman en cuenta son la energía no suministrada, la cantidad de vertimiento de energía y la cantidad de energía que se obtuvo con la activación de los generadores a base de combustibles fósiles.

Función objetivo

Los principales parámetros que se hacen uso dentro de la función objetivo corresponden a la cantidad de potencia que se vierta en cada una de las microrredes, la potencia no suministrada y potencia generada a base del diésel.

Al formular la función objetivo se establece un costo de penalización para cada parámetro, en este caso el costo de vertimiento de energía se impone únicamente para cumplir el problema de optimización y aprovechar al máximo los recursos renovables de costo cero. A diferencia del costo de la energía no suministrada, este si tiene incidencia en el valor final de operación de las microrredes.

Ecuación de balance

Para la ecuación de balance del EMS supervisorio se identifican las potencias de vertimiento de cada microrred, estas se convierten en las fuentes de generación dentro del optimizador EMSS y las potencias no suministradas de cada microrred en cambio se convierten en la demanda del EMSS. Es así como ahora el optimizador supervisorio trabaja con su propia ecuación de balance y de acuerdo a las salidas de los EMS locales.

El objetivo de esta ecuación de balance es lograr que el sistema de gestión supervisorio capte el comportamiento de cada una de las microrredes y en base a ello absorba la energía vertida por las excedentarias y la distribuya a las deficitarias.

Restricciones

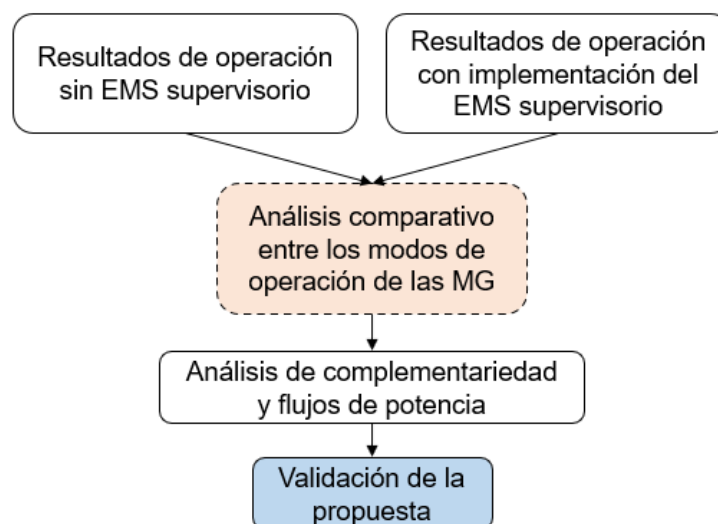
Para la correcta operación, optimización y coordinación de las microrredes, se plantean un conjunto de restricciones, estas permiten el cumplimiento estricto de la ecuación de balance y de la función objetivo. Además, en base a las restricciones se moldean las salidas del EMS supervisorio, datos que serán devueltos a los EMS locales para permitir el intercambio de energía entre ellas cuando las condiciones de operación les permita.

Evaluación del alcance

Finalmente, la tercera etapa de la metodología propuesta se basa en el estudio y análisis de los resultados obtenidos en la operación de las microrredes, con la finalidad de lograr una evaluación completa de los resultados, se sigue los pasos planteados la figura 10.

Figura 10

Diagrama metodológico para el análisis de resultados y evaluación del alcance



Nota. Estructura para lograr una evaluación del alcance de resultados en los diferentes modos de operación de las microrredes.

Análisis de operación antes del EMS supervisorio

En esta etapa de evaluación, se encuentran diferentes modos de operación, en el cual las microrredes se encuentran operando de forma aislada e independientemente cada una de ellas, para lo cual se logra identificar cuando una microrred está siendo excedentaria o deficitaria de energía.

Se realiza un análisis con un horizonte de tiempo dado de 24 horas en donde se visualiza el tiempo en que la microrred presenta energía no suministrada ENS y en qué momentos tiene excedente de energía y la dispersa en forma de vertimiento. Además, se observa el comportamiento de carga y descarga de las baterías de acuerdo a las necesidades de cada microrred, otro de los datos importantes que se toma en consideración es cuando los generadores a base de diésel tienen que encenderse en horas de demanda máxima con el fin de evitar dejar sin suministro a los usuarios. Todos estos resultados sirven como referencia para realizar un análisis comparativo más adelante cuando ya se ha implementado el sistema de gestión de energía EMS supervisorio.

Análisis de operación después del EMS supervisorio

En esta sección de análisis se focaliza a la revisión de la correcta operación del optimizador supervisorio, que cumpla con las restricciones establecidas y sobre todo que opere de manera óptima al momento de entrar en coordinación las tres microrredes. Una vez implementado el EMS supervisorio, las tres microrredes están compartiendo información y apoyándose mutuamente con energía.

Los resultados que arroja el optimizador supervisorio permitirá que los EMS locales capten esta información de retorno y permitan el flujo de potencia entre las microrredes interconectadas, logrando así apoyar cuando una microrred tenga exceso de energía y otra microrred vecina lo necesite en este instante de tiempo o tenga capacidad para almacenar en sus baterías para un aprovechamiento más adelante.

Con los valores finales se realiza un análisis comparativo en el cual permite identificar si la operación de las microrredes ha mejorado, si se mantiene o aumento el costo de operación de las microrredes en comparación de cuando operaban de forma aislada.

Análisis de complementariedad y flujos de potencia

El análisis de complementariedad y flujos de potencia permitirán validar el trabajo del sistema de gestión de energía EMS supervisorio, ya que además de revisar si el costo de operación de las microrredes disminuye o aumento, los flujos de potencia brindan una idea más clara del comportamiento de la energía en la interconexión de las tres microrredes, es así que se comprueba si la dirección de los flujos corresponden a la potencia de aporte virtual proveniente de las MG excedentarias que a su vez es controlada por el optimizador supervisorio y es enviado hacia la microrred deficitaria.

Por otra parte, se propone escenarios donde las líneas de interconexión entre las microrredes presentan congestión, donde se analiza cual es el comportamiento de cada una de ellas y como responden ante el control terciario, así como el costo de operación correspondiente al escenario planteado. Finalmente se valida los resultados obtenidos con la implementación del sistema de gestión optima de la energía EMS supervisorio.

Capítulo IV

Desarrollo de la propuesta

Diseño de los sistemas de gestión EMS locales

Para validar la metodología expuesta en el capítulo III, se realiza el estudio mediante la construcción de perfiles de carga y generación de cada microrred tomando como referencia sectores rurales del territorio ecuatoriano, considerando sectores en donde ya se dispone de algún tipo de generación renovable, además de disponibilidad de recursos cerca, sitios con limitada población y difícil acceso de energía eléctrica proporcionada por una interconexión directa al SNI.

Para la presente investigación se proyecta la aplicación en sectores rurales, en donde se disponga de fuentes de energía primaria renovables como hídricas, solares u eólicas esto se puede dar por su ubicación geográfica, para lo cual se diseñan las fuentes de generación de las tres microrredes del caso de estudio, así como los perfiles de carga de las mismas.

Diseño de fuentes de generación y perfiles de carga

Partiendo de esta premisa, se establecen parámetros para el diseño y validez al momento de generar los perfiles de carga y diseño de la generación.

- Los perfiles de carga son diferentes para las tres microrredes, al encontrarse en sectores diferentes, el número de usuarios también varía, además de que cada vivienda cuenta con distintos dispositivos y electrodomésticos que consumen energía según su rutina diaria.
- Las fuentes de generación serán diferentes para las tres microrredes, dependiendo del recurso disponible en dicha localidad, se puede tener fuentes de generación hídrica, solar, eólico y diésel.

- Las baterías serán una fuente de almacenamiento de energía que será aprovechada cuando no exista el recurso suficiente de energía en el sistema, permitiendo aprovechar de mejor manera los recursos de generación renovable.

Recurso Renovable

Los recursos energéticos disponibles en las comunidades rurales varían según su ubicación geográfica, por lo que se presenta los tres tipos de recursos más utilizados dentro del territorio estos son: recurso solar, recurso hídrico y recurso eólico, por lo tanto, se va establecer cuál es la cantidad de recurso disponible y su intermitencia en el transcurso del día.

Recurso Solar

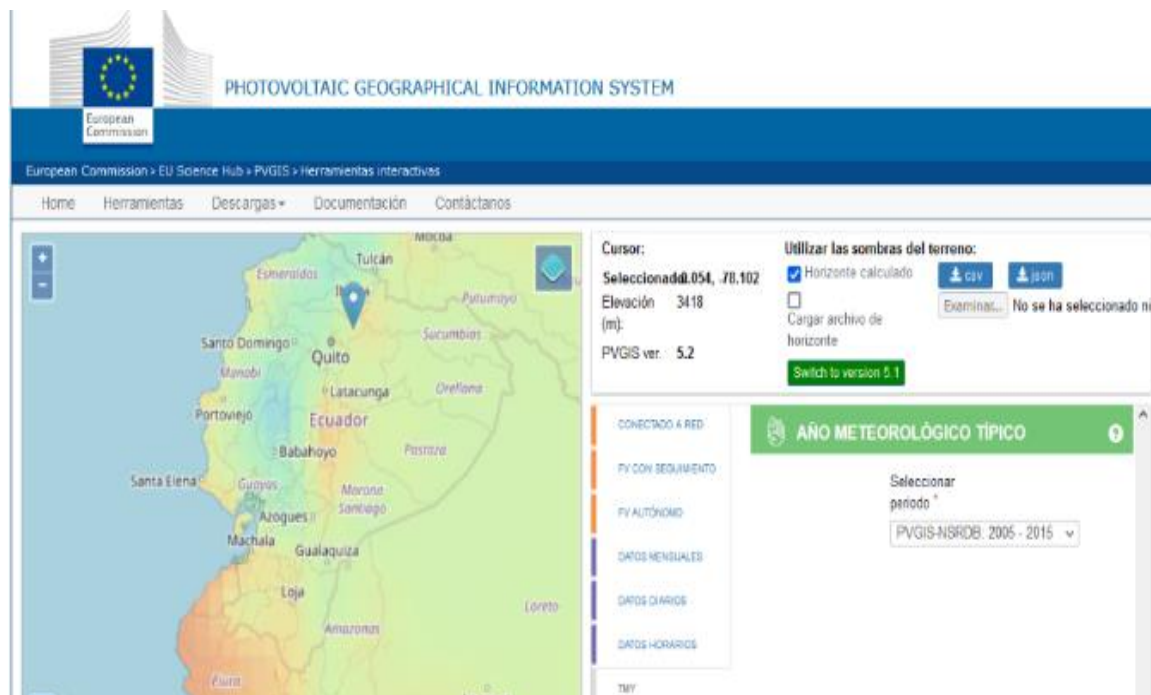
Para la presente investigación se determinó el recurso solar, teniendo en cuenta su variabilidad en el transcurso del día, además se toma como referencia un día soleado, obteniendo datos distintos por cada hora.

Para la obtención de estos datos se utilizó la plataforma web PVGIS (Sistema de información geográfica fotovoltaico, en donde se estableció un horizonte de 24 horas en un sector rural, la localidad seleccionada se puede establecer lo más precisa posible de acuerdo a la exigencia del proyecto, para ello se muestra se muestra en la figura 11 una idea detallada de la plataforma virtual.

En la plataforma se identifica el lugar en el que se realizara el proyecto, se elige el tiempo, el mes, las unidades de irradiación y la inclinación con ello se obtienen los datos históricos de radiación por horas, estos datos son de gran facilidad a la hora de descárgalos para procesarlos y trabajar en proyectos de implementación o expansión de fuentes de energía solar.

Figura 11

Sistema de información geográfica fotovoltaico



Nota. Sistema de información geográfica fotovoltaico en el que se utiliza el TMY (año meteorológico típico) recuperado de (European Commission, 2022).

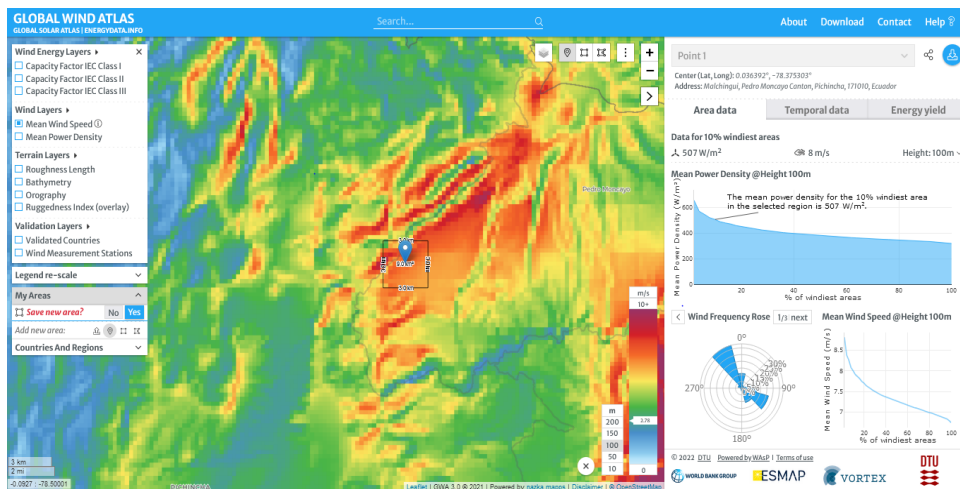
Recurso eólico en la microrred 1

Para la presente investigación se determinó el recurso eólico disponible, considerando la variabilidad del mismo en el transcurso del día, tomando como referencia un día con temperatura media.

La obtención de estos datos se obtiene mediante el uso de la plataforma web GLOBAL WIN ATLAS (Atlas global de viento), para lo cual se estableció un horizonte de 24 horas obteniendo datos históricos de la velocidad del viento como se muestra en la figura 12.

Figura 12

Global Win Atlas



Nota. Atlas global de viento en el que se obtiene la velocidad media del viento con el año meteorológico típico recuperado de (ATLAS, 2022).

Recurso hídrico en la microrred 2

Para la presente investigación se proyecta el uso del recurso hídrico como fuente de energía base para la cual se toma datos de caudal del río, datos de la cuenca a la que pertenece. Se toma como referencia el río más cercano a la comunidad. El río posee un cauce con una velocidad que puede variar por la presencia de rocas o un desnivel en su cauce o el aumento de la frecuencia de lluvias en el sector.

Diseño y elementos de las microrredes

Componentes de la microrred 1

La microrred 1 está compuesta de generación fotovoltaica, eólica, un sistema de almacenamiento de energía y la carga producida por los usuarios de la misma. En la figura 13 se observa que la constitución de la microrred 1 esta se divide en las siguientes partes que se detallan a continuación.

Figura 13

Componentes de la microrred 1

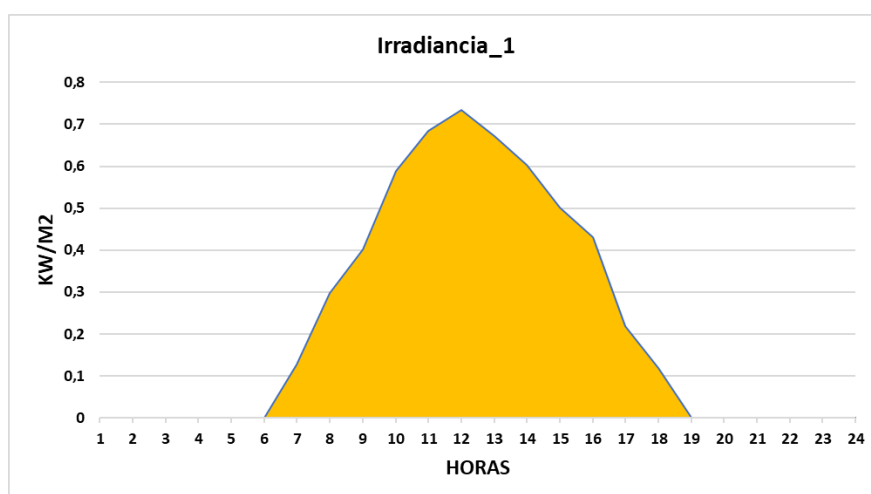


Nota. Microrred 1 constituida por el sistema de generación, almacenamiento y la demanda.

Generación fotovoltaica. La generación fotovoltaica, se desarrolló a partir de los datos de irradiación arrojados por la plataforma dados en kW/m^2 .

Figura 14

Datos de irradiación microrred 1



Nota. Curva de irradiación en kW/m^2 de un día soleado en un sector rural del Ecuador.

En la figura 14 se observa la curva de irradiancia para la microrred 1, en la cual se puede notar que existen datos relevantes a partir de las 6 de la mañana hasta las 7 de la noche, ya que son los horarios en donde existe presencia del sol, además se visualiza que existe una irradiancia punta al medio día en donde existirá mayor generación solar. A continuación, se modela un sistema PV con las siguientes especificaciones:

- Área del panel = 1.63 m^2
- $\eta_{panel} = 0.154$
- $\eta_{inversor} = 0.85$
- Área total de paneles solares = 81.5 m^2

Esta área se estima para el montaje de 50 paneles solares de 2500 W por cada panel. Se diseña con el panel fotovoltaico Enhance XP-250 con una potencia de generación nominal por el panel fotovoltaico de 100 KW. Con la curva de irradiancia ahora se puede determinar la potencia de generación solar, que se puede obtener mediante el uso del modelo del generador solar descrita por la ecuación 1.

$$P_{GS}(t) = \eta_{panel} * \eta_{inst} + A_{panel} * \left(\frac{P_{GSnom}}{P_{GSpanel}} \right) * Ir(t) \quad (1)$$

Donde:

P_{GS} : Potencia de generación solar

η_{panel} : Eficiencia del panel solar

η_{inst} : Eficiencia instalada fotovoltaica

A_{panel} : Área del panel

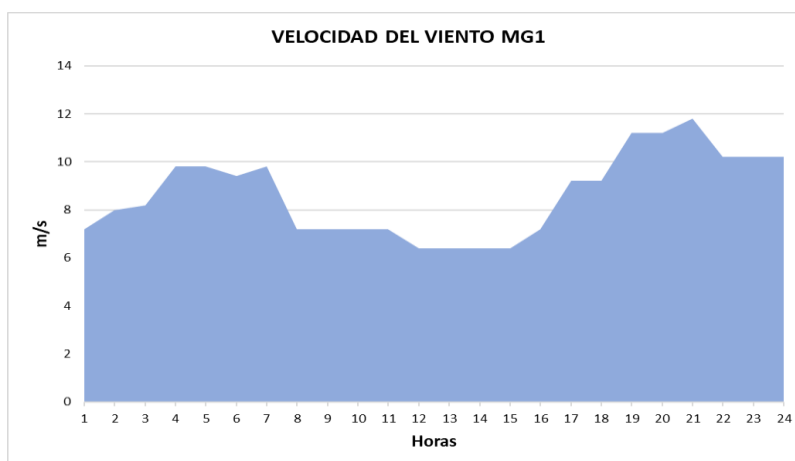
P_{GSnom} : Potencia de generación solar nominal

$P_{GSpanel}$: Potencia de generación solar del panel

Generación eólica. La generación eólica, se desarrolló a partir de los datos de velocidad del viento obtenidos de la plataforma o software virtual dados en m/s.

Figura 15

Datos velocidad del viento microrred 1



Nota. Velocidad del viento obtenido a 30 metros de altura en zona rural de Ecuador.

En la figura 15, se observa la curva de velocidad el viento para la microrred 1, en la cual se puede notar que existen datos variables durante el día, pero existe un punto medio constante, además se visualiza que existe una velocidad punta en la noche en donde existirá mayor generación eólica.

A continuación, se modela un sistema WT con las siguientes especificaciones:

- Área de barrido de las turbinas es 75.4 m^2
- 5 generadores eólicos ENARI E200 de 18 kW
- Densidad de 1.225 kg/m^3 panel = 1.63 m^2

Con los datos de la velocidad del viento se calcula la potencia de generación eólica que se puede obtener mediante el uso del modelo del generador eólico descrita por la ecuación 2.

$$P_{GE}(t) = (0.5 * (den * A_{barrido} * v(t)^3 * \left(\frac{P_{GE_{nom}}}{P_{GE_{turbina}}}\right) * Cp(t))/1000 \quad (2)$$

Donde:

P_{GE} : Potencia de generación eólica

den : Densidad

$A_{barrido}$: Área de barrido

v : Velocidad del aire

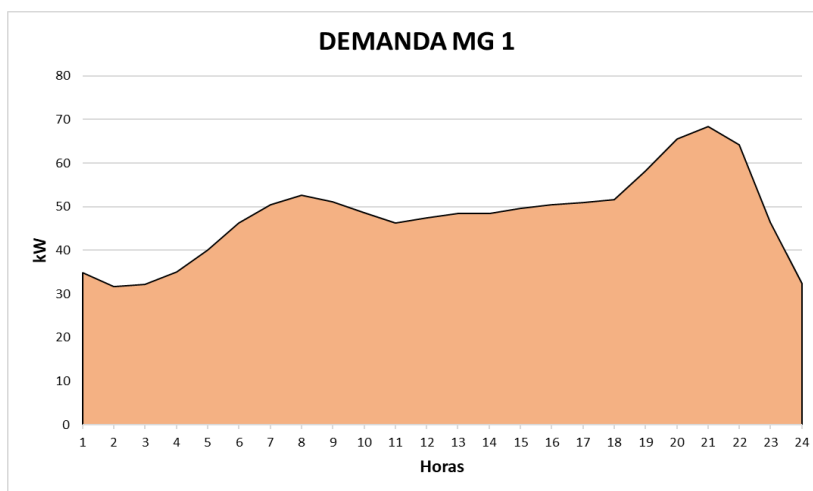
$P_{GE_{nom}}$: Potencia de generación eólica nominal

$P_{GE_{panel}}$: Potencia de generación eólica de la turbina

Cp : coeficiente de potencia según el tipo de generador

Figura 16

Datos demanda en la microrred 1



Nota. Curva de la demanda diaria en la microrred 1 dado en kW de una comunidad rural en el Ecuador.

Demanda de la microrred 1. La demanda se obtuvo a partir de datos históricos de consumo de hogares del sector rural del Ecuador, en donde existen pequeñas comunidades con bajo consumo al no disponer de muchos electrodomésticos y aparatos electrónicos.

En la figura 16 se observa la curva de la carga de la MG 1 en la cual se muestra la curva típica de demanda residencial en la cual se observan dos picos de aumento del consumo en la mañana entre las 5 y 9 horas, también en el horario nocturno entre las 19 y las 22 horas, por ello se determina que en estos horarios se necesitara mayor producción de energía por lo tanto entraran en funcionamiento otras centrales dentro de la microrred.

El sistema de almacenamiento BESS en esta microrred se determina por la potencia instalada de 40 [kW], con una eficiencia en la carga de 0.9 y una profundidad de la descarga del 90, tomando en cuenta que la batería se encuentra cargada al inicio de la operación.

Diseño del EMS local para la microrred 1

Para el correcto funcionamiento del sistema de gestión óptima de la energía en la MG 1, se debe establecer costos de operación, penalización y de instalación. El costo de operación es cero para este caso al utilizar energía renovable como fuente de energía primaria. Los costos de penalización son los siguientes:

$$\text{➤ } C_{ENS} = 0.96 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

$$\text{➤ } C_{CURTAILMENT} = 0.16 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

Los costos de instalación se establecen que son:

$$\text{➤ } C_{PV} = 750 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

$$\text{➤ } C_{WT} = 1000 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

Estos valores están establecidos por la Comisión Nacional de Energía, en el informe de costos de tecnologías de generación del 2020.

Con la información recopilada se establece la función objetivo la cual se indica en la ecuación (3), en la cual se detalla la generación de la capacidad instalada, la energía no suministrada (ENS) del sistema, potencia de vertimiento (VE) y la potencia de la batería en la descarga y los costos de cada una. Esta ecuación nos permite establecer rangos de preferencia para el uso según la tecnología de las generadoras y aprovechar de la mejor manera los recursos disponibles evitando energía no suministrada y vertimiento de energía.

$$Objective = (Cost_{ENS} * ENS(t)) + (Cost_{VS} * P_{VS}(t)) + (Cost_{VE} * P_{VE}(t)) + (Cost_{PD} * P_{BD}(t)) \quad (3)$$

Donde:

$Cost_{ENS}$: Costo de penalización por la energía no suministrada

ENS : Energía no suministrada

$Cost_{VS}$: Costo de penalización por el vertimiento solar

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

$Cost_{VE}$: Costo de penalización por el vertimiento eólico

P_{VE} : Potencia de vertimiento eólico

$Cost_{BD}$: Costo de la potencia en la descarga de la batería

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

En la función objetivo se plantea el análisis mediante el cual, el programa optimice un resultado en un tiempo dado, y posteriormente entregue el resultado por horas.

Posteriormente, se procede a desarrollar la ecuación de balance la cual se indica en la ecuación (3), la cual tiene como componentes la potencia de generación solar (GS), potencia de generación eólica (GE), la potencia de la batería en descarga (BD), la potencia de generación virtual (GV) y al otro lado de la igualdad la demanda, la potencia de vertimiento solar (VS), la energía no suministrada (ENS) y la Potencia de carga de la batería. Esta ecuación nos ayuda a dar prioridad a suplir toda la demanda requerida por el la MG 1 y evitar la sobreproducción de energía que no se pueda almacenar en fuentes de energía que no sean renovables.

$$\text{Balance: } P_{GS}(t) + P_{GE}(t) + P_{BD}(t) + P_{GVIRT}(t) = D(t) + P_{VS}(t) + P_{VE}(t) - P_{BC}(t) - ENS(t) \quad (4)$$

Donde:

P_{GS} : Potencia de generación solar

P_{GE} : Potencia de generación eólica

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

P_{GVIRT} : Potencia de generación virtual (resultado del EMS supervisorio)

D : Demanda o carga de la microrred

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

P_{VE} : Potencia de vertimiento eólico

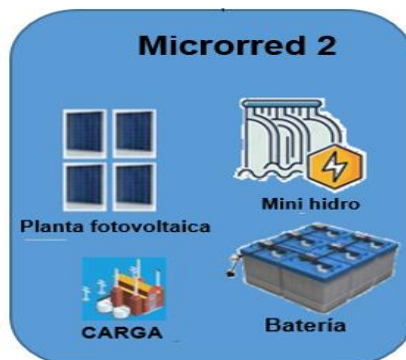
P_{BC} : Potencia de la batería en carga

Componentes de la microrred 2

La microrred 2 está compuesta de generación fotovoltaica, mini hidro, un sistema de almacenamiento de energía y la carga producida por los usuarios de la misma.

Figura 17

Componentes de la microrred 2



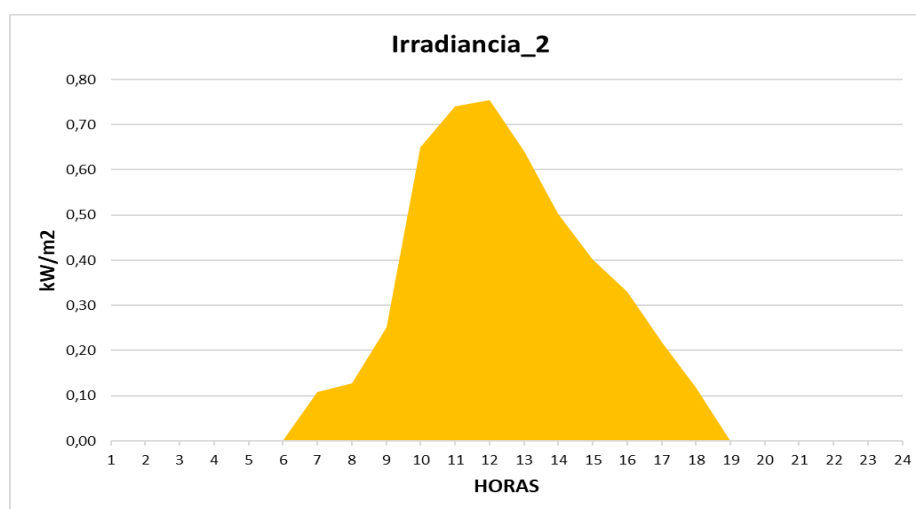
Nota. Microrred 2 constituida por el sistema de generación, almacenamiento y la demanda.

En la figura 17 se observa los componentes de la microrred 2, esta se divide en las siguientes partes:

Generación fotovoltaica. La generación fotovoltaica, se desarrolló a partir de los datos de irradiancia arrojados por la plataforma dados en kW/m^2 .

Figura 18

Datos irradiancia microrred 2



Nota. Curva de irradiancia en kW/m² para la microrred 2 de un día soleado en un sector rural del Ecuador.

En la figura 18 se observa la curva de irradiancia para la microrred 2, en la cual se puede notar que existen datos relevantes a partir de las 8 de la mañana hasta las 7 de la noche, ya que son los horarios en donde existe presencia del sol, además se visualiza que existe una irradiancia punta al medio día en donde existirá mayor generación solar.

A continuación, se modela un sistema PV con las siguientes especificaciones:

- *Área del panel* = 1.63 m²
- $\eta_{panel} = 0.18$
- $\eta_{inversor} = 0.85$
- *Área total de paneles solares* = 676.29 m²

Esta área se estima para el montaje de 412 paneles solares de 250 W por cada panel. Se utilizará el panel fotovoltaico Enhance XP-250 con una potencia de generación nominal por el panel fotovoltaico de 100 KW.

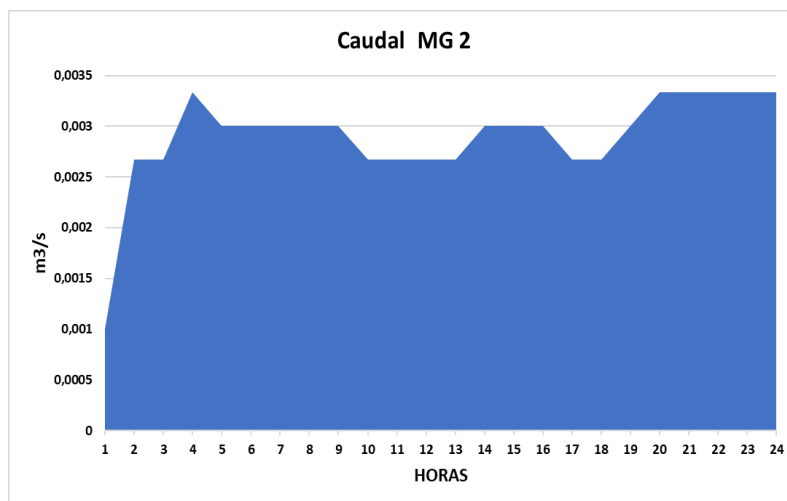
Con la curva de irradiancia se calcula la potencia de generación solar que se puede obtener mediante el uso del modelo del generador solar descrita por la ecuación 1.

$$P_{GS}(t) = \eta_{panel} * \eta_{inst} + A_{panel} * \left(\frac{P_{GSnom}}{P_{GSpanel}} \right) * Ir(t) \quad (5)$$

Generación minihidráulica. La generación hidráulica, se desarrolló a partir de los datos de caudal (Q) obtenidos de la plataforma web dados en m³/s.

Figura 19

Datos de caudal correspondiente a la microrred 2



Nota. El caudal dado en m³/s se obtuvo de un río mediano el cual varía en el transcurso del día por la presencia de lluvias, rocas y la el cauce del río este se encuentra en un sector rural del Ecuador.

En la figura 19 se observa la curva del caudal del río en el cual se establece el mini generador de energía hidráulica para la microrred 2, en la cual se puede notar que existen datos variables durante el día, pero existe un punto medio constante, además se visualiza que existe una caudal punta en horas de la noche y madrugada en donde existirá mayor generación hidráulica. A continuación, se modela un sistema MH con las siguientes especificaciones:

- Densidad del agua = 997 kg/m³
- Eficiencia de la turbina = 0.85
- Eficiencia del generador = 0.9
- Altura = 900 m

Con la instalación turbinas Pelton se obtuvo una potencia de 25 KW. Con los datos del caudal del río se calcula la potencia de generación mini-hidro que se puede obtener mediante el uso del modelo del generador hidráulico descrita por la ecuación 4.

$$P_{GH}(t) = \frac{(densidad_{agua} * g * \eta_{t_{hidro}} * \eta_{g_{hidro}} * Q(t) * H)}{1000} \quad (6)$$

Donde:

P_{GH} : Potencia de generación mini-hidro

g : Gravedad

$\eta_{t_{hidro}}$: Eficiencia de la turbina

$\eta_{g_{hidro}}$: Eficiencia del generador

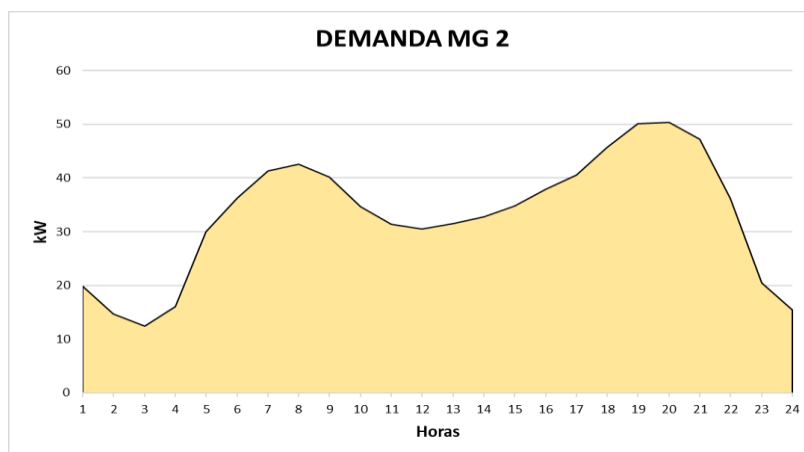
Q : Caudal

H : Altura

Demanda de la microrred 2. La demanda se obtuvo a partir de datos históricos de consumo de hogares del sector rural del Ecuador, en donde existen pequeñas comunidades con bajo consumo al no disponer de muchos electrodomésticos y aparatos electrónicos

Figura 20

Datos de demanda correspondiente a la microrred 2



Nota. Curva de la demanda diaria en la microrred 2 dado en kW de una comunidad rural en el Ecuador.

En la figura 20 se observa la curva de la carga de la MG 2 en la cual se muestra la curva típica de demanda residencial en la cual se observan dos picos de aumento del consumo en la mañana entre las 4 y 10 de la mañana, también en el horario nocturno entre las 18 y las 22 horas, por ello se determina que en estos horarios se necesitara mayor producción de energía por lo tanto entraran en funcionamiento otras centrales dentro de la microrred, además de la descarga del sistema de almacenamiento.

El sistema de almacenamiento BESS en esta microrred se determina por la potencia instalada de 140 [kW], con una eficiencia en la carga de 0.9 y una profundidad de la descarga del 90, tomando en cuenta que la batería se encuentra cargada al inicio de la operación.

Diseño del EMS local para la microrred 2

Para el correcto funcionamiento del sistema de gestión óptima de la energía en la MG 1, debemos establecer costos de operación, penalización y de instalación. El costo de operación es cero para este caso al utilizar energía renovable como fuente de energía primaria.

Los costos de penalización son iguales a la microrred 1 al igual que los costos de instalación exceptuando el costo de la generación hidráulica y del almacenamiento que son:

$$\text{➤ } C_{MH} = 1200 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

$$\text{➤ } C_{BESS} = 2000 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

Estos valores están establecidos por la Comisión Nacional de Energía, en el informe de costos de tecnologías de generación del 2020. Con la información recopilada se establece la función objetivo la cual se indica en la ecuación (7), en la cual se detalla la generación de la capacidad instalada, la energía no suministrada (ENS) del sistema, la energía de vertimiento (VE) y la potencia de la batería en la descarga y los costos de cada una.

Esta ecuación permite establecer rangos de preferencia para el uso según la tecnología de las generadoras y aprovechar de la mejor manera los recursos disponibles evitando energía no suministrada y vertimiento de energía.

$$Objective = (Cost_{ENS} * ENS(t)) + (Cost_{VS} * P_{VS}(t)) + (Cost_{VH} * P_{VH}(t)) + (Cost_{BD} * P_{BD}(t)) \quad (7)$$

Donde:

$Cost_{ENS}$: Costo de penalización por la energía no suministrada

ENS : Energía no suministrada

$Cost_{VS}$: Costo de penalización por el vertimiento solar

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

$Cost_{VH}$: Costo de penalización por el vertimiento hídrico

P_{VH} : Potencia de vertimiento hídrico

$Cost_{BD}$: Costo de la potencia en la descarga de la batería

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

En la función objetivo se plantea el análisis mediante el cual el programa optimice un resultado en un tiempo dado, y nos entregue el resultado por horas.

Luego se desarrolla la ecuación de balance la cual se indica en la ecuación (8), la cual tiene como componentes la potencia de generación solar (GS), potencia de generación mini-hidro (GH), la potencia de la batería en descarga (BD), la potencia de generación virtual (GV) y al otro lado de la igualdad la demanda, la potencia de vertimiento solar (VS), la energía no suministrada (ENS) y la Potencia de carga de la batería. Esta ecuación ejecuta la prioridad de suplir toda la demanda requerida por el la MG 2.

$$\text{Balance: } P_{GS}(t) + P_{GH}(t) + P_{BD}(t) + P_{GVIRT}(t) = D(t) + P_{VS}(t) + P_{VH}(t) - P_{BC}(t) - ENS(t) \quad (8)$$

Donde:

P_{GS} : Potencia de generación solar

P_{GH} : Potencia de generación mini-hidro

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

P_{GVIRT} : Potencia de generación virtual (resultado del EMS supervisorio)

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

P_{VH} : Potencia de vertimiento hídrico

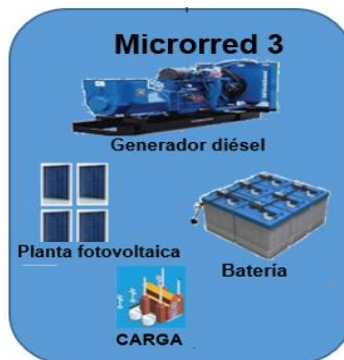
P_{BC} : Potencia de la batería en carga

Componentes de la microrred 3

La microrred 3 está compuesta de generación fotovoltaica, un generador diésel, un sistema de almacenamiento de energía y la carga producida por los usuarios de la misma.

Figura 21

Componentes de la microrred 3



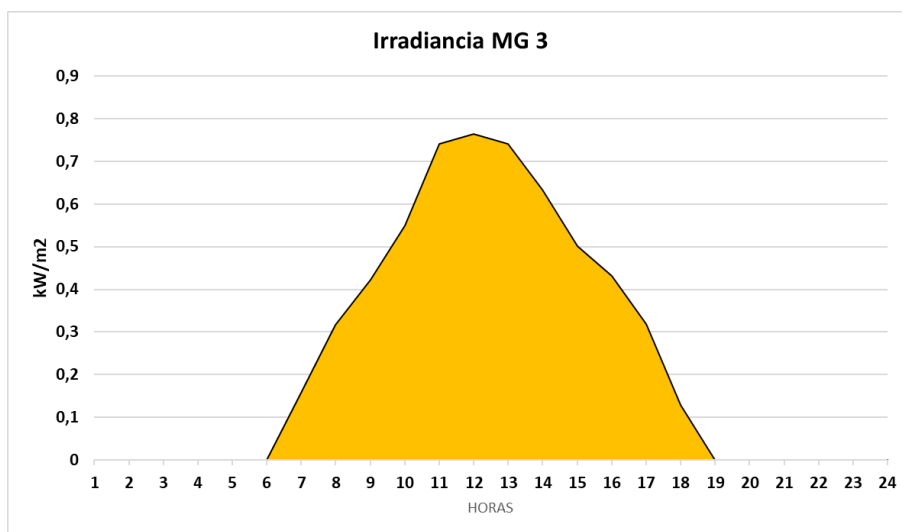
Nota. Microrred 3 constituida por el sistema de generación, almacenamiento y la demanda.

En la figura 21 se observa los componentes de la microrred 3 esta se divide en las siguientes partes:

Generación fotovoltaica. La generación fotovoltaica, se desarrolló a partir de los datos de irradiación arrojados por la plataforma dados en kW/m^2 .

Figura 22

Datos de irradiación de la microrred 3



Nota. Curva de irradiación en de la microrred 3 dado en kW/m^2 de un día soleado en un sector rural del Ecuador.

En la figura 22 se observa la curva de irradiación para la microrred 3, en la cual se puede notar que existen datos relevantes a partir de las 6 de la mañana hasta las 19 horas, ya que son los horarios en donde existe presencia del sol, además se visualiza que existe una irradiación punta al medio día en donde existirá mayor generación solar.

A continuación, se modela un sistema PV con las siguientes especificaciones:

- Área del panel = 1.63 m^2
- $\eta_{\text{panel}} = 0.154$

- $\eta_{inversor} = 0.85$
- Área total de paneles solares de 652 m².

Esta área se estima para el montaje de 400 paneles solares de 250W por cada panel. Se utilizará el panel fotovoltaico Enhance XP-250 con una potencia de generación nominal por el panel fotovoltaico de 100 KW.

Con la curva de irradiancia se calcula la potencia de generación solar que se puede obtener mediante el uso del modelo del generador solar descrita por la ecuación 9.

$$P_{GS}(t) = \eta_{panel} * \eta_{inst} + A_{panel} * \left(\frac{P_{GSnom}}{P_{GSpanel}} \right) * Ir(t) \quad (9)$$

Donde:

P_{GS} : Potencia de generación solar

η_{panel} : Eficiencia del panel solar

η_{inst} : Eficiencia instalada fotovoltaica

A_{panel} : Área del panel

P_{GSnom} : Potencia de generación solar nominal

$P_{GSpanel}$: Potencia de generación solar del panel

Ir : Irradiancia

Generador diésel. El generador Diesel, trabaja en rango de potencia mínima de 5 kW máxima de 50 kW, estos para restringir encendido y apagado del generador que debido a su naturaleza no puede estar funcionar con intermitencia.

En la ecuación 10 se muestra la restricción a la que está sometido el generador diésel. En la cual se denota que la potencia generada por el diésel tiene que ser menor o igual a la potencia instalada del generador diésel.

$$P_{GD}(t) \leq P_{GD_{INST}} \quad (10)$$

Donde:

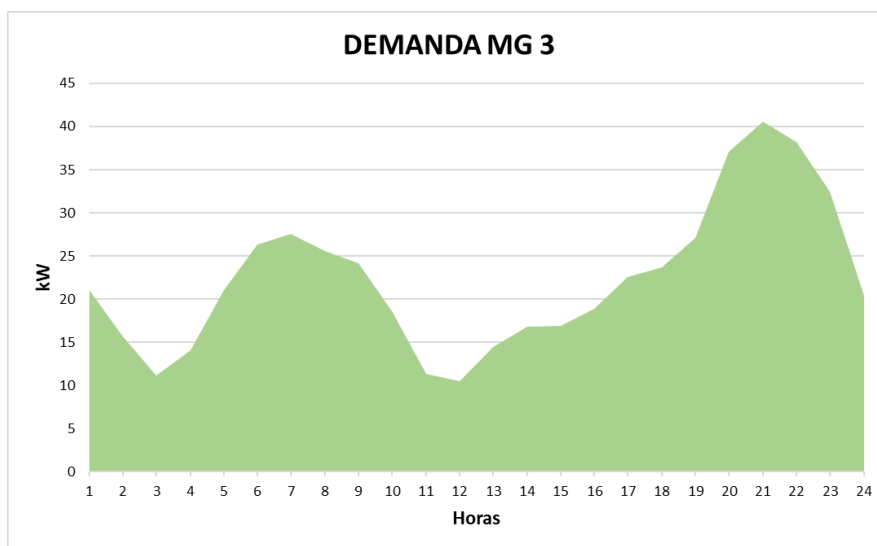
P_{GD} : Potencia de generación diésel

$P_{GD_{INST}}$: Potencia de generación diésel instalada

Demanda de la microrred 3. La demanda se obtuvo a partir de datos históricos de consumo de hogares del sector rural del Ecuador, en donde existen pequeñas comunidades con bajo consumo al no disponer de muchos electrodomésticos y aparatos electrónicos.

Figura 23

Datos de demanda en la microrred 3



Nota. Curva de la demanda diaria en la microrred 3 dado en kW de una comunidad rural en el Ecuador.

En la figura 23, se observa la curva de la carga de la MG 3 en la cual se muestra la curva típica de demanda residencial en la cual se observan dos picos de aumento del consumo en la mañana entre las 4 y 11 de la mañana, también en el horario nocturno entre las 19 y las 24 horas, por ello se determina que en estos horarios se necesitara mayor producción de energía por lo tanto entraran en funcionamiento otras centrales dentro de la microrred.

El sistema de almacenamiento BESS en esta microrred se determina por la potencia instalada de 100 [kW], con una eficiencia en la carga de 0.9 y una profundidad de la descarga del 90, tomando en cuenta que la batería se encuentra cargada al inicio de la operación.

Diseño del EMS local para la microrred 3

Para el correcto funcionamiento del sistema de gestión óptima de la energía en la MG 3, debemos establecer costos de operación, penalización y de instalación. El costo de operación es cero para este caso al utilizar energía renovable como fuente de energía primaria. Los costos de penalización son similares a la microrred 1 y los costos de instalación se estima se establece que son:

$$\text{➤ } C_{PV} = 750 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

$$\text{➤ } C_{BESS} = 2000 \left[\frac{USD}{kW} \right]$$

Estos valores están establecidos por la Comisión Nacional de Energía, en el informe de costos de tecnologías de generación del 2020.

Con la información recopilada se establece la función objetivo la cual se indica en la ecuación 11, en la cual se detalla la generación de la capacidad instalada, la energía no suministrada (ENS) del sistema, la energía de vertimiento (VE) y la potencia de la batería en la descarga y los costos de cada una.

Esta ecuación nos permite establecer rangos de preferencia para el uso según la tecnología de las generadoras y aprovechar de la mejor manera los recursos disponibles evitando energía no suministrada y vertimiento de energía.

$$Objective = (Cost_{ENS} * ENS(t)) + (Cost_{GD} * P_{GD}(t)) + (Cost_{VS} * P_{VS}(t)) + (Cost_{BD} * P_{BD}(t)) \quad (11)$$

Donde:

$Cost_{ENS}$: Costo de penalización por la energía no suministrada

ENS : Energía no suministrada

$Cost_{GD}$: Costo de generación diésel

P_{GD} : Potencia de generación diésel

$Cost_{VS}$: Costo de penalización por el vertimiento solar

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

$Cost_{BD}$: Costo de la potencia en la descarga de la batería

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

En la función objetivo se plantea el análisis mediante el cual el programa optimice un resultado en un tiempo dado, y nos entregue el resultado por horas. Luego se procede a desarrollar la ecuación de balance la cual se indica en la ecuación 12, la cual tiene como componentes la potencia de generación solar, potencia de generación eólica, la potencia de generación virtual, además de la igualdad la demanda, la potencia de vertimiento solar (VS), la energía no suministrada (ENS) y la Potencia de carga de la batería.

Esta ecuación nos ayuda a dar prioridad a suplir toda la demanda requerida por el la MG 1 y evitar la sobreproducción de energía que no se pueda almacenar en fuentes de energía que no sean renovables.

$$\text{Balance: } P_{GD}(t) + P_{GS}(t) + P_{BD}(t) + P_{GVIRT}(t) = D(t) + P_{VS}(t) - P_{BC}(t) - ENS(t) \quad (12)$$

Donde:

P_{GD} : Potencia de generación diésel

P_{GS} : Potencia de generación solar

P_{BD} : Potencia de la batería en descarga

P_{GVIRT} : Potencia de generación virtual (resultado del EMS supervisorio)

P_{VS} : Potencia de vertimiento solar

P_{BC} : Potencia de la batería en carga

Diseño del sistema de gestión EMS supervisorio.

La parte primordial del proyecto se centra en esta etapa, para lograr que las tres microrredes aisladas entren en coordinación y compartan energía, se requiere que previamente estén operando en óptimas condiciones, es así que los diseños planteados anteriormente logran satisfacer estas necesidades.

Para lograr una coordinación acertada, es preciso analizar diferentes casos que se presentaran a lo largo de la operatividad de las microrredes al momento de cubrir sus demandas, es decir el sistema EMS supervisorio obtendrá la información a lo largo del tiempo enviada desde los EMS locales, posteriormente se identifica cuando a una microrred necesita

de energía y cuando a otra le sobra, nombrándolas como deficitarias o excedentarias como se muestra a continuación.

Tabla 5

Casos de operación de las microrredes.

CASO	MG 1	MG 2	MG3
1	Deficitaria	Deficitaria	Deficitaria
2	Deficitaria	Deficitaria	Excedentaria
3	Deficitaria	Excedentaria	Deficitaria
4	Deficitaria	Excedentaria	Excedentaria
5	Excedentaria	Deficitaria	Deficitaria
6	Excedentaria	Deficitaria	Excedentaria
7	Excedentaria	Excedentaria	Deficitaria
8	Excedentaria	Excedentaria	Excedentaria

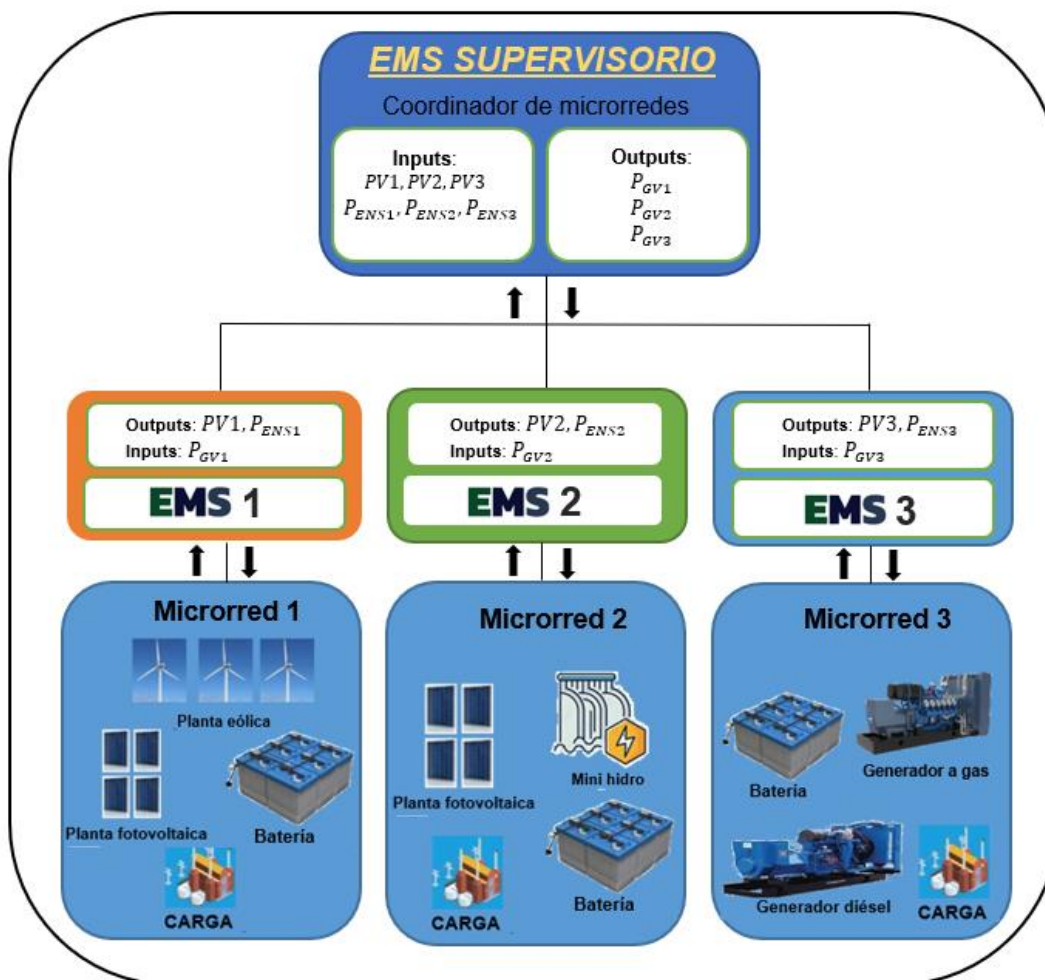
Nota. La tabla 5 muestra 8 casos diferentes de operación de las microrredes, identificando cuando a una MG vierte energía se conoce como excedentaria y cuando necesite se la denomina como deficitaria.

El sistema de gestión EMS supervisorio actuará como un cerebro de las tres microrredes, el cual tendrá a su disposición la información de operación de las tres microrredes y operaría de acuerdo a las necesidades y exigencias de cada una de ellas.

Para lograr lo mencionado anteriormente es preciso identificar los inputs y outputs del EMSS, para ello se detalla la figura a continuación donde se muestran estas variables.

Figura 24

Estructura gráfica de la coordinación de microrredes



Nota. Expresión gráfica de la coordinación del grupo de microrredes y la composición de cada uno de ellos y su interconexión para facilitar el intercambio de energía.

En la figura 24 se muestra gráficamente la estructura que se llevara a cabo en la coordinación de las microrredes participantes. Visto desde la parte inferior se encuentran las tres MG que están operando con sus respectivos componentes de generación y demanda, cada una de las microrredes cuenta con un EMS local, el cual permite la gestión y despacho óptimo, en este punto se puede identificar los datos de salida como:

- ($PV1$, $PV2$, $PV3$): Potencias de vertimiento de cada MG.
- (P_{ENS1} , P_{ENS2} , P_{ENS3}): Potencias no suministradas de cada MG.

Posteriormente por la parte superior de la gráfica analizada se encuentra el EMS supervisorio, el cual compartirá la información con los EMS locales, permitiendo percibir como entradas para este nuevo optimizador las salidas de cada microrred.

Entradas y salidas del EMS supervisorio

El EMS supervisorio puede identificar algunos datos de operación de las microrredes por medio de sus controladores locales, pero la información que realmente utiliza como entradas para resolver el problema de optimización y gestionar de manera óptima la energía son:

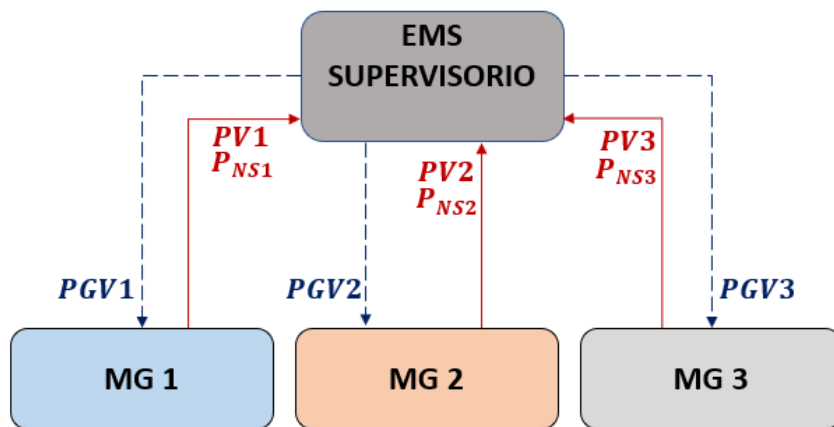
- $PV1$: Potencia de vertimiento de la MG 1
- $PV2$: Potencia de vertimiento de la MG 2
- $PV3$: Potencia de vertimiento de la MG 3
- P_{NS1} : Potencia no suministrada en la MG 1
- P_{NS2} : Potencia no suministrada en la MG 2
- P_{NS3} : Potencia no suministrada en la MG 3

En la figura 25 se muestra de manera más sencilla como están distribuidas las entradas y salidas del EMS supervisorio, para lo cual, se identifica como entradas a las simbologías de color rojo descritas anteriormente y de color azul se entiende como las salidas que envía el controlador global a los EMS locales y se describen a continuación:

- $PGV1$: Potencia de generación virtual para la MG 1
- $PGV2$: Potencia de generación virtual para la MG 2
- $PGV3$: Potencia de generación virtual para la MG 3

Figura 25

Entradas y salidas del EMS supervisorio



Nota. La gráfica muestra la identificación de los inputs y outputs del EMS supervisorio, estos datos comparten con los EMS locales de cada microrred.

La potencia de generación virtual como su nombre lo dice no está realmente física en ninguna de las microrredes, más bien es una variable que se crea en el controlador global con el objetivo de optimizar las entradas y por medio de esta variable ingresar a los EMS locales e incluirse como un aporte de energía proveniente de las otras MG que a la final aporta como intercambio de energía entre ellas. Es por medio de este dato que la información retorna del EMS supervisorio hacia los locales y se convierte en una entrada de optimización de cada MG.

Planteamiento de la función objetivo

Es necesario tener en cuenta las variables a optimizar en el controlador global, para ello es importante evitar que exista en lo mínimo potencias de vertimiento a nivel supervisorio y que más bien sea aprovechado para entregar a la microrred deficitaria y a su vez cargar las baterías que así lo requieran.

El planteamiento de un costo referencial permite cumplir con el problema de optimización, más no influye como un costo de operación de las microrredes, por lo tanto, con la finalidad de optimizar los recursos y penalizar los vertimientos y energías no suministradas se formula la función objetivo siguiente, que cumple con las necesidades y exigencias del controlador supervisorio:

$$\begin{aligned} \mathbf{Objective} = & (Cost_{V_{EMSS}} * PV1_{EMSS}) + (Cost_{V_{EMSS}} * PV2_{EMSS}) + (Cost_{V_{EMSS}} * PV3_{EMSS}) + \\ & (Cost_{ENS_{EMSS}} * P_{NS1_{EMSS}}) + (Cost_{NS_{EMSS}} * P_{NS2_{EMSS}}) + (Cost_{ENS_{EMSS}} * P_{NS3_{EMSS}}) \end{aligned} \quad (13)$$

Entendiéndose, así como:

$Cost_{V_{EMSS}}$: Costo de vertimiento del EMS supervisorio.

$Cost_{ENS_{EMSS}}$: Costo de la energía no suministrada del EMS supervisorio.

$PV1_{EMSS}, PV2_{EMSS}, PV3_{EMSS}$: Potencia de vertimiento del EMS supervisorio de la MG 1, 2 y 3 respectivamente.

$P_{NS1_{EMSS}}, P_{NS2_{EMSS}}, P_{NS3_{EMSS}}$: Potencia no suministrada del EMS supervisorio de la MG 1, 2 y 3 respectivamente.

Planteamiento de la ecuación de balance

Para formular la ecuación de balance se identifica los datos que harán como entes de generación, es decir el EMS supervisorio tiene como entradas las potencias de vertimiento de cada MG, estas variables el optimizador global, en este nivel supervisorio se las entiende como puntos de generación, mientras que por otro lado la demanda a nivel supervisorio se reconoce a las potencias no suministradas que se dejaron aguas abajo en las MG.

Es así que la demanda (14) considerada para el EMS supervisorio está compuesta de las potencias no suministradas en las MG y añadida la potencia de generación diésel que es incluida en la microrred 3, quedado de la siguiente manera:

$$D = P_{ENS1} + P_{ENS2} + (P_{ENS3} + P_{GD3}) \quad (14)$$

Donde:

D : Demanda captada en el EMS supervisorio.

P_{ENS1} : Potencia no suministrada en la MG 1

P_{ENS2} : Potencia no suministrada en la MG 2

P_{ENS3} : Potencia no suministrada en la MG 3

P_{GD3} : Potencia de generación diésel en la MG 3

$$PV1 + PV2 + PV3 = D + PV1_{EMSS} + PV2_{EMSS} + PV3_{EMSS} - P_{ENS1_{EMSS}} - P_{ENS2_{EMSS}} - P_{ENS3_{EMSS}} \quad (15)$$

Finalmente, a la demanda se le añade las potencias de vertimiento generadas en la función objetivo y se resta las potencias no suministradas, ambas a nivel supervisorio, es así como se plantea la formulación matemática y se cumple con la ecuación de balance en el controlador EMSS, formulando de tal manera la ecuación 15.

Restricciones

Con la finalidad que se cumplan los requerimientos planteados y se lleve a cabo la coordinación de microrredes respetando la prioridad de recursos se determinan las siguientes restricciones:

De acuerdo a las ecuaciones 16, 17 y 18. Las potencias de vertimiento que se generen en el nivel supervisorio, bajo ninguna circunstancia serán mayores a las potencias de vertimiento generadas en cada microrred.

$$PV1_{EMSS} \leq PV1 \quad (16)$$

$$PV2_{EMSS} \leq PV2 \quad (17)$$

$$PV3_{EMSS} \leq PV3 \quad (18)$$

Donde:

$PV3_{EMSS}$: Potencia de vertimiento supervisorio de la MG 3.

$PV3$: Potencia de vertimiento local de la MG 3.

Las potencias de generación virtual que será enviada desde el EMS supervisorio hacia los locales no deberá superar a la diferencia entre las potencias no suministradas local y de nivel supervisorio según las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$PGV1 \leq P_{ENS1} - P_{ENS1_{EMSS}} \quad (19)$$

Donde:

$PGV1$: Potencia de generación virtual en la MG 1.

P_{ENS1} : Potencia correspondiente a la energía no suministrada de la MG 1.

$P_{ENS1_{EMSS}}$: Potencia correspondiente a la energía no suministrada de la MG 1 en el nivel supervisorio.

$$PGV2 \leq P_{ENS2} - P_{ENS2_{EMSS}} \quad (20)$$

Donde:

P_{GV2} : Potencia de generación virtual en la MG 2.

P_{ENS2} : Potencia correspondiente a la energía no suministrada en la MG 2.

$P_{ENS2_{EMSS}}$: Potencia correspondiente a la energía no suministrada de la MG 2 en el nivel supervisorio.

$$P_{GV3} \leq (P_{ENS3} + P_{GD3}) - P_{ENS3_{EMSS}} \quad (21)$$

Donde:

P_{GV3} : Potencia de generación virtual en la MG 3.

P_{ENS3} : Potencia correspondiente a la energía no suministrada en la MG 3.

P_{GD3} : Potencia de generación diesel en la MG 3.

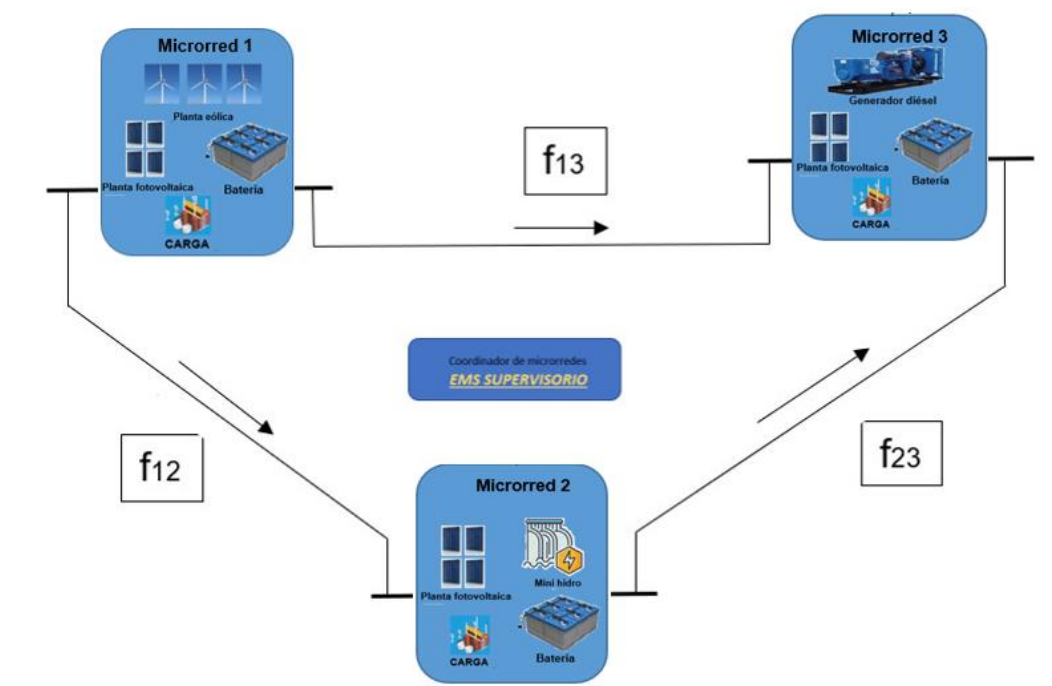
$P_{ENS3_{EMSS}}$: Potencia correspondiente a la energía no suministrada de la MG 3 en el nivel supervisorio.

Flujos de potencia para la coordinación de microrredes

Como parte complementaria de la coordinación de las microrredes participantes, se plantea analizar los flujos de potencia, para lo cual se necesita establecer las direcciones de los flujos, escribir las ecuaciones de balance de flujos, las restricciones y principalmente establecer la barra principal.

Figura 26

Coordinación de las microrredes y dirección de flujos de potencia



Nota. La gráfica muestra las direcciones de flujos en un ejemplo típico ocurrido a lo largo del tiempo en la coordinación de las tres microrredes.

En la figura 26, se plantean las direcciones de flujos a considerar para estructurar la formulación matemática. Se ha considerado un caso típico de operación al momento de coordinar las tres microrredes, es así que el flujo f_{12} sale de la MG 1 e ingresa a la MG 2, el flujo f_{13} sale de la MG 1 e ingresa a la MG 3 y por ultimo el flujo f_{23} sale de la MG 2 e ingresa a la MG 3.

Ecuaciones de balance

A continuación se muestran las ecuaciones de balance 22, 23 y 24, las cuales cumplen con las características de cada microrred, vistas desde el EMS supervisorio, donde por un lado

de la igualdad, se tiene la diferencia de potencias de vertimiento entre las locales y de nivel supervisorio que actúan como puntos de generación en el nodo más los flujos de potencia considerando los signos en función de la trayectoria, por el otro lado de la igualdad se tiene la diferencia de potencias entre las locales y de nivel supervisorio, en función del tiempo, se tiene las ecuaciones de balance de la siguiente manera:

$$[PV1(t) - PV1_{EMSS}(t)] - f_{13}(t) - f_{12}(t) = P_{ENS1}(t) - P_{ENS1EMSS}(t) \quad (22)$$

Donde:

$PV1$: Potencia de vertimiento en la MG 1.

$PV1_{EMSS}$: Potencia de vertimiento en la MG 1 en el nivel supervisorio.

f_{13} : Flujos de potencia de la línea 1-3.

f_{12} : Flujos de potencia de la línea 1-2.

P_{ENS1} : Potencia correspondiente a la energía no suministrada en la MG 1.

$P_{ENS1EMSS}$: Potencia correspondiente a la energía no suministrada de la MG 1 en el nivel supervisorio.

Las ecuaciones a continuación llevan la misma simbología que la ecuación 22, únicamente varía el subíndice que hace referencia a la microrred correspondiente.

$$[PV2(t) - PV2_{EMSS}(t)] - f_{23}(t) - f_{12}(t) = P_{ENS2}(t) - P_{ENS2EMSS}(t) \quad (23)$$

$$[PV3(t) - PV3_{EMSS}(t)] - f_{13}(t) - f_{23}(t) = P_{ENS3}(t) - P_{ENS3EMSS}(t) \quad (24)$$

Restricciones de flujo

Los flujos de potencia que se encuentran circulando por las líneas de interconexión entre las microrredes están comprendidas entre su punto máximo de flujo y el punto negativo es considerado como el negativo del punto máximo, es así que se describen las restricciones de flujo en las ecuaciones 25, 26 y 27 de la siguiente manera:

$$-\overline{f_{12}} \leq f_{12} \leq \overline{f_{12}} \quad (25)$$

$$-\overline{f_{13}} \leq f_{13} \leq \overline{f_{13}} \quad (26)$$

$$-\overline{f_{23}} \leq f_{23} \leq \overline{f_{23}} \quad (27)$$

Donde:

f_{12} : Flujo de potencia correspondiente a la línea de interconexión.

$\overline{f_{12}}$: El flujo máximo de potencia.

$-\overline{f_{12}}$: El negativo del flujo máximo de potencia.

En función del método de Newton-Raphson y las derivadas del Jacobiano se tiene las ecuaciones 28, 29 y 30, los flujos de potencia también deben ser igual a la diferencia entre el ángulo del nodo al que llega menos el ángulo del nodo de donde sale, esto dividido entre la reactancia de la línea por la que circula el flujo, teniendo las siguientes restricciones:

$$f_{12} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{X_{12}} \quad (28)$$

$$f_{13} = \frac{\theta_3 - \theta_1}{X_{13}} \quad (29)$$

$$f_{23} = \frac{\theta_3 - \theta_2}{X_{23}} \quad (30)$$

Donde:

f_{12} : Flujo de potencia correspondiente a la línea de interconexión.

θ_2 : Angulo del voltaje correspondiente a la barra de llegada.

θ_1 : Angulo del voltaje correspondiente a la barra de salida.

X_{12} : Reactancia de la línea comprendida entre la barra de salida y llegada.

Identificada el nodo 1 como barra principal o más conocida como barra slack, se considera el ángulo de cero para este nodo $\theta_1 = 0$, es así que los demás ángulos están comprendidos de la siguiente manera:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta_2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (32)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \theta_3 \leq \frac{\pi}{2} \quad (33)$$

Capítulo V

Análisis de resultados

En el presente capítulo, se detallan los resultados obtenidos en cada una de las microrredes operando de forma aislada como también al operar coordinadamente mediante la implementación del EMS supervisorio, además de la operación con restricción de flujo de las líneas de interconexión.

Resultados de operación de las microrredes operando en modo isla.

Operación microrred 1

La microrred 1 se encuentra operando de forma aislada y se autoabastece mediante las fuentes de energías renovables que posee, según se muestra en la figura 27, el abastecimiento energético cubre todo el perfil de demanda que existe en dicha localidad, esta demanda está comprendida entre 30 a 70 kW, para ello se identifica el perfil exterior que se forman entre la unión de las curvas lo cual representa la demanda total, es así que la MG 1 inicia el día abastecido con toda la energía eólica disponible y en pequeña cantidad de las baterías para cubrir la carga.

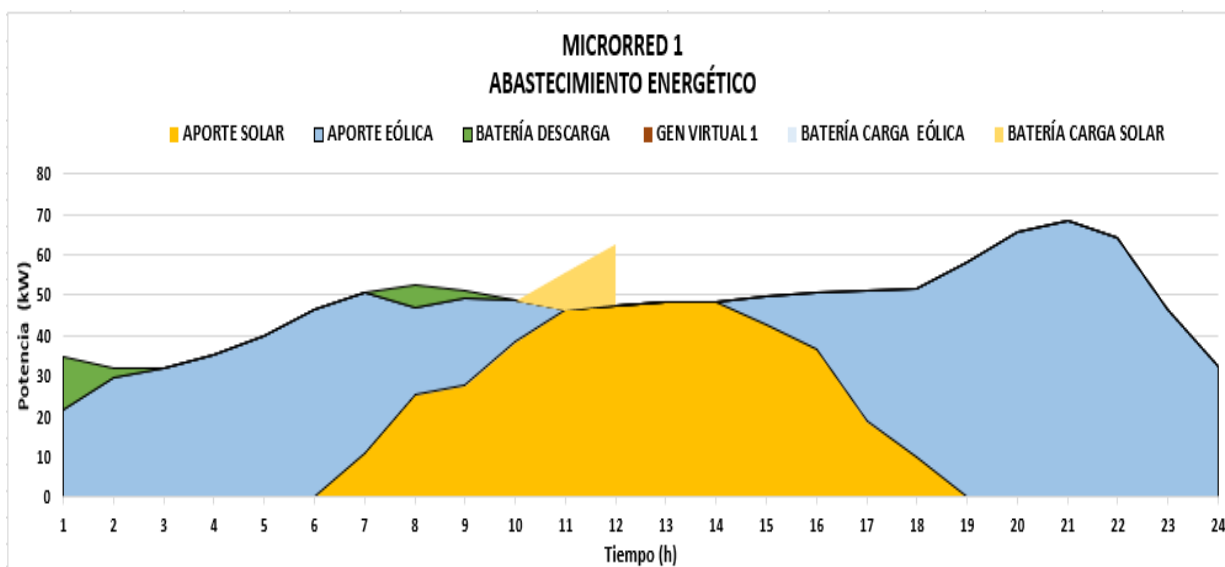
En el transcurso de la mañana el aporte eólico tiende a disminuir, pero se comienza a aprovechar la energía proveniente del sol, es así que desde aproximadamente las 7 am hasta las 18 pm, siendo al medio día el mayor aprovechamiento energético solar, se a dejado de abastecer con energía eólica, debido a la configuración de diseño, el cual establece que mientras exista energía solar, esta sea aprovechada en su totalidad y ocupa el primer puesto de prioridad en abastecimiento energético.

Conforme avanza el atardecer disminuye el aporte de energía solar y se empieza aprovechar nuevamente la energía eólica ya que mantiene un puesto de prioridad 2 y cuando aún así no se logre cubrir la demanda, el EMS local permite la descarga de baterías que ocupan el tercer puesto en abastecimiento.

Se observa un pico en la curva entre las 10 a 12 del día, este incremento de abastecimiento representa la carga de las baterías, ya que en el transcurso de la mañana fueron descargadas y se vuelven a cargar automáticamente apenas exista un excedente de energía en la microrred, es así que se prioriza la cargada de baterías y posterior a ello se produce el efecto de vertimiento.

Figura 27

Abastecimiento energético de la MG 1 operando en modo isla.



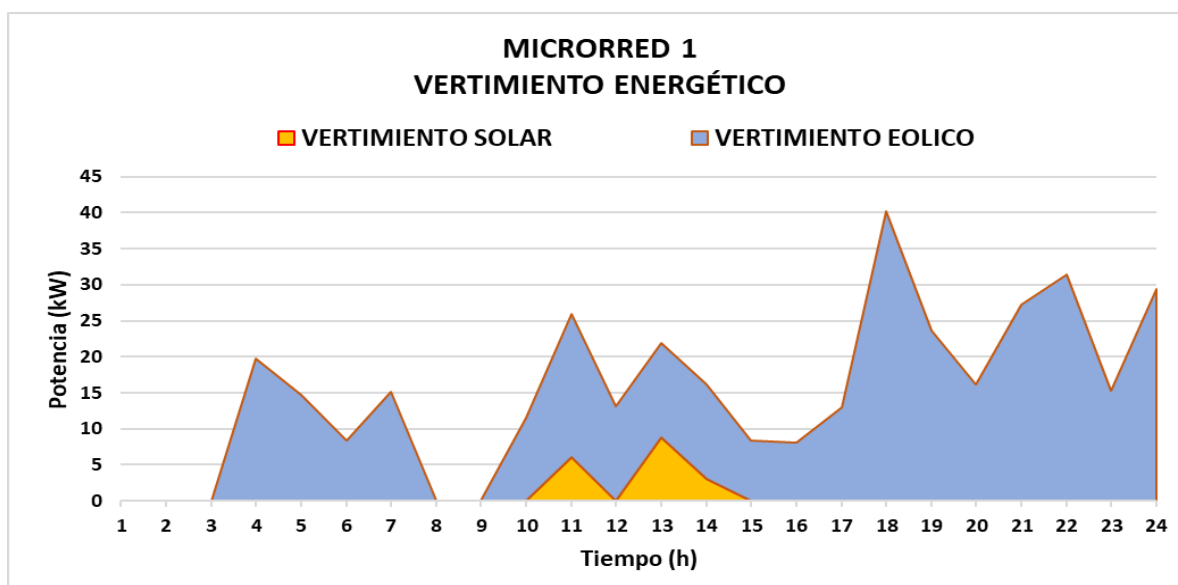
Nota. La gráfica muestra el abastecimiento energético correspondiente a la microrred 1, esta se encuentra autoabastecida y operando en modo isla.

Una vez cubierto el perfil de demanda, la energía excedentaria se convierte en vertimiento, el cual inicialmente era desaprovechado y actualmente es de gran importancia para el EMS supervisorio.

En la figura 28 se muestra el vertimiento energético correspondiente a la microrred 1, básicamente representa la potencia en kW que no se ocupa en la MG, esta potencia se presenta de forma variada a lo largo del día y procedente de dos fuentes, vertimiento eólico y vertimiento solar. Siguiendo la imagen se aprecia que el vertimiento eólico predomina en esta MG ya que el recurso en esta temporada es más abundante, por otro lado, el vertimiento solar únicamente se evidencia en pequeñas cantidades al medio día, cabe resaltar que este vertimiento es menor debido a que el abastecimiento solar es aprovechado prioritariamente para cubrir la demanda como se observó en la figura 27.

Figura 28

Vertimiento energético de la MG 1 operando en modo isla.



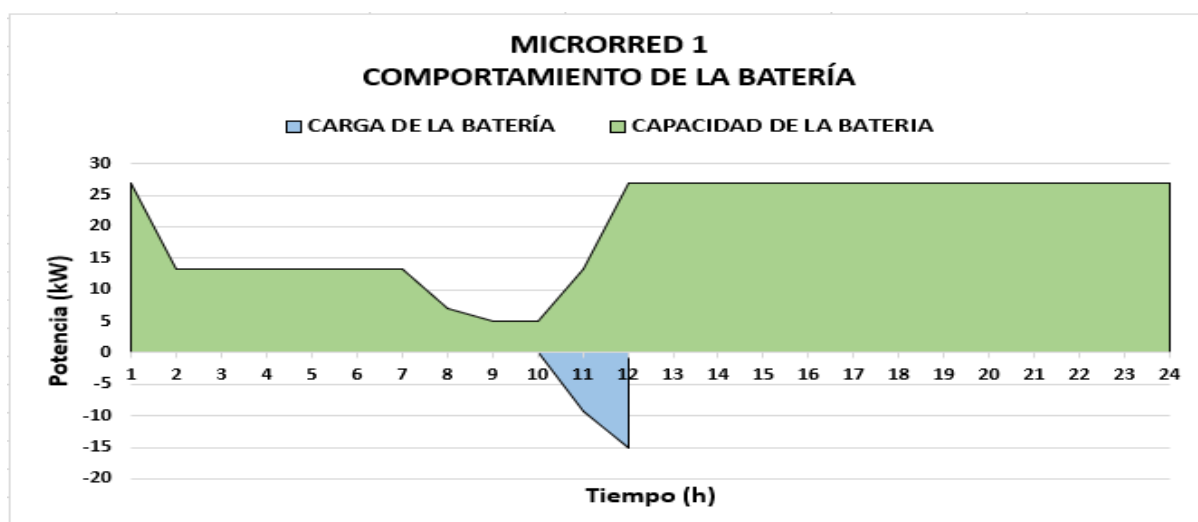
Nota. La gráfica muestra el vertimiento energético correspondiente a la microrred 1, esta se encuentra autoabastecida y operando en modo isla.

Las baterías son una parte fundamental dentro de la MG, estas cubren los picos de demanda cuando no se logra cubrir con las fuentes solar o eólica. En la figura 29, se observa el comportamiento de la batería para la microrred 1, el cual está representado en kW y se evidencia como es el comportamiento de carga y descarga en función del abastecimiento que brinde al perfil de demanda.

La parte de color celeste de la gráfica muestra el estado de carga de la batería, estos picos aparecen justo después de cumplir la descarga y en función de la disponibilidad de recurso energético se cargan inmediatamente para estar listas para una nueva descarga.

Figura 29

Comportamiento de la batería de la MG 1 operando en modo isla.



Nota. La gráfica muestra el comportamiento de la batería correspondiente a la microrred 1, esta se encuentra autoabastecida y operando en modo isla.

Operación microrred 2

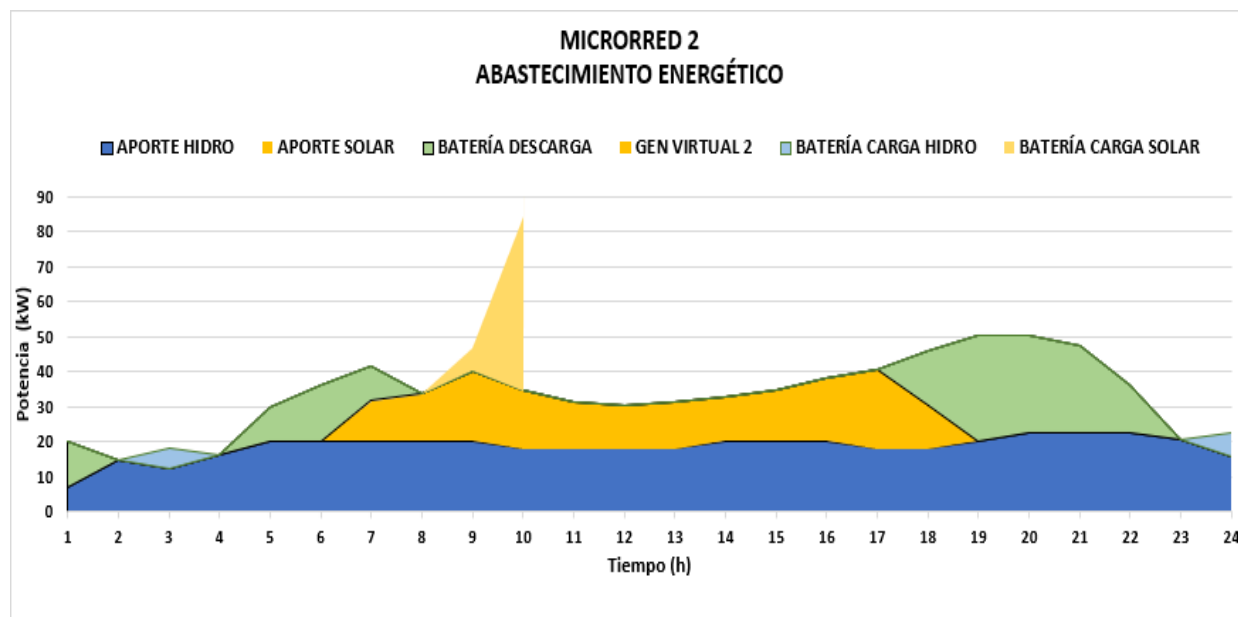
La microrred 2 también se encuentra operando inicialmente de forma aislada, según se muestra en la figura 30, el abastecimiento energético cubre todo el perfil de demanda que

existe en dicha localidad, esta demanda está comprendida entre 15 a 50 kW, para ello se identifica el perfil exterior que se forman entre la unión de las curvas lo cual representa la demanda total, a excepción de la curva de carga de batería ya que es tomada en cuenta como abastecimiento pero no forma parte del perfil de demanda de la MG, es así que la MG 2 se mantiene todo el día aprovechando el recurso hidro disponible y en algunas ocasiones se utiliza la descarga de las baterías para cubrir los picos de demanda.

En el transcurso de la mañana se disminuye el aporte de las baterías para dar prioridad de uso a la energía proveniente del sol, es así que desde aproximadamente desde las 6 am hasta las 18 pm, siendo al medio día el mayor aprovechamiento energético solar, se deja de utilizar las baterías y más bien se aprovecha el excedente para volver a cargarlas según la configuración de diseño.

Figura 30

Abastecimiento energético de la MG 2 operando en modo isla.



Nota. La gráfica muestra el abastecimiento energético correspondiente a la microrred 2, esta se encuentra autoabastecida y operando en modo isla.

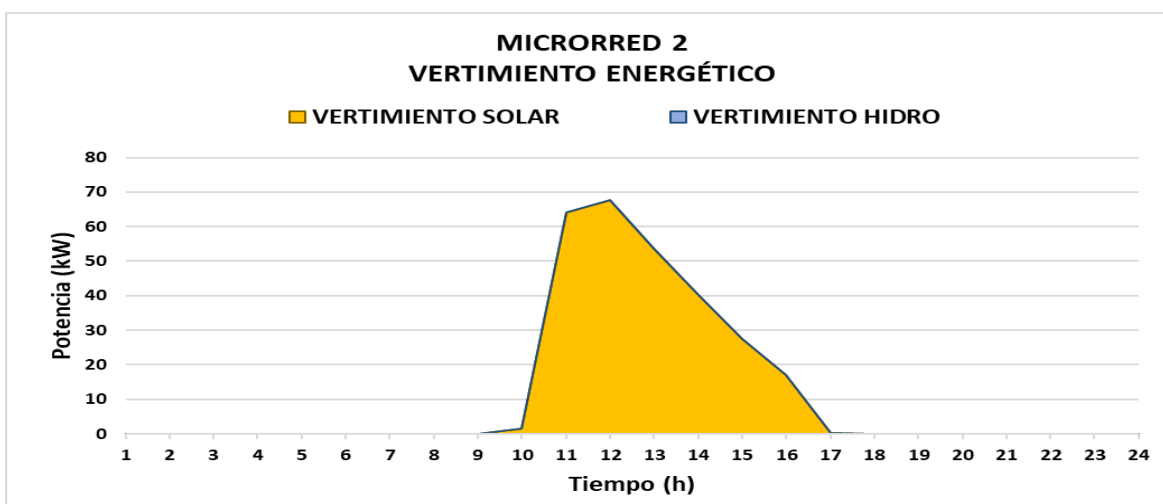
Conforme avanza el atardecer disminuye el aporte de energía solar y se empieza aprovechar nuevamente la energía almacenada en las BESS, entre las 18 a 23 pm se tiene un gran apoyo por parte de las baterías ya que la demanda es alta y el aprovechamiento hidro apenas llega a los 20 kW.

Se observan tres etapas de carga de las BESS, la primera es a las 3 am y se almacena energía proveniente de la fuente hidro, mientras que de 9 a 10 am se aprovecha la energía solar excedentaria y la tercera se presenta al final del día con energía hidro.

En la figura 31, se muestra el vertimiento energético correspondiente a la MG 2, esta potencia sobrante expresada en kW únicamente se presenta entre las 10 am hasta las 16 pm, en esta microrred únicamente se tiene vertimiento solar debido a la abundancia del recurso en esta época, no se cuenta con más vertimientos ya que la energía hidro es de mayor prioridad de aprovechamiento y lo mínimo que se tiene como excedente se utiliza en la carga de baterías.

Figura 31

Vertimiento energético de la MG 2 operando en modo isla.

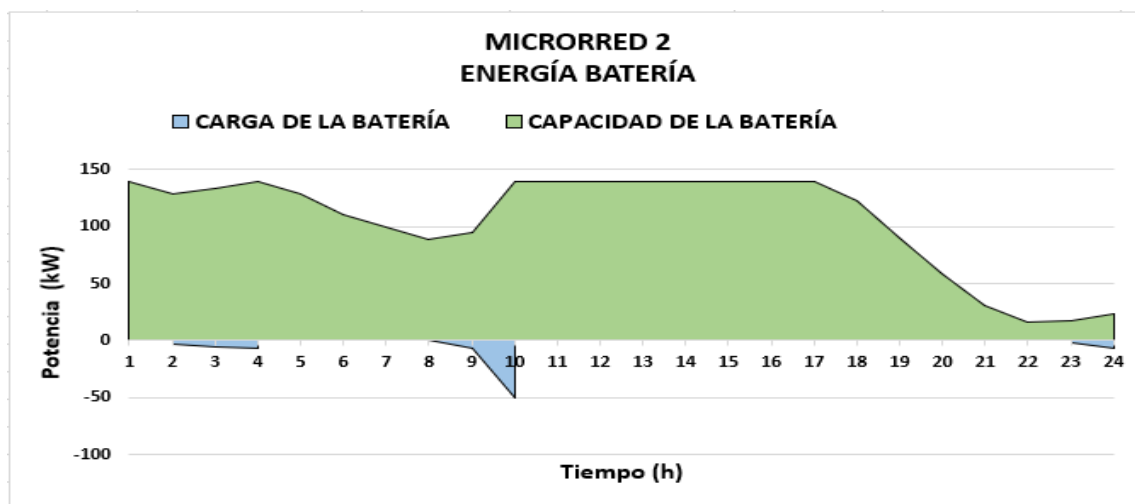


Nota. La gráfica muestra el vertimiento energético correspondiente a la microrred 2, esta se encuentra autoabastecida y operando en modo isla.

Las baterías en la MG 2 inicialmente están cargadas y de acuerdo a la necesidad del perfil de demanda estas actúan mediante órdenes del EMS local. Según se observa en la figura 32, se presentan tres comportamientos de descarga, 2 al inicio y transcurso de la mañana y una en el pico de demanda de la noche, también se observa las zonas de color azul, las cuales muestran la carga o almacenamiento de energía consecutivamente de haber sido utilizadas, esto se da en función de las restricciones de diseño, las cuales establecen que las BESS deben estar lo mejor cargadas posibles y listas para la próxima descarga. Al final del día no aplica esta restricción ya que al considerarse el fin del análisis el optimizador entiende que ya no hay más allá de eso, y utiliza al máximo las baterías sin importar que queden descargadas.

Figura 32

Comportamiento de la batería de la MG 2 operando en modo isla.



Nota. La gráfica muestra la energía de las BESS correspondiente a la microrred 2.

Operación microrred 3

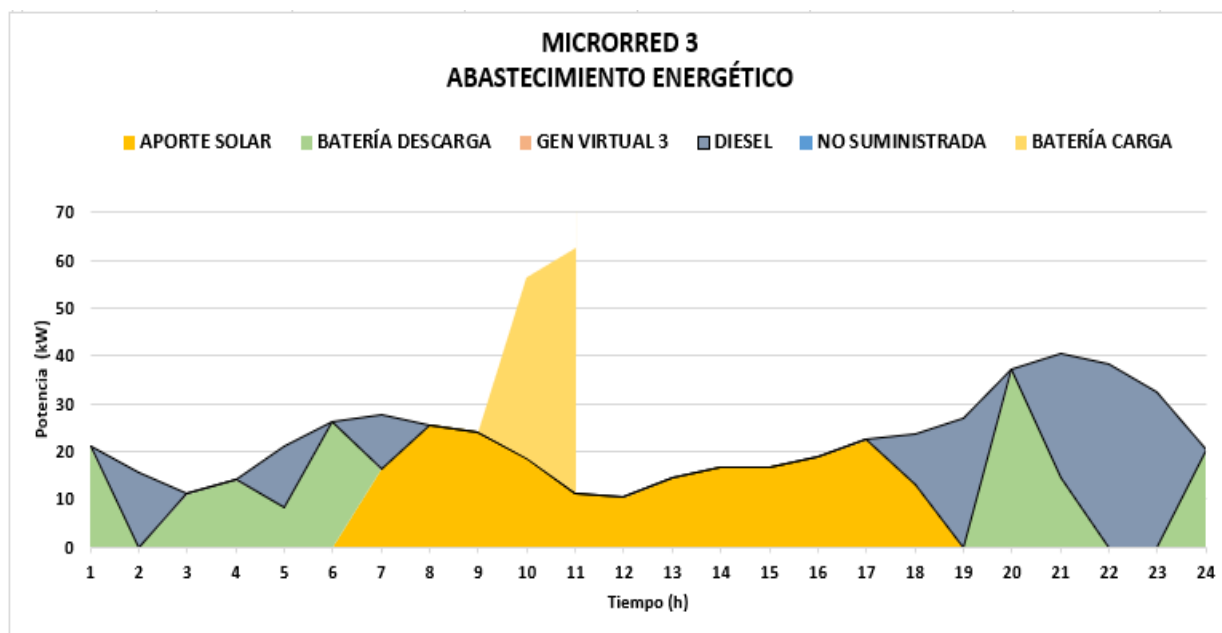
La MG 3 al igual que las microrredes vecinas, se encuentra operando inicialmente de forma aislada, según se muestra en la figura 33, el abastecimiento energético cubre todo el perfil de demanda que existe en dicha localidad.

La demanda está comprendida entre 10 a 40 kW, para ello se identifica el perfil exterior que se forman entre la unión de las curvas lo cual representa la demanda total a excepción de la curva de carga de batería ya que es tomada en cuenta como abastecimiento, pero no forma parte del perfil de demanda de la MG.

La MG 3 es autoabastecida en su totalidad a un gran costo, ya que al tener como fuente renovable únicamente la energía solar, es más propensa a tener usuarios sin suministro de energía eléctrica, para evitar esos casos, cuenta con una fuente de energía a base de diésel, esta fuente apoya varias veces a lo largo de la mañana y noche, como resultado al abastecimiento energético en esta microrred es muy alto y contaminante.

Figura 33

Abastecimiento energético de la MG 3 operando en modo isla.



Nota. La gráfica muestra el abastecimiento energético correspondiente a la microrred 3.

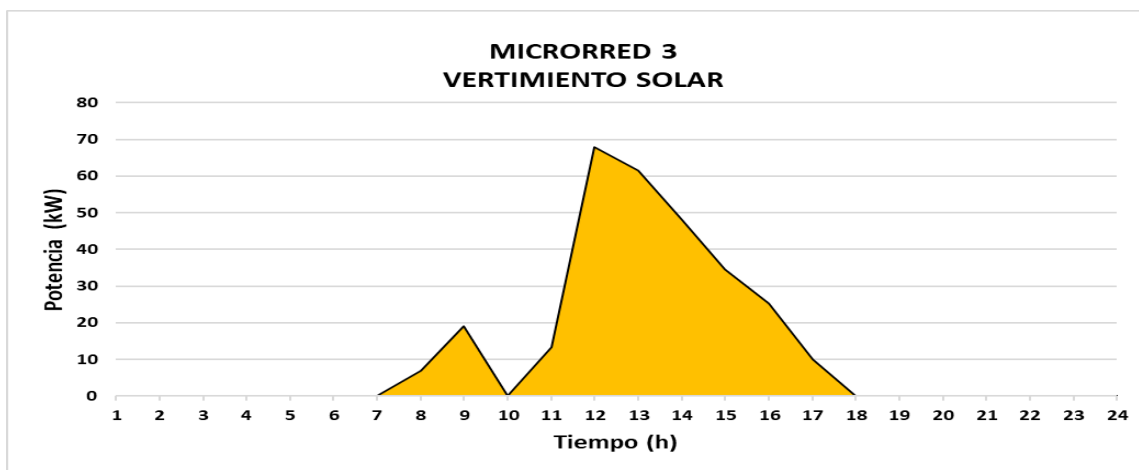
Continuando en la gráfica, se observa de color verde la entrega de energía por parte de las baterías y de color azul el encendido del generador diésel para cubrir la demanda, es así

que se tiene 3 aportes de energía a base de diésel en la mañana y dos aportes de gran importancia en la noche, entre las 7 am hasta las 18 pm se aprovecha al máximo la radiación solar ya que se tiene como primera prioridad en el abastecimiento, seguido está el uso de las BESS.

En la figura 34 se muestra el vertimiento solar correspondiente a la MG 3, esta potencia en kW se presenta únicamente entre el medio día ya que es donde se aprovecha al máximo a energía solar y se vierte una vez se haya cargado las baterías.

Figura 34

Vertimiento energético de la MG 3 operando en modo isla.



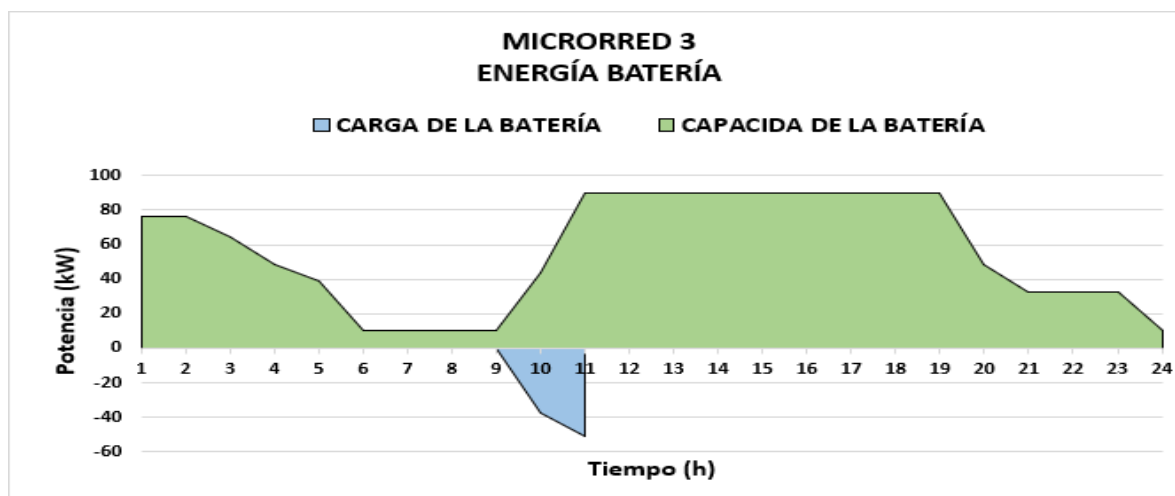
Nota. La gráfica muestra el vertimiento solar correspondiente a la microrred 3.

El uso de las BESS es más fuerte en esta MG, debido a que no se cuenta con otra energía renovable que ayude a cubrir la demanda en horas de la mañana y noche tal como se muestra en la figura 35, donde la curva verde muestra como la batería tiene su mayor descarga a las 2 am, 5 am y 7 am donde llega a los 10kW de potencia, valor configurado como el mínimo de potencia admisible, posteriormente se vuelve a almacenar a su máxima capacidad de 90 kW

entre las 11 am para finalmente terminar el día descargando toda su energía por ser de segunda prioridad en el abastecimiento energético de la microrred.

Figura 35

Comportamiento de la batería de la MG 3 operando en modo isla.



Nota. La gráfica muestra el comportamiento de la batería correspondiente a la microrred 3.

Resultados de operación con la implementación del EMS supervisorio

Una vez implementado el sistema de gestión óptima de la energía EMS supervisorio, las tres microrredes operan coordinadamente, esto significa que el optimizador local de cada MG está compartiendo la información con el optimizador global o supervisorio.

Los resultados obtenidos después de la coordinación se enfocan netamente en la microrred 3, ya que es quien presentaba inestabilidad en el abastecimiento energético, hacia uso de gran cantidad de combustible para cubrir su demanda, es así que las dos microrredes restantes no sufrieron cambio en su operación ya que al autoabastecerse con energías limpias y a su vez entregar una buena cantidad de vertimiento energético no altero ninguna de sus curvas de abastecimiento.

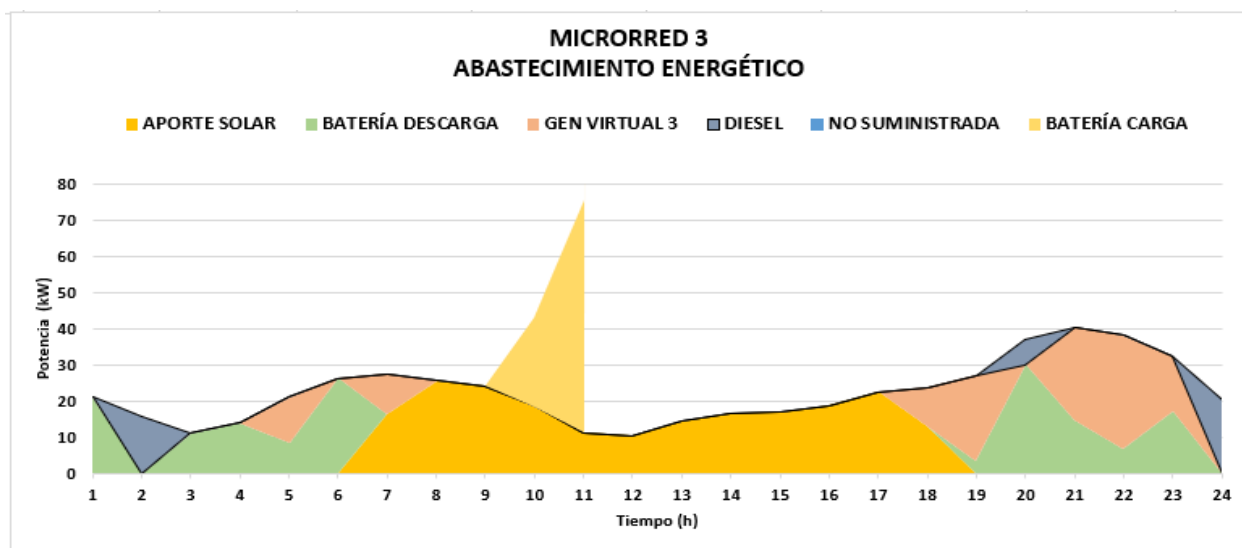
A continuación, se muestra el resultado de la MG 3, quien si presento variaciones en sus curvas de abastecimiento, vertimiento y comportamiento de las BESS.

Cambios de operación en la microrred 3

Conforme se puede apreciar en la figura 36, se tiene el abastecimiento energético de la microrred 3 después de la coordinación y optimización comandada por el EMS supervisorio o global. Siguiendo la gráfica, se observa como ingreso el aporte de generación virtual representado en color rosa, proveniente de las microrredes vecinas, es así que gracias al vertimiento que entregan las MG excedentarias la microrred deficitaria la puede aprovechar y disminuir el uso de generadores a base de combustibles fósiles o erradicar la energía no suministrada.

Figura 36

Abastecimiento energético de la MG 3 operando en coordinación.



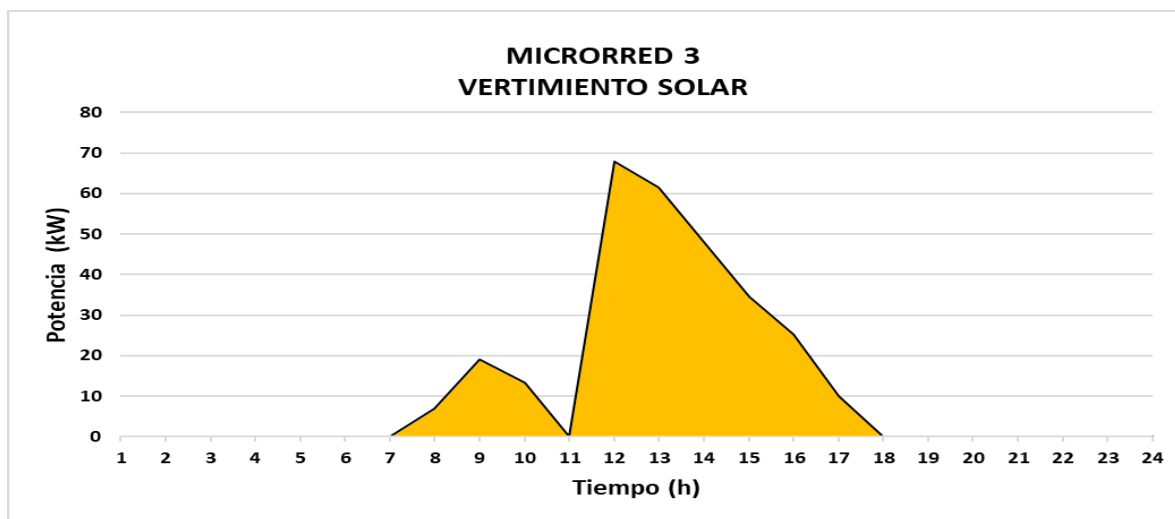
Nota. La gráfica indica los cambios que experimento la microrred 3 correspondiente al abastecimiento energético, después de la implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

Realizando un análisis comparativo con la figura 33 mostrada anteriormente, la cual corresponde al abastecimiento energético de la MG 3 operando en modo isla, se puede identificar claramente como en la figura 36 el uso del diésel es sustituido por el aporte virtual, este cambio es notorio entre las horas 4 am hasta las 7 am y en horas de la noche desde las 18 pm hasta las 23 pm. Este nuevo efecto de abastecimiento se logra en función del diseño del EMS supervisorio, ya que se estableció que al aporte virtual sea prioritario por encima del uso de las BESS y del generador diésel.

El pico más alto que se aprecia entre las 11 am representa la carga de las baterías, actualmente existe un mayor aprovechamiento energético alcanzando unos 75 kW de potencia activa que se almacena, mientras que anteriormente en la operación modo isla de la MG se alcanzaba a los 60 kW.

Figura 37

Vertimiento energético de la MG 3 operando en coordinación.



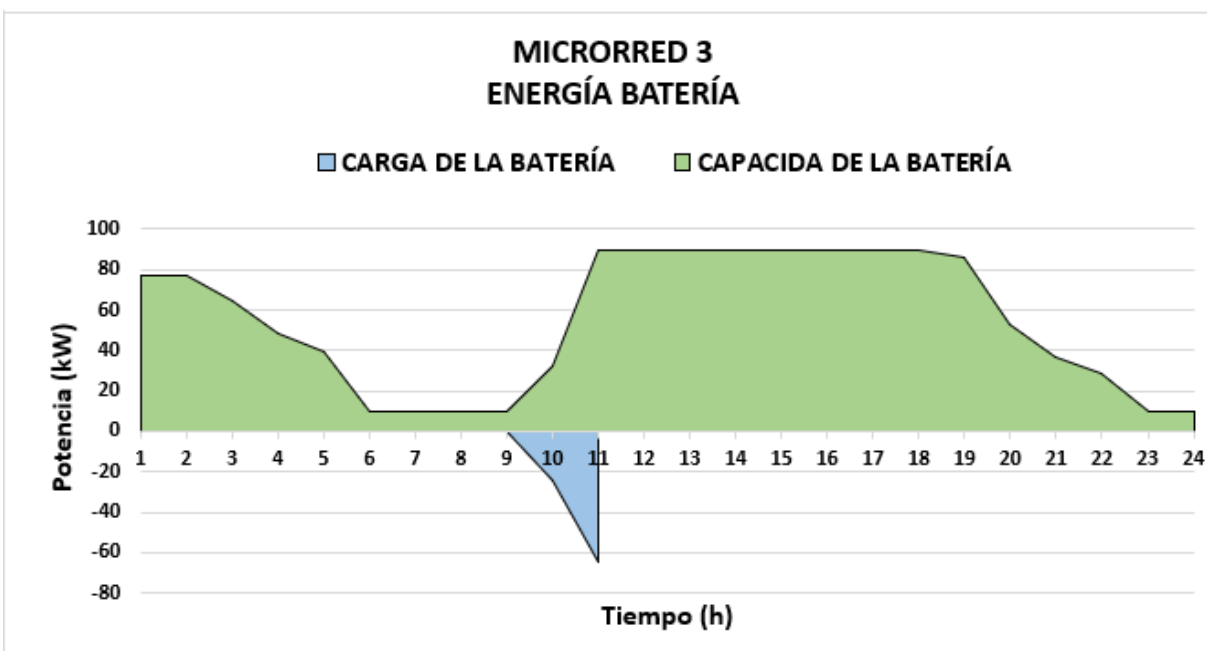
Nota. La gráfica indica los cambios que experimento la microrred 3 correspondiente al vertimiento solar, después de la implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

El vertimiento de la MG 3 generalmente se mantiene, existe un mínimo cambio en su comportamiento como se muestra a continuación en la figura 37. Existe una leve reducción de vertimiento entre las 9 am a 10 am, esto debido a que se permitió un mayor almacenamiento en las BESS.

Una vez completada la etapa de carga de baterías, se presenta íntegramente el vertimiento de energía proveniente del recurso solar, ya que en las horas del mediodía todas las microrredes se encuentran excedentarias de energía, para el caso de la MG 3 llega a alcanzar un vertimiento máximo de 68 kW de potencia activa.

Figura 38

Comportamiento de la batería en la MG 3 operando en coordinación.



Nota. La gráfica indica los cambios que experimento la microrred 3 correspondiente al comportamiento de las BESS, después de la implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

En la figura 38 se encuentra el comportamiento de la BESS correspondiente a la MG 3, el comportamiento de la batería no sufre un cambio alguno en el transcurso del día sino hasta las 18 pm, donde inicia su segunda etapa de descarga, pero su aporte al abastecimiento general de la microrred es paulatinamente suave en comparación cuando operaba de forma aislada y su descarga era más rápida.

Es así que al operar de forma coordinada con las microrredes vecinas se logra un mejor aprovechamiento de energía para almacenar en las BESS y a su vez permitirles tener tiempos de alivio o descanso cuando ingresa el aporte de energía de las microrredes excedentarias.

Resultados de flujos de potencia

De acuerdo a la metodología utilizada con respecto a las direcciones de flujos potencia mostradas anteriormente en la figura 26, se obtienen los resultados mostrados gráficamente a continuación en la figura 39.

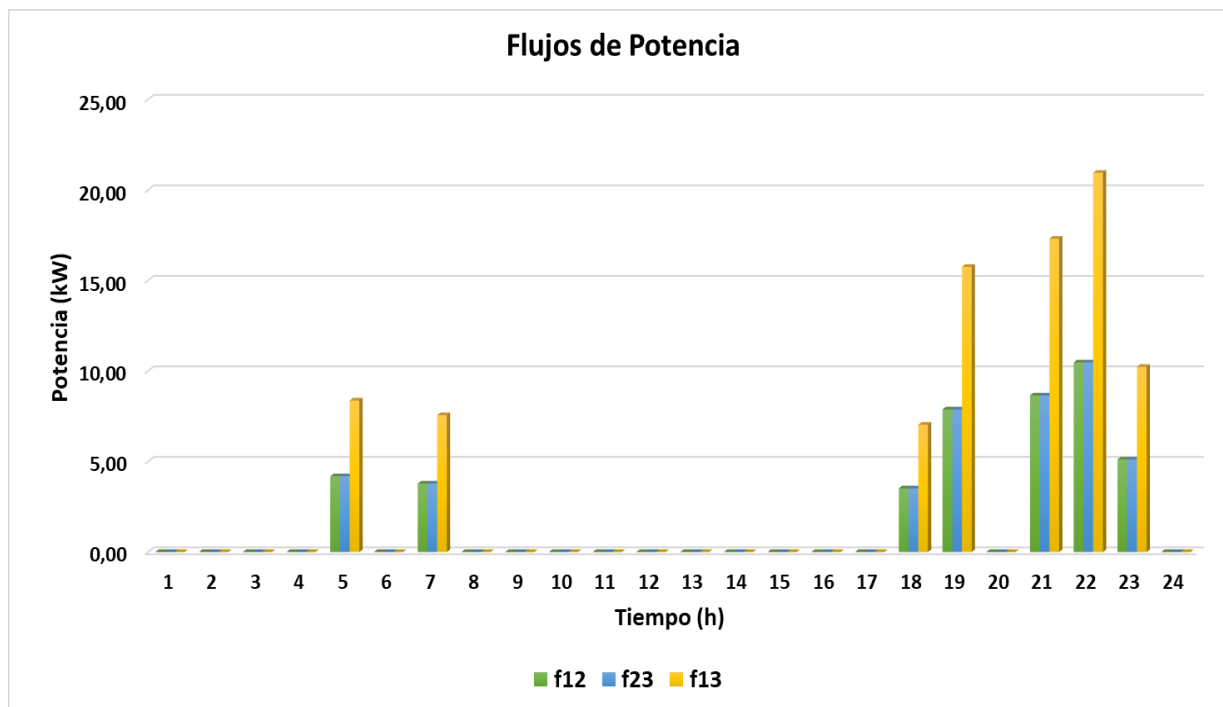
Con la gráfica de flujos de potencia se corrobora los resultados de abastecimiento energético de la figura 36 mostrados en la sección anterior, es así que se establece que las microrredes 1 y 2 aportaron con energía a la microrred 3 en varias ocasiones en el transcurso del día.

Siguiendo la gráfica de barras de la figura 39, en el primer aporte, se entiende que a las 5 am llego aproximadamente 12 kW de potencia activa, de los cuales 8 kW llegaron directamente desde la MG 1 hacia la MG 3 por medio de la línea 1-3 y los 4 kW restantes llegaron a la MG 3 desde la MG 1 pasando por la línea 1-2 y continuando su paso por la línea 2-3, utilizando el nodo de la MG 2 como segunda vía para el transporte de energía.

Es así como se repite los aportes de energía a la 7 am y de 18 pm hasta las 23 pm, utilizando las diferentes direcciones de flujos para llegar a la microrred deficitaria.

Figura 39

Resultados de flujos de potencia para la coordinación de microrredes.



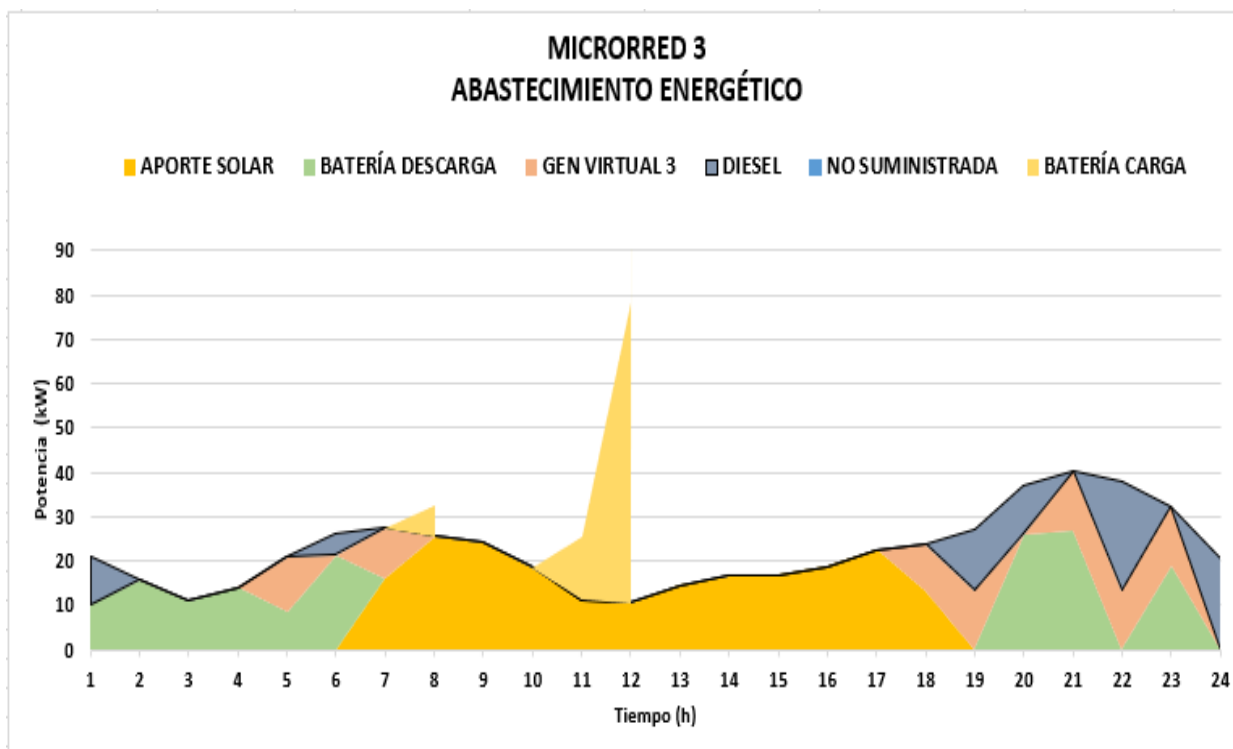
Nota. La gráfica indica los resultados de ejecución de los flujos de potencia, después de la implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

Resultados con restricción de flujos de potencia

En la figura 40 se da a conocer el abastecimiento energético de la microrred 3 restringiendo la capacidad de sus líneas de interconexión entre microrredes, es así que las potencias de aporte que llegarán a la MG 3 se verán limitadas y se verán obligadas a encender el generador diésel para completar sus picos de demanda.

Figura 40

Abastecimiento energético de la MG 3 con restricción de flujos de potencia.

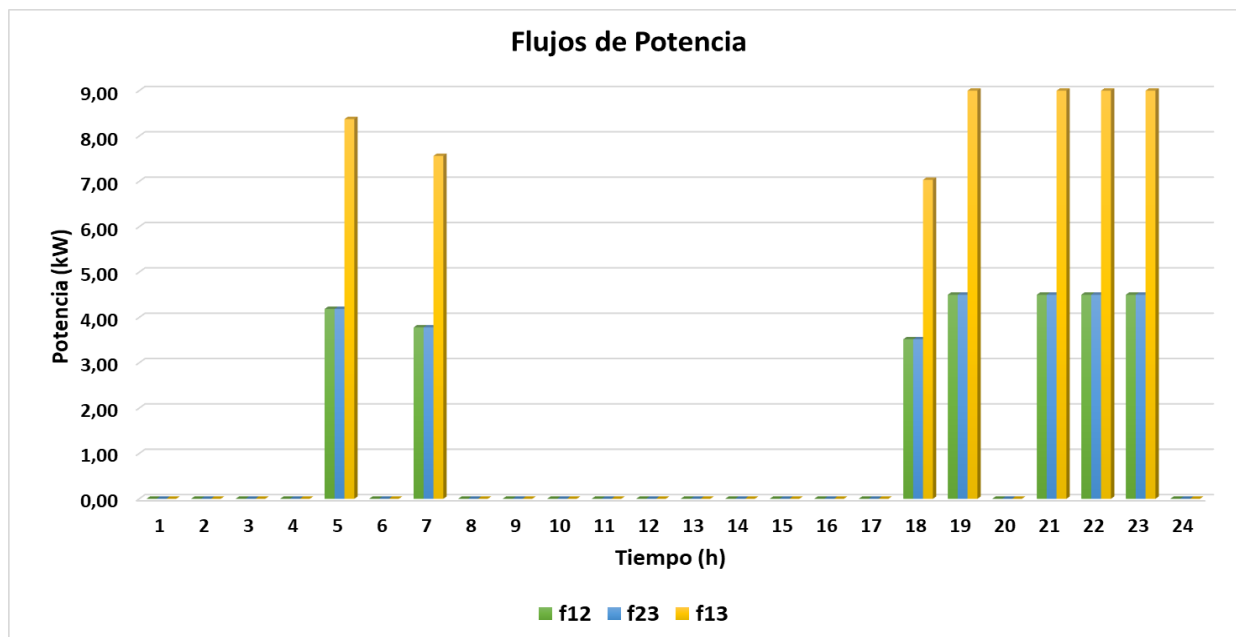


Nota. La gráfica indica el abastecimiento energético de la microrred 3 mediante la implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

Según se aprecia en la imagen, con color rosa se entiende que llega energía mediante la generación virtual hacia la MG 3, pero a su vez de color azul se estima que los generadores obligadamente se tuvieron que encender para cubrir la demanda en vista de que las baterías ya no tienen almacenado suficiente energía.

Figura 41

Resultados con restricción de los flujos de potencia.



Nota. La gráfica indica los resultados de ejecución de los flujos de potencia con restricción en sus líneas e implementación del sistema de gestión óptima EMS supervisorio.

Al encontrarse restringidas las capacidades de las líneas por donde comparten la potencia activa las microrredes, los flujos de potencia alcanzan la máxima capacidad, según se muestra en la figura 41, los flujos de potencia bordean los 9 kW en las líneas 1-3, al verse limitada la capacidad de intercambio de energía la MG se ve obligada a hacer uso de otras fuentes de energía como son la de combustibles fósiles.

Costos de operación

En las siguientes tablas se muestra la diferencia entre los costos de operación de los casos en estudio. Para lo cual se analiza el costo de operación en forma aislada, la operación en forma coordinada con otras microrredes y la operación con restricción de flujos.

Tabla 6*Costo de operación de forma aislada*

Microrred	Costo de generación (\$)	Costo ENS (\$)	Costo total (\$)
MG 1	0,00	0,00	0,00
MG 2	0,00	0,00	0,00
MG 3	160,82	0,00	160,82

Nota. La tabla indica los costos de operación para cada MG operando de forma aislada.

Conforme se indica en la tabla 6, la MG 3 es la única que realmente representa un costo de operación operando de forma aislada con \$160, 82 en un día. Las otras microrredes operativamente no reflejan un costo alguno ya que las principales fuentes de generación eléctrica son provenientes de energías renovables.

Tabla 7*Costo de operación de forma coordinada*

Microrred	Costo de generación (\$)	Costo ENS (\$)	Costo total (\$)
MG 1	0,00	0,00	0,00
MG 2	0,00	0,00	0,00
MG 3	56,13	0,00	56,13

Nota. La tabla indica los costos de operación para cada MG operando de forma coordinada, mediante la implementación del sistema de gestión EMS supervisorio.

Es representativo el costo de operación en la MG 3 operando de forma coordinada, es decir está abasteciendo su demanda bajo el accionar del EMS supervisorio. Según se observa en la tabla 7, el costo de operación de la MG 3 se a reducido notablemente un 51,3 %, al

reflejar un valor de \$ 56,13 en el día de análisis, esto debido a que se redujo el uso del diésel y fue reemplazado por energías renovables provenientes de las microrredes vecinas.

Tabla 8

Costo de operación con restricción de flujos

Microrred	Costo de generación (\$)	Costo ENS (\$)	Costo total (\$)
MG 1	0,00	0,00	0,00
MG 2	0,00	0,00	0,00
MG 3	70,43	0,00	70,43

Nota. La tabla indica los costos de operación para cada MG con restricción en sus líneas.

La diferencia de costos es reiterada en la MG3 según se observa en la tabla 8, primordialmente en el costo de generación, identificándose un ligero aumento del 8.62% al limitar el flujo de las líneas, deduciendo así que no es conveniente tener las líneas muy limitadas al momento de limitar el conjunto de MG ya que restringe el intercambio de energía y obliga al uso de generadores a base de combustibles fósiles.

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se desarrollo una metodología que aporta información sobre el comportamiento de las diferentes fuentes de energía disponibles en zonas remotas, considerando la demanda eléctrica de los domicilios y almacenamiento en las BESS para obtener el mayor aprovechamiento de los recursos que nos permite la correcta coordinación de las microrredes aisladas, con la metodología propuesta se puede gestionar la tecnología de cada microrred para obtener el comportamiento deseado.
- Se diseño un sistema de gestión óptima de la energía EMS local para cada microrred operando en modo isla, para lo cual se gestionó la energía disponible para cada microrred de forma independiente, mediante la formulación de ecuaciones de balance tomando en cuenta que las microrredes utilizan un sistema de almacenamiento con control de carga y descarga, logrando cubrir todo el perfil la demanda de las localidades, para el primer caso de estudio se concluye que la energía renovable disponible en el sector junto con las baterías, abastece en su totalidad estas demandas, mientras que la microrred 3 logra cubrir la demanda requerida mediante el aporte de generación a base de diésel en horas de la noche y madrugada, alcanzando los 173,80 kW de potencia activa generada en las 24 horas, representando un costo de generación de \$ 160,82.
- Mediante la implementación del sistema de gestión de la energía EMS supervisorio, se alcanzó una óptima coordinación entre las MG participantes, lo cual se vio reflejado en el aporte de energía por parte de las microrredes excedentarias hacia la MG deficitaria, es así que a lo largo del día la MG 1 y 2 entregaron un total de 130,82 kW a la MG 3 por medio de la llamada generación virtual, mientras que el generador diésel únicamente genero 42,9 kW

en todo el día, lo cual representa una disminución del 75,26 % de potencia activa proveniente de fuentes de energías contaminantes y de alto costo.

- Con la reducción del costo de generación en la MG 3, las localidades se ahorran cerca de \$ 104,69 al día, reflejando un ahorro anual promedio de \$ 38.211,85, dinero que puede ser aprovechado para mejorar la infraestructura eléctrica y otros servicios básicos. Además del ahorro económico se puede tener beneficios como: reducción del uso de fuentes de energía no renovable, reducción de la energía no suministrada principalmente en lugares de difícil acceso, obtener un mayor aprovechamiento de energías amigables con el medio ambiente y, por último, que la implementación de este sistema sería económicamente viable.
- Mediante la ejecución de flujos de potencia en la interconexión de las microrredes, se validó la correcta coordinación y ejecución del EMS supervisorio, es así que se logra obtener una nueva perspectiva del funcionamiento más apegada a la realidad, unos de los comportamientos más visibles de los flujos es cuando el 50% de la energía de aporte o generación virtual se dirige directamente de la MG 1 a la MG 3 por medio de la línea 1-3 y el 50 % restante se dirige por la vía más larga, es decir haciendo paso por la barra de la MG 2, además al ejecutar limitaciones de flujo en las líneas de interconexión se obtiene como resultado el redireccionamiento de las mismas al ser un circuito cerrado.

Recomendaciones

- Para la selección de las fuentes de energía participes dentro de cada MG, se recomienda seleccionar localidades donde cuenten con recursos energéticos renovables cercanas al lugar de estudio, facilitando a su vez la planificación y recolección de datos históricos provenientes de fuentes confiables.
- Debido a la alta exigencia de optimización que se lleva a cabo para el diseño de los sistemas de gestión, se recomienda adquirir una licencia apropiada para proyectos de gran alcance, con el fin de obtener mejores beneficios y aprovechar las funciones de optimización y despacho económico de microrredes.
- Identificar correctamente los outputs de las microrredes locales y renombrarlas como inputs del EMS supervisorio para plantear las ecuaciones de balance, objetivo y restricciones.
- Establecer una variable auxiliar que actúe como enlace de comunicación entre los EMS locales y el EMS supervisorio, la cual permita llevar la información de generación virtual necesaria en la MG deficitaria.
- Se recomienda corroborar los resultados obtenidos con otro tipo de metodología, obteniendo resultados confiables y nuevas perspectivas de solución a la problemática planteada.
- Para trabajos futuros enfocados en la coordinación de microrredes aisladas, se recomienda realizar estudios de distribución, coordinación de protecciones, lo cual permitirá una visión más clara de las exigencias de interconexión.

Bibliografía

- Alfredo Sánchez Silvera, J. G. (2021). *Sistemas de gestión de energía descentralizado basado en multiagentes para la operación de múltiples microrredes*. Colombia: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.
- Álvarez, B., & Ocapana, N. (2015). *OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL GAS ASOCIADO PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN EL CAMPO SINGUE-BLOQUE 53 OPERADO POR LA COMPAÑÍA GENTE OIL ECUADOR PTE. LTD.* Universidad Central del Ecuador.
- ARCERNNR. (2020). *AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES*. Obtenido de Fuentes de energías renovables en el Ecuador.
- ARCERNNR-002/21. (2021). *Regulación: Calidad del servicio de distribución y comercialización*. Quito: AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ENERGÍA Y RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES.
- ARCONEC. (2015). *Inventario de recursos energéticos del Ecuador*. Quito: Agencia de regulación y Control de la Electricidad.
- Bach, J., & De la Torre, A. (2017). *Helio Esfera*. Obtenido de Irradiancia, Irradiación y radiación solar: <https://www.helioesfera.com/>
- Banco Mundial. (13 de Julio de 2020). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Bordons, C., Félix, G., & Valverde, L. (2015). *ScienceDirect*. Obtenido de Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable: <https://core.ac.uk/download/pdf/250238958.pdf>
- Calle, M., & Gomez, J. (2017). *Energías renovables-Hidroeléctrica*. Waste Magazine.

- Cataño, F. A., & Leal, J. C. (2018). *Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas*. Colombia: Universidad Autónoma del Occidente.
- CENACE. (02 de Agosto de 2022). *Producción Energética Anual*. Obtenido de Información Operativa: <http://www.cenace.gob.ec/info-operativa/InformacionOperativa.htm>
- Che, L., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Turki, Y. A. (2015). *Hierarchical Coordination of a Community Microgrid With AC and DC Microgrids*. EE.UU: IEEE.
- Chica, A., & Guamán, J. (2017). *Modelo de estado estacionario de la microrred del laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca*. Cuenca: UNIVERSIDAD DE CUENCA.
- Chipantiza, C., & Guaita, R. (2021). *Metodología de Planificación de Microrredes para Procesos Productivos*. Latacunga: Departamento de Eléctrica y Electrónica.
- Dagdougui, H., & Sacile, R. (2014). Decentralized Control of the Power Flows in a Network of Smart Microgrids . *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, 510–519,.
- Echavarri, D. K. (2020). *Control predictivo distribuido robusto para la coordinación de microrredes* . Santiago de Chile : Universidad de Chile .
- European Commission. (2022). *SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA FOTOVOLTAICA*. Obtenido de https://ec.europa.eu/info/index_en
- Gallagher, A. (4 de Noviembre de 2016). *El Acuerdo de París*. Obtenido de Naciones Unidas, Acción por el Clima: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Gaviria, F., & Gómez, J. (2018). *Metodología de optimización para microrredes eléctricas en zonas no interconectadas*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- H. Murdock, D. G. (2020). Renewables 2020 Global Status Report. *Technical Report*, REN21.

- IEEE. (2012). Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. *IEEE Std 1547.4, New York*, 1-54.
- International Energy Agency. (2017). IEA. Obtenido de Electricity Information: <https://www.iea.org/statistics/topics/electricity>
- J. Llanos, R. P.-B. (2013). A microgrid energy management system based on the rolling horizon strategy. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, 996 - 1006.
- Keyhani, A., & Marwali, M. (2011). *Smart Power Grids*. Springer,.
- Köbrich, D. (2020). *Control predictivo distribuido robusto para la coordinación de micro-redes*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/178214>
- Llanos, J., Olivares, D., Simpson, J., Kazerani, M., & Sáenz, D. (2019). *A Novel Distributed Control Strategy for Optimal Dispatch of Isolated Microgrids Considering Congestion*. Obtenido de IEEE Transactions on Smart Grid: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8676000>
- Llanos, J., Ortiz, D., Sáez, D., & Olivares, D. (2016). *Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids*. Obtenido de IEEE: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7942382>
- Lopes, J. A., & Madureira, M. C. (2006). Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation. *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 21, 916–924.
- Mahmood, H., Michaelson, D., & Jiang, J. (2015). Strategies for Independent Deployment and Autonomous Control of PV and Battery Units in Islanded Microgrids. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, 742–755.
- Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. (2013). A Review of Existing Microgrid Architectures. *Revista de Ingeniería*.

- Martínez, L. (2017). *Termotécnica básica para Ingenieros*. Books.
- Maurilio, R., J. A. (2021). Energy Management System Optimization in Islanded Microgrids: An Overview and Future Trends. *Researchgate*, 32.
- Medina, R. (2014). Microrredes basadas en electrónica de potencia. *INGENIUS*, 15-23.
- Ministerio de Energías y Minas. (2021). *Plan Maestro de Electricidad*. Quito.
- Ministerio del Ambiente, A. y. (26 de Mayo de 2020). Acuerdo de Escazú. *Ambiente, Boletín N° 076*.
- Olivares, C. C. (2014). Un sistema centralizado de gestión de energía para microrredes aisladas. *IEEE Transactions on Smart Grid* 5, 1864 –1875.
- Rodriguez, M. (2020). *A brief approach of Microgrids implementation in Ecuador*. A review. Conference: XV Multidisciplinary International Congress on Science and Technology, 3-4.
- Roje, T. (2015). *Diseño de estrategia de control para gestión de demanda de microrredes aisladas*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Saenz, D. (2015). *Diseño de estrategias de control para gestión de demanda de microrredes aisladas*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Shahnia, F., & Bourbour, S. (2017). *A practical and Intelligent Technique for Coupling Multiple Neighboring Microgrids at the Synchronization Stage*. Universidad Murdoch.
- Taha, S., Cagil, O., & Aladin, Z. (2011). Recent development in microgrids and example cases around the world- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Tolón, M., & Tamara, I. (2013). *Operación y gestión de microrredes energeticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energetica y ambiental*. Barcelona: Màsters Universitaris.

Twenergy. (2019). *La demanda eléctrica*. España.

Ubilla, K., Jimenez, G., Hernandez, R., Reyes, L., & Hernandez, C. (2014). Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* vol. 5, 1310 - 1318.

Vandoorn, T. L., Vasquez, J. C., Kooning, J. D., & Guerrero, J. M. (2013). Microgrids: Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies. *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, 42–55.

Vázquez, I. (2020). *Universidad de Sevilla*. Obtenido de Depósito de Investigación:
<https://idus.us.es/handle/11441/107162>

Zhao, B., Wang, X., Lin, D. C., Morgan, J., Qin, R., & Wang, C. (2018). Energy Management of Multiple Microgrids Based on a System of Systems Architecture. *IEEE*.

Anexos