



**Sistema de gestión de energía basado en control fuzzy logic para el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de microrredes vecinas.**

Arciniega Moscoso, Pedro José

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control

Ing. Arcos Avilés, Diego Gustavo Ph. D.

28 de Julio del 2021



### Document Information

Analyzed document	TESIS PEDRO ARCINIEGA_Urkund.docx (D110808827)
Submitted	7/28/2021 4:23:00 AM
Submitted by	
Submitter email	dgarcos@espe.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	dgarcos.espe@analysis.orkund.com



### Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>URKUND_TESIS_DANIELA_PEREIRA.docx</b> Document URKUND_TESIS_DANIELA_PEREIRA.docx (D62042052)		9
<b>SA</b>	<b>Gómez Hernández Dorian-definitivo.pdf</b> Document Gómez Hernández Dorian-definitivo.pdf (D106354689)		3
<b>W</b>	URL: <a href="http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v21n43/2256-5337-teclo-21-43-00107.pdf">http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v21n43/2256-5337-teclo-21-43-00107.pdf</a> Fetched: 7/28/2021 4:24:00 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/20010/TesisJPascualMiqueleizma.pdf?isAllowed=y&amp;sequence=3">https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/20010/TesisJPascualMiqueleizma.pdf?isAllowed=y&amp;sequence=3</a> Fetched: 9/25/2020 3:20:25 AM		1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis EP 3.3.pdf</b> Document Tesis EP 3.3.pdf (D110769316) Submitted by: ddortiz5@espe.edu.ec Receiver: ddortiz5.espe@analysis.orkund.com		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://pdfs.semanticscholar.org/a118/6fa12bae06fd4535f6d07ce1671d8c0b8bee.pdf">https://pdfs.semanticscholar.org/a118/6fa12bae06fd4535f6d07ce1671d8c0b8bee.pdf</a> Fetched: 12/1/2020 3:20:32 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://latam.ijeeer9.org/index.php/transactions/article/download/5836/1252">https://latam.ijeeer9.org/index.php/transactions/article/download/5836/1252</a> Fetched: 7/28/2021 4:24:00 AM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/158563/G%C3%B3mez%20-%20DISE%C3%91O%20Y%20OPTIMIZACI%C3%93N%20DE%20UN%20SISTEMA%20H%C3%80BRIDO%20RENOVABLE%20CON%20GESTI%C3%93N%20DE%20LA%20DEMANDA%20Y%20APLICAC...pdf?sequence=1">https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/158563/G%C3%B3mez%20-%20DISE%C3%91O%20Y%20OPTIMIZACI%C3%93N%20DE%20UN%20SISTEMA%20H%C3%80BRIDO%20RENOVABLE%20CON%20GESTI%C3%93N%20DE%20LA%20DEMANDA%20Y%20APLICAC...pdf?sequence=1</a> Fetched: 6/16/2021 1:42:06 PM		1
<b>SA</b>	<b>CICTMS_2020_paper_10.pdf</b> Document CICTMS_2020_paper_10.pdf (D78254747)		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://cyberleninka.org/article/n/1312961">https://cyberleninka.org/article/n/1312961</a> Fetched: 1/15/2020 7:15:39 PM		1
<b>SA</b>	<b>Proposta de tesi_v55.pdf</b> Document Proposta de tesi_v55.pdf (D75911660)		1



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**Sistema de gestión de energía basado en control fuzzy logic para el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de microrredes vecinas**” fue realizado por el señor **Arciniega Moscoso, Pedro José** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de julio del 2021

Firma:

**DIEGO  
GUSTAVO  
ARCOS AVILES**

Firmado digitalmente por DIEGO  
GUSTAVO ARCOS AVILES  
Nombre de reconocimiento (DN):  
c=EC, o=SECURITY DATA S.A. I,  
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE  
INFORMACION,  
serialNumber=080520105355,  
cn=DIEGO GUSTAVO ARCOS AVILES  
Fecha: 2021.07.28 09:46:21 -05'00'

.....

**Arcos Avilés, Diego Gustavo, Ph. D.**

C. C.: 1710879444



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Arciniega Moscoso, Pedro José**, con cédula de ciudadanía n° 1750537878, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Sistema de gestión de energía basado en control fuzzy logic para el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de microrredes vecinas** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 28 de julio del 2021**

Firma

**Arciniega Moscoso Pedro José**

C.C.: 1750537878



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Arciniega Moscoso, Pedro José**, con cédula de ciudadanía n° 1750537878, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Sistema de gestión de energía basado en control fuzzy logic para el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de microrredes vecinas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 28 de julio del 2021**

Firma

**Arciniega Moscoso, Pedro José**

C.C.: 1750537878

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación a mi madre Verónica Moscoso, quien siempre está pendiente de mí dándome su amor incondicional y se esfuerza cada día para buscar mi bienestar.

A mi padre José Arciniega quien ha sido mi fuente de apoyo, enseñándome que soy capaz de cualquier cosa que me proponga.

A mi hermana Cristina Arciniega con quien he compartido momentos inolvidables, juntos hemos crecido acompañándonos en nuestras agotadoras noches de estudio y apoyándonos para conquistar nuestras metas.

Los tres han sido los pilares fundamentales para mi formación, siempre han creído en mí, me han alentado en momentos difíciles y sobre todo han llenado mi vida de felicidad.

## **Agradecimiento**

Agradezco a mis padres y mi hermana por el apoyo que me han brindado siempre para culminar esta etapa universitaria.

A mis familiares con quienes he compartido buenos momentos que quedarán en mi memoria para siempre.

A Daniela por hacerme ver las cosas desde una perspectiva diferente, por confiar y creer en mí desde que nos conocimos y hacer que cada momento que compartimos sea muy especial.

A mis compañeros y amigos por su amistad, vivencias inolvidables y apoyo para llegar a este punto en mi carrera universitaria.

A mi director de tesis Dr. Diego Arcos por haberme guiado en el proceso de realización de este trabajo impartíendome valiosas enseñanzas de su experiencia y conocimientos.

**Tabla de contenidos**

<b>Certificado del tutor.....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de autoría.....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de publicación.....</b>	<b>5</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>7</b>
<b>Tabla de contenidos.....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>11</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>13</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo I .....</b>	<b>15</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
Antecedentes .....	15
<i>Compradores de energía .....</i>	<i>18</i>
<i>Viviendas independientes.....</i>	<i>19</i>
<i>Vendedores de energía.....</i>	<i>19</i>
Justificación e importancia.....	21
Alcance.....	26
Objetivos .....	29



	9
<i>Objetivo general</i> .....	29
<i>Objetivos específicos</i> .....	29
<b>Capítulo II</b> .....	<b>30</b>
<b>Marco teórico</b> .....	<b>30</b>
Microrred .....	30
<i>Generación distribuida</i> .....	30
<i>Definición de microrred</i> .....	31
Fuentes de energía renovables .....	32
<i>Energía solar fotovoltaica</i> .....	32
Sistema de gestión energética (EMS) .....	35
Parámetros de calidad para evaluar la eficiencia de microrredes .....	36
<i>Picos de máxima y mínima potencia de red</i> .....	36
<i>Derivada máxima de potencia (MPD)</i> .....	36
<i>Promedio de la derivada de potencia (APD)</i> .....	37
<i>Rango de variación del perfil de potencia (PVR)</i> .....	37
<i>Variabilidad del perfil de potencia (THD)</i> .....	37
Controlador por lógica difusa (FLC) .....	38
<i>Lógica difusa</i> .....	38
<i>Funciones de pertenencia</i> .....	38
<i>Sistemas de control de lógica difusa</i> .....	39

	10
<b>Capítulo III .....</b>	<b>40</b>
<b>Diseño de la estrategia de gestión energética para cada microrred de forma individual</b>	<b>40</b>
Construcción de perfiles de generación y consumo de cada microrred.....	41
EMS de cada microrred .....	45
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>48</b>
<b>Diseño de la estrategia de gestión energética para la interconexión de microrredes .....</b>	<b>48</b>
Controlador de lógica difusa para el intercambio de potencia entre microrredes.....	48
Intercambio de potencia entre tres microrredes .....	55
Intercambio de potencia entre cinco microrredes y ampliación del algoritmo para N microrredes.....	55
<i>Medición y Cálculos.....</i>	<i>57</i>
<i>Selector de Microrredes.....</i>	<i>57</i>
<i>Intercambio de Potencia Entre Microrredes.....</i>	<i>61</i>
<i>EMS Individual de Cada Microrred .....</i>	<i>61</i>
<i>Ajuste de parámetros del EMS individual .....</i>	<i>64</i>
<b>Capítulo V .....</b>	<b>66</b>
<b>Comparación de resultados de las estrategias de gestión de energía de cada escenario</b>	<b>66</b>
<b>Capítulo VI .....</b>	<b>78</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>78</b>
Conclusiones .....	78

	11
Recomendaciones .....	79
<b>Referencias .....</b>	<b>80</b>

### Índice de tablas

Tabla 1 Base de reglas del controlador de lógica difusa para el intercambio de potencia entre microrredes.....	53
Tabla 2 Orden establecido en el primer intento de intercambio de potencia entre cinco microrredes .....	56
Tabla 3 Modificación de reglas del controlador de la MG1 .....	65
Tabla 4 Parámetros de calidad de la microrred 1.....	70
Tabla 5 Parámetros de calidad de la microrred 2.....	72
Tabla 6 Parámetros de calidad de la microrred 3.....	74
Tabla 7 Parámetros de calidad de la microrred 4.....	74
Tabla 8 Parámetros de calidad de la microrred 5.....	75

### Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de 3 microrredes interconectadas. ....	25
Figura 2 Diagrama de 3 microrredes interconectadas. ....	26
Figura 3 Diagrama de cinco microrredes interconectadas. ....	27
Figura 4 Diagrama de N microrredes vecinas interconectadas .....	29
Figura 5 Diagrama básico de componentes de un sistema solar fotovoltaico para una vivienda.....	34

Figura 6 Representación de una función de pertenencia de un conjunto difuso .....	39
Figura 7 Vecindario de múltiples viviendas con sistemas de generación fotovoltaica ....	41
Figura 8 Perfil de generación de las cinco microrredes .....	43
Figura 9 Perfiles de consumo de las cinco microrredes a analizar .....	44
Figura 10 Diagrama de la estructura básica de cada microrred .....	46
Figura 11 Diagrama de entradas y salidas del controlador para el intercambio de potencia entre microrredes.....	49
Figura 12 Funciones de pertenencia para la razón de cambio de la potencia neta de cada microrred.....	50
Figura 13 Funciones de pertenencia para la diferencia de los estados de carga de las baterías.....	51
Figura 14 Funciones de pertenencia para las salidas del controlador .....	52
Figura 15 Triángulo formado por las variables $SOC_{Norm}^x$ y $P_{AVG, Norm}^x$ .....	59
Figura 16 Diagrama de control del intercambio de potencia entre microrredes .....	62
Figura 17 Diagrama de flujo de la estrategia de gestión energética. ....	63
Figura 18 Comparación del perfil de red de la MG1 en tres escenarios .....	67
Figura 19 Ventana de tiempo del perfil de red de la MG 1 .....	68
Figura 20 Análisis espectral del perfil de red de la microrred 1 .....	69
Figura 21 Rampas de potencia del perfil de red de MG1 .....	70
Figura 22 Perfiles de red de la MG2 en cada escenario.....	71
Figura 23 Perfiles de red de la MG3 en cada escenario.....	73
Figura 24 Perfiles de red de la MG4 .....	75
Figura 25 Perfiles de red de la MG5 .....	76

## Resumen

En el presente trabajo se desarrolla una estrategia de gestión energética, que permite el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de microrredes vecinas en un sector residencial. Cada microrred está conectada a la red eléctrica, cuenta con paneles fotovoltaicos para la generación de su propia energía y un sistema de almacenamiento. La estrategia propuesta considera el estado de carga de las baterías y la razón de cambio de la potencia neta de cada microrred. El objetivo de la estrategia es utilizar el exceso de energía una microrred para cargar el sistema de almacenamiento de energía de otra microrred que tenga escasez de energía, de ésta manera se puede aprovechar de una mejor manera la energía generada por los paneles fotovoltaicos, se reducen los picos y fluctuaciones en el perfil de potencia que cada microrred intercambia con la red eléctrica y se mantiene el estado de carga de las baterías en un rango seguro que permita prolongar la vida útil de las mismas. Para comprobar el funcionamiento de la estrategia se han realizado simulaciones donde se comparan escenarios donde cada microrred opera individualmente (sin intercambios de potencia entre microrredes), con los escenarios donde se produce intercambios de potencia entre tres y cinco microrredes.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **MICRORREDES VECINAS**
- **INTERCAMBIO DE POTENCIA**
- **SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA**
- **CONTROL FUZZY LOGIC**

### **Abstract**

In this work, an energy management strategy is developed, which allows the power exchange between the storage systems of neighboring residential microgrids. Each microgrid is connected to the utility network, has photovoltaic panels for its own power generation and a storage system. The proposed strategy considers the state of charge of the batteries and the rate of change of the net power of each microgrid. The objective of the strategy is to use the excess energy of one microgrid to charge the energy storage system of another microgrid that is short of energy, thus making better use of the energy generated by the photovoltaic panels, reducing the peaks and fluctuations in the power profile that each microgrid exchanges with the grid and maintaining the state of charge of the batteries in a safe range to extend its life. To test the performance of the strategy, simulations have been carried out comparing a scenario where each microgrid operates individually (no power exchanges), with scenarios where power exchanges occur between three and five microgrids.

#### **KEYWORDS:**

- **NEIGHBORING MICROGRIDS**
- **POWER EXCHANGE**
- **ENERGY MANAGEMENT SYSTEM**
- **FUZZY LOGIC CONTROL**

## Capítulo I

### Introducción

#### Antecedentes

En la actualidad, el crecimiento y desarrollo humano tienen una relación directamente proporcional con el consumo energético. El progreso de las civilizaciones modernas se ve afectado en gran manera por el aprovechamiento de las fuentes de energía, las cuales actualmente son en su mayoría los combustibles fósiles tales como carbón, petróleo y gas natural (Romerio, n.d.). Debido a que éstos son recursos no renovables, y el desarrollo está en aumento, podría existir una crisis energética, producto de la dificultad de satisfacer dicha demanda. Adicionalmente la utilización de esta energía da lugar a emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera que son causantes de lo que se conoce como calentamiento global. Además, se debe tomar en cuenta que la explotación de estos recursos naturales tienen un gran impacto negativo al medioambiente debido a la destrucción parcial o total de muchos ecosistemas (Badii et al., 2016).

Una solución al problema del impacto ambiental, es el uso de energías renovables. A nivel mundial, estas fuentes de energía renovable se han incrementado, y en la actualidad se realizan diferentes estudios con el fin de aprovechar de manera eficiente la energía solar fotovoltaica, la energía eólica, entre otras (Li et al., 2015), (Orellana & Sarango, 2015). Con estos estudios se espera que en los próximos años se incrementen los sistemas de generación por medio de pequeñas fuentes de energía en lugares cercanos a las cargas, lo que se conoce como generación distribuida, y que estos sistemas generen dicha energía a partir de fuentes de energía renovable (Hatzigiorgiou et al., 2007). Así como la utilización de estos sistemas es cada vez mayor, su complejidad también va en aumento a tal punto que se tendrá mayor dificultad para controlar un

gran número de elementos de generación distribuida y que éstos operen conjuntamente de una manera eficiente, es por eso que se introduce el concepto de microrred (Hatzigargyriou et al., 2007).

Una Microrred es un sistema de distribución de energía eléctrica que incluye elementos de generación distribuida, sistemas de almacenamiento y cargas, que operan en conjunto como un sistema controlable para proveer de energía eléctrica a un usuario final (Lasseter, 2002), (Lede et al., 2017). Con los avances tecnológicos y el desarrollo de las microrredes se ha incrementado el uso de fuentes de energía renovable cuyo aprovechamiento es cada vez más rentable. Por un lado, se considera que las microrredes son la base de las redes inteligentes o Smart Grids que han llamado mucho la atención en los últimos años y cuyos estudios se han incrementado por el potencial y el impacto que podrían llegar a tener a futuro cercano (Diego Arcos-Aviles et al., 2018). Por otro lado, una microrred puede operar conectada a la red eléctrica o aislada (sin conexión a la red), donde el objetivo principal en cada uno de los dos escenarios es diferente. En una microrred con conexión a la red eléctrica el objetivo principal es reducir los costos de operación, es decir permitir que el usuario final genere su propia energía, que por lo general es mediante fuentes renovables para reducir el consumo de la red eléctrica o incluso vender la energía generada (Zia et al., 2018). En el caso de una microrred sin conexión a la red eléctrica, el objetivo principal es utilizar fuentes de generación distribuida para mantener un abastecimiento constante de energía eléctrica a las cargas (Zia et al., 2018).

Para garantizar que se cumplan estos objetivos, las microrredes requieren de un sistema de gestión de energía (EMS) el cual se encarga de administrar el flujo de potencia de los diferentes elementos que componen la microrred de acuerdo a las necesidades de consumo de energía del usuario final. El EMS es capaz de compensar las limitaciones del sistema de una microrred para



que su operación resulte sostenible y fiable, a la vez que proporciona beneficios importantes tales como ahorro de energía, reducción de costos de pérdidas, regulación de frecuencia, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros (Zia et al., 2018). De forma general, el objetivo de un EMS es asegurar de manera óptima el despacho de energía de los sistemas de generación distribuida, para cumplir con ciertas metas que persigue la microrred y los requerimientos del usuario final (Olivares et al., 2014).

A nivel mundial existen tendencias de inclusión de sistemas de generación distribuida en sectores residenciales debido a varios factores tales como: regulaciones para el control de emisión de gases a la atmósfera, incremento de precios de la energía eléctrica, entre otros. También se han evidenciado ventajas significativas en la inclusión de energía distribuida para estos sectores, como la posibilidad de implementar Smart Grids (Kriett & Salani, 2012). Por estas razones se realizan varias investigaciones a fin de desarrollar un sistema óptimo de generación distribuida que sea capaz de suplir la demanda fluctuante de energía eléctrica en áreas residenciales, que de manera general se lo puede considerar como una microrred residencial. El objetivo de éste tipo de microrredes es administrar de forma eficiente la generación, almacenamiento y distribución de energía para viviendas (Anvari-Moghaddam et al., 2017; Igualada et al., 2014).

La cantidad de generación de energía y el almacenamiento en una microrred son limitados, por esta razón, en los últimos años se ha estudiado la posibilidad de interconectar de una manera eficiente distintas microrredes especialmente en un ambiente residencial (Afrakhte & Bayat, 2020). El objetivo de estas microrredes interconectadas es intercambiar energía eléctrica con otra u otras cuando el usuario final de una de ellas no requiera energía en el momento en que una microrred vecina la requiere. De esta manera se aprovecha de mejor manera los recursos

provenientes de las fuentes de energía renovables y proporciona una mayor eficiencia y rentabilidad al sistema.

Estudios han demostrado que gestionar y coordinar de una manera eficiente las Microrredes trae grandes beneficios para productores y consumidores de energía eléctrica. En base a esto, se desea ampliar los estudios, para interconectar varias microrredes con el objetivo de potenciar estos beneficios que se obtienen de las microrredes cuando trabajan de manera individual. Según (Zhang & Xu, 2019) se propone una estrategia de control para cada una de las microrredes, la cual se divide en dos niveles. El nivel más alto gestiona la salida de generación de energía de un conjunto de microrredes, mientras que el nivel más bajo, busca la configuración más óptima para cada generador, ya sea en microrredes con conexión a tierra o aisladas. El intercambio de potencia entre microrredes se lo hace mediante una microrred principal, a la cual las demás microrredes venden o compran energía de acuerdo a sus necesidades.

Por otro lado, existen estudios de microrredes interconectadas en áreas residenciales, en (Mahmud et al., 2020) se clasifica a las viviendas en tres tipos, compradores de energía, viviendas independientes y vendedores de energía.

### ***Compradores de energía***

Este tipo de viviendas no tienen, o tienen recursos de energía muy pequeños y están dispuestos a comprar energía proveniente de fuentes instaladas en otras viviendas durante horas pico, y dependerán de la red eléctrica en horarios fuera de horas pico, cuando la energía sea más barata, de esta manera podrán reducir los costos de adquisición de energía (Mahmud et al., 2020).

### ***Viviendas independientes***

Tienen una capacidad de generación de energía limitada la cual abastece únicamente para suplir sus necesidades, por lo que no participan en el intercambio de energía con otras viviendas (Mahmud et al., 2020).

### ***Vendedores de energía***

Poseen diversas fuentes de energía y sistemas de almacenamiento capaces de generar un excedente de energía, por lo que cumplen con los requerimientos necesarios para vender energía a otras viviendas. En la mayoría de los casos, este tipo de viviendas no compran energía. Sin embargo, en caso de ser necesario podrían comprar a otros Vendedores de Energía (Mahmud et al., 2020).

Cuando ya se tiene identificados los compradores y vendedores de energía, se utiliza un algoritmo de programación lineal de enteros mixtos, con el fin de emparejar de la mejor manera los compradores y vendedores de acuerdo a su disponibilidad de energía. Se realiza una predicción de la demanda de energía de los compradores para calcular la energía que se tiene que vender a los compradores. Con éste intercambio de energía se busca reducir los picos del perfil de demanda de las viviendas, a la vez que representa un beneficio económico tanto para vendedores de energía como para compradores (Mahmud et al., 2020).

En relación a este tema, en el Ecuador, se ha desarrollado un primer trabajo (Bermeo & Bravo, 2019), donde se realizó una estrategia de gestión energética basada en un controlador fuzzy logic para interconectar dos microrredes con el objetivo de mejorar las prestaciones de cada microrred y lograr una mayor eficiencia a todo el sistema. La estrategia de gestión utiliza el pronóstico de la potencia de las microrredes, la potencia que suministra la red eléctrica, la

potencia generada por cada una de las microrredes y el estado de carga de las baterías. Sin embargo, los resultados no fueron alentadores debido a la complejidad del tema. Por lo que se profundizó en la investigación y se propuso un nuevo diseño de estos algoritmos desde el inicio, es decir considerar únicamente un escenario de dos microrredes residenciales con conexión a la red eléctrica, interconectadas sin utilizar algoritmos de predicción (Diego Arcos-Aviles et al., 2020). De esta manera se tiene dicha investigación como base para continuar posteriormente y realizar nuevas investigaciones, con un aumento paulatino del nivel de complejidad del sistema, los escenarios de las futuras investigaciones son los siguientes:

1. Dos microrredes interconectadas sin predicción.
2. Extensión del algoritmo para un escenario con múltiples microrredes.
3. Dos microrredes interconectadas con predicción.
4. Extensión del escenario 3 para múltiples microrredes.

De esta manera se tendrá los resultados de cada uno de los escenarios, mediante los cuales se podrá comparar y se podrá evidenciar la mejora del sistema.

En (Diego Arcos-Aviles et al., 2020) se analizan los resultados obtenidos mediante parámetros de calidad establecidos, los cuales se tendrán como referencia para las futuras investigaciones. En estos resultados se puede ver que disminuyen los picos y fluctuaciones en los perfiles de potencia intercambiados con la red eléctrica, de cada microrred. Además, como un resultado inesperado, se puede evidenciar que se sincronizan los perfiles de estado de carga de las baterías, lo cual puede traer beneficios para futuras investigaciones.

### **Justificación e importancia**

Debido al crecimiento de la demanda energética a nivel mundial, se prevé que la utilización de fuentes de energía renovable aumente en gran manera, debido al agotamiento de los recursos naturales no renovables como el petróleo, carbón y gas natural. Además, se pretende reducir el peligro que causa la emisión de los gases de efecto invernadero, producto de la utilización de estas fuentes de energía. Por estas razones es necesario mejorar la fiabilidad, eficiencia y la calidad de energía obtenida de fuentes de energía renovable (Mariam et al., 2016). En cuanto a beneficios económicos, las microrredes permiten una mejor administración de energía, y reducen costos de adquisición de la misma. (Tolón & Tamara, 2013).

En zonas residenciales, las viviendas en la cuales se han instalado microrredes con fuentes de energía renovables, cuentan con algunos beneficios entre los cuales se puede destacar su autonomía al tener la capacidad para generar su propia energía. El no depender de otra fuente externa de energía proporciona seguridad, ya que la vivienda no se vería afectada frente a cortes de electricidad, de esta manera se puede y alimentar cargas que requieran un continuo abastecimiento (Medina, 2014). Por otro lado, en microrredes residenciales con conexión a la red eléctrica, también se evidencian beneficios económicos. Al utilizar energía proveniente de fuentes renovables, se menora el consumo de la red eléctrica y los habitantes de la vivienda pueden ahorrar costos a la vez que mantienen el mismo nivel de confortabilidad en sus actividades diarias (Monfared et al., 2019).

En una microrred con sistema de almacenamiento de energía y conexión a la red eléctrica instalada en un sector residencial, se tienen picos tanto en el perfil de consumo de potencia como en el estado de carga de la batería. Esto se debe a que la utilización de electrodomésticos en una vivienda es durante períodos de tiempo determinados en un día, de acuerdo a las necesidades de

los usuarios. Es decir, la cantidad de potencia consumida por las cargas de la microrred no es constante. Al estar presentes este tipo de fluctuaciones en el perfil del estado de carga de la batería, se reduce su tiempo de vida útil y afecta a la eficiencia de toda la microrred (Diego Arcos-Aviles et al., 2018).

La mayoría de componentes de una microrred tienen una vida útil aproximada de 20 años, una de las excepciones son los sistemas de almacenamiento ya que la durabilidad de éstos depende del uso que se le dé. El sistema de almacenamiento en una microrred trae muchas ventajas, pero a su vez es uno de los elementos más costosos y delicados, por lo que es necesario una gestión óptima y una buena estrategia de carga y descarga (Diego Arcos-Aviles et al., 2018), (Bordons et al., 2015).

El intercambio de potencia entre microrredes es una buena opción para evitar sobrecargas o descargas profundas en los sistemas de almacenamiento. Permite disminuir los picos y fluctuaciones, para que de esta manera las baterías tengan un estado de carga más uniforme y dentro de los rangos recomendados por el fabricante, a la vez que se puede satisfacer en cualquier momento la demanda de energía por parte de los usuarios (Diego Arcos-Aviles et al., 2020).

En un escenario residencial en el cual exista una interconexión entre microrredes como se muestra en la figura 1, se puede potenciar los beneficios que cada una de las viviendas obtuviera por separado. Existirá un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovable y se mejora las prestaciones de cada microrred. La interconexión ofrece un beneficio común igual para todas las microrredes, mayor al que se tiene en una microrred individual (Diego Arcos-Aviles et al., 2020), (Mariam et al., 2016).

Desde el punto de vista económico, se han realizado estudios que demuestran que existe un ahorro significativo para los usuarios de una comunidad al utilizar microrredes con sistema de almacenamiento de energía, interconectadas entre sí, debido a que se aprovecha de una mejor manera las fuentes de energía renovable, y se reduce el consumo de energía de la red eléctrica. (Rodrigues et al., 2020).

Además, este proyecto se enmarca dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 publicada por las Naciones Unidas en el año 2016 (*Energía – Desarrollo Sostenible*, n.d.). En concreto:

*Objetivo 7: “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos”, Meta 7.1: “De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos”; Meta 7.2: “De aquí a 2030, aumentar considerablemente la producción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas”; Meta 7.a: “De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y a la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles, y promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias”.*

*Objetivo 11: “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”, Meta 11.1: “De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros, asequibles y mejorar barrios marginales”.*

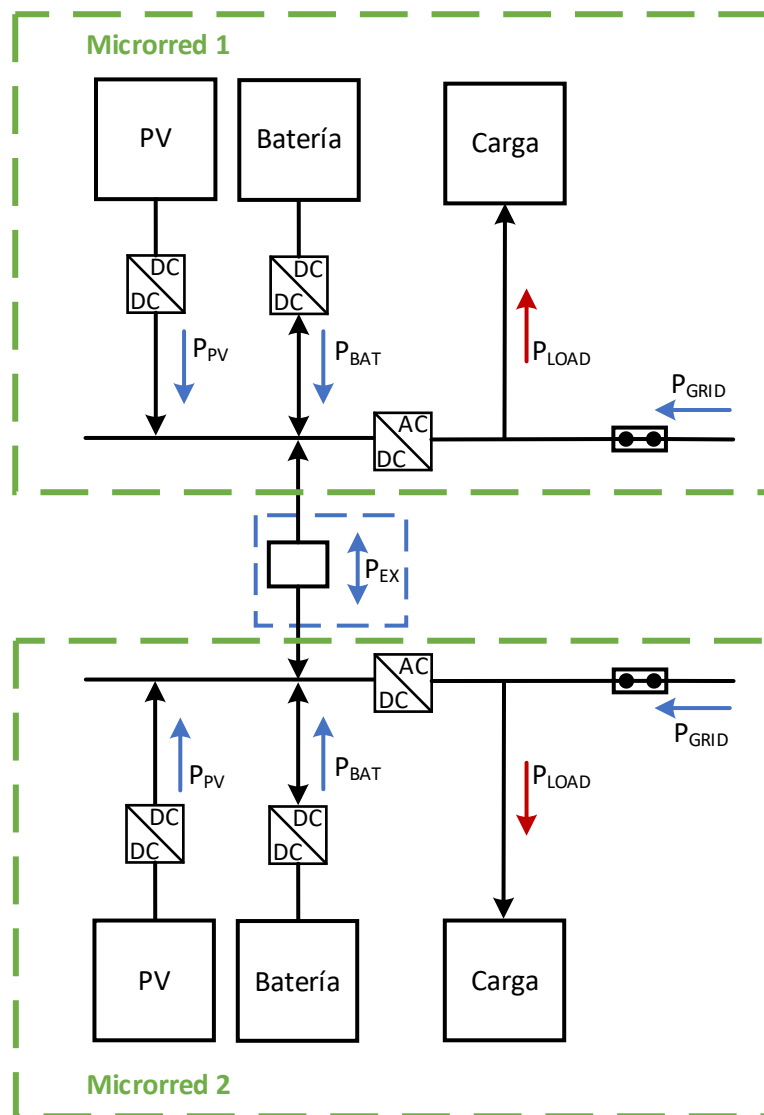
*Objetivo 12: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles”,*  
*Meta 12.2: “De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales”; Meta 12.a: “Ayudar a los países en desarrollo a fortalecer su capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de consumo y producción más sostenibles”.(Energía – Desarrollo Sostenible, n.d.)*

Finalmente, este trabajo de investigación es parte de los proyectos 2019-PIC-003-CTE y 2020-EXT-007 (VLIR-UOS Nro. EC2020SIN322A101) que se desarrollan en el Grupo de Investigación en Propagación, Control Electrónico y Networking (PROCONET) de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 1

Diagrama de dos microrredes interconectadas.



Nota. La figura indica los componentes principales en la conexión de dos microrredes, Adaptado de Arcos-Aviles, D. (2020) *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*.

## Alcance

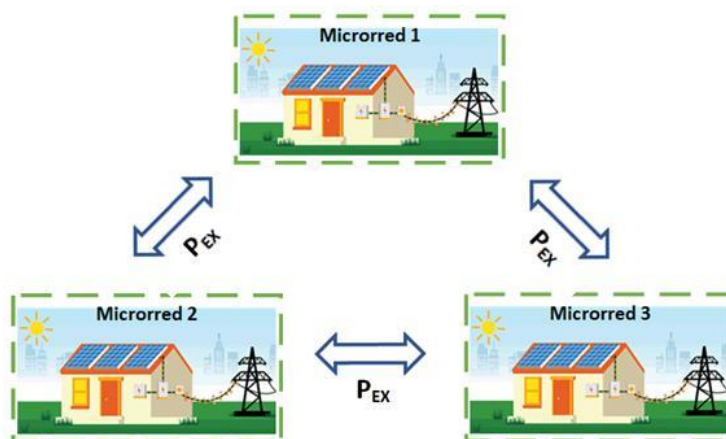
En el presente proyecto, se realizará el diseño de un sistema de gestión energética basado en un controlador Fuzzy Logic, para un sector residencial, que permita la interconexión entre microrredes conectadas a la red eléctrica, compuestas por un generador fotovoltaico y sistema de almacenamiento, en los siguientes escenarios:

- Tres microrredes residenciales interconectadas (figura 2).
- Cinco microrredes residenciales interconectadas (figura 3).

Con el fin de intercambiar potencia entre sus sistemas de almacenamiento, para disminuir los picos y fluctuaciones de potencia del perfil de red que cada una de ellas intercambia con la red eléctrica.

### Figura 2

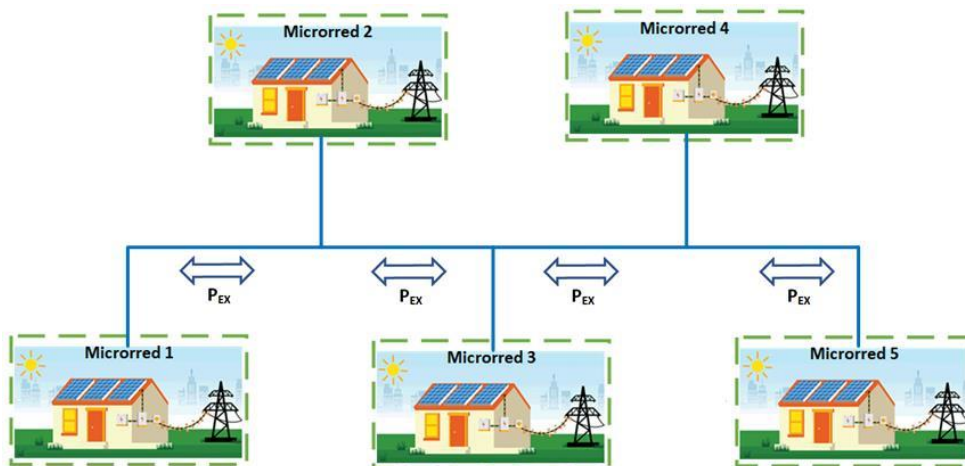
*Diagrama de 3 microrredes interconectadas.*



*Nota.* La figura indica tres microrredes interconectadas con conexión a la red eléctrica, que intercambian potencia entre sí.

Figura 3

Diagrama de cinco microrredes interconectadas.



*Nota.* La figura indica cinco microrredes interconectadas a través de un bus común bidireccional por medio del cual intercambian potencia.

Basándose en la estrategia de gestión realizada para dos microrredes descrita en (Diego Arcos-Aviles et al., 2020), se diseñará un controlador que permita el intercambio de potencia entre tres y cinco microrredes vecinas (con iguales configuraciones) con la finalidad de ampliar la investigación. Para esto, en primer lugar, se realizará la estrategia de gestión energética de cada microrred de forma individual. Es decir, se diseñará el EMS de cada microrred de tal forma que presente un correcto funcionamiento de manera individual. El EMS de cada microrred individual estará basado en el controlador de lógica difusa descrito en (Diego Arcos-Aviles et al., 2018), es decir, un sistema de gestión de energía sin considerar la predicción de generación ni consumo local. Posteriormente se realizará la interconexión entre ellas.

Se utilizarán datos que reflejan el consumo de las microrredes durante un año calendario y en función de (Diego Arcos-Aviles et al., 2020) se realizará una expansión de la estrategia de

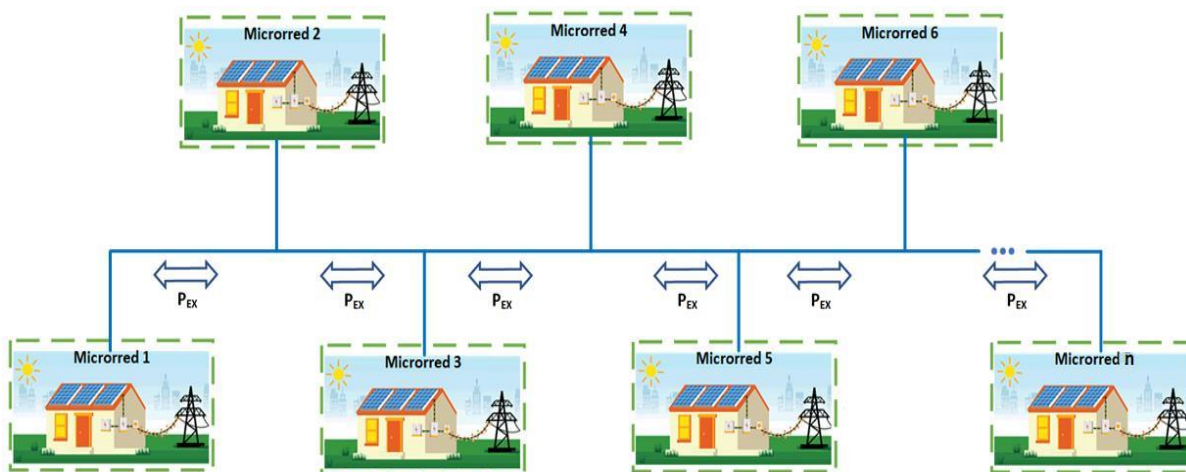
gestión energética para intercambiar potencia entre tres y cinco microrredes. La estrategia de gestión energética toma en consideración los estados de carga de las baterías y la tendencia local del comportamiento de cada microrred. Mediante esta información se desarrolla un algoritmo capaz de identificar microrredes con exceso o escases de energía para tomar las acciones de control que permitan cargar o descargar el sistema de almacenamiento de cada una de las microrredes e intercambiar potencia entre ellas.

La validación de la estrategia de gestión energética se realizará mediante simulaciones numéricas a través de Matlab®. Se realizará una comparación del desempeño de cada microrred cuando opera de forma individual y una vez que ya estén interconectadas, para esto se utilizarán parámetros de calidad definidos en (Diego Arcos-Aviles et al., 2018).

Por último, en base a los algoritmos utilizados para interconectar tres y cinco microrredes, se analizará la factibilidad para implementar una propuesta de parametrización de dicho algoritmo con el fin de extenderlo para el funcionamiento de “N” número de microrredes como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Diagrama de  $N$  microrredes vecinas interconectadas.



*Nota.* La figura indica  $N$  número de microrredes vecinas interconectadas a través de un bus común bidireccional por medio del cual intercambian potencia.

## Objetivos

### Objetivo general

Diseñar un sistema de gestión de energía, basado en Control Fuzzy Logic, que permita el intercambio de potencia entre tres y cinco microrredes vecinas, para disminuir los picos y fluctuaciones de potencia del perfil de potencia que cada microrred intercambia con la red eléctrica.

### Objetivos específicos

- Desarrollar las estrategias de gestión energética de cada microrred, en base a la estrategia de gestión presentada en (Diego Arcos-Aviles et al., 2018), para que cada una de ellas opere correctamente de forma individual.

- Realizar el diseño del algoritmo de gestión energética que permita el intercambio de potencia entre tres microrredes.
- Diseñar la estrategia de gestión energética para intercambiar potencia entre cinco microrredes.
- Comparar los resultados obtenidos, mediante los parámetros de calidad, en los escenarios de tres, cinco microrredes con los resultados obtenidos en (Diego Arcos-Aviles et al., 2020), para cuantificar la mejora de la eficiencia de las estrategias diseñadas.
- Analizar la factibilidad del desarrollo de una propuesta de parametrización del algoritmo utilizado en la interconexión de microrredes, con el fin de que éste pueda ser extendido para el caso de “n” número de microrredes interconectadas.

## Capítulo II

### Marco teórico

#### Microrred

##### *Generación distribuida*

Se conoce como generación distribuida o descentralizada, a la utilización de energía eléctrica producida por un conjunto de pequeñas fuentes energéticas, que se encuentren en lugares cercanos a las cargas o puntos de consumo. La ventaja principal de este tipo de generación de electricidad, es que no existen pérdidas significativas de energía en el transporte desde la generación hasta el consumidor. Además, que se evita costos en instalaciones que se tendría al implementar redes de transporte para distancias muy lejanas (Borbely & Kreider, 2001).

La generación distribuida, permite la utilización de energías renovables lo que es una gran contribución para reducir el consumo de electricidad proveniente de la quema de combustibles fósiles. Así como la demanda de energía a nivel mundial está en aumento, también se realizan estudios para aumentar la eficiencia los sistemas de generación distribuida(Akorede et al., 2010).

### ***Definición de microrred***

Una Microrred es un sistema de distribución de energía eléctrica que incluye elementos de generación distribuida, sistemas de almacenamiento, dispositivos de control y cargas, que operan en conjunto como un sistema controlable para proveer de energía eléctrica a una variedad de usuarios, los cuales pueden ser viviendas en un sector residencial, locales comerciales o industrias. (Lasseter, 2002), (Lede et al., 2017).

Existen microrredes conectadas a la red de distribución eléctrica, en este caso el objetivo principal de la microrred es permitir que el usuario final genere su propia energía, por lo general mediante fuentes de energía renovables para suplir una porción del consumo de la red eléctrica y de esta manera obtener un beneficio económico al reducir costos de operación. Existe también la posibilidad de que en un período de tiempo se tenga un excedente de energía generada en la microrred, en este caso es posible inyectar esta energía a la red eléctrica para obtener una remuneración de parte de la empresa proveedora de energía (Katiraei et al., 2008).

Por otro lado, en las microrredes que operan sin conexión a la red eléctrica, al ser un sistema totalmente independiente, es necesario contar con fuentes y recursos de generación distribuida capaces de mantener un abastecimiento de energía eléctrica constante a las cargas. En este caso, a diferencia de las microrredes con conexión a la red eléctrica, no se obtiene el beneficio del intercambio de energía con la red eléctrica, por lo tanto, tener un exceso de energía

generada también representa una pérdida en el ámbito económico. Es necesario administrar correctamente los recursos para no desperdiciar energía o en el peor de los casos que exista un déficit (Katiraei et al., 2008), (Salas & Guerrero, 2014).

### **Fuentes de energía renovables**

La energía convencional se basa en la quema de combustibles fósiles tales como carbón, petróleo y gas natural. A lo largo de la historia se ha demostrado que esta energía puede ser rentable en el ámbito económico, sin tomar en consideración el impacto ambiental y el daño causado a los ecosistemas e incluso al ser humano. Hoy en día la contaminación del medio ambiente es un problema a nivel mundial, por esta razón en muchos países se realizan varios estudios para utilizar fuentes de energía renovable lo cual es una solución al problema mundial de la contaminación ambiental (Herzog et al., 2016).

La energía renovable, es aquella que para su obtención se utilizan recursos naturales que son capaces de renovarse ilimitadamente, entre los principales se puede destacar: el sol, viento, agua y biomasa proveniente de plantas o animales. Estas fuentes de energía renovable representan un gran potencial para suplir la demanda de energía a nivel mundial y a su vez tienen un mínimo impacto ambiental, su utilización contribuye a reducir en gran manera la contaminación del medio ambiente producida por la emisión de gases de efecto invernadero (Tiwari & Mishra, 2012).

### ***Energía solar fotovoltaica***

La energía solar fotovoltaica se genera a partir de celdas compuestas por semiconductores. Al exponer una celda fotovoltaica a la luz solar, esta absorbe pequeños haces de radiación electromagnética, lo que ocasiona un movimiento de electrones en el material



semiconductor. Este movimiento de electrones genera corriente continua, lo que se conoce como efecto fotovoltaico (Hanania et al., 2015). Para generar una mayor cantidad de energía, un sistema fotovoltaico utiliza varios paneles solares, los mismos que están compuestos por un arreglo de varias celdas fotovoltaicas.

A nivel global, esta tecnología ha tenido importantes avances y cada vez se realizan más estudios que proponen mejoras para los métodos de fabricación de paneles solares, lo cual permite una mayor rentabilidad. Además de los paneles solares, un sistema fotovoltaico tiene más componentes que permiten la utilización de la energía eléctrica generada. En los últimos años han surgido mejoras en dichos componentes con el fin de aumentar la eficiencia de los sistemas de generación fotovoltaica. Gracias a las mejoras realizadas, cada vez más usuarios optan por utilizar esta tecnología para suplir su demanda de energía eléctrica (Robles & Rodríguez, 2018).

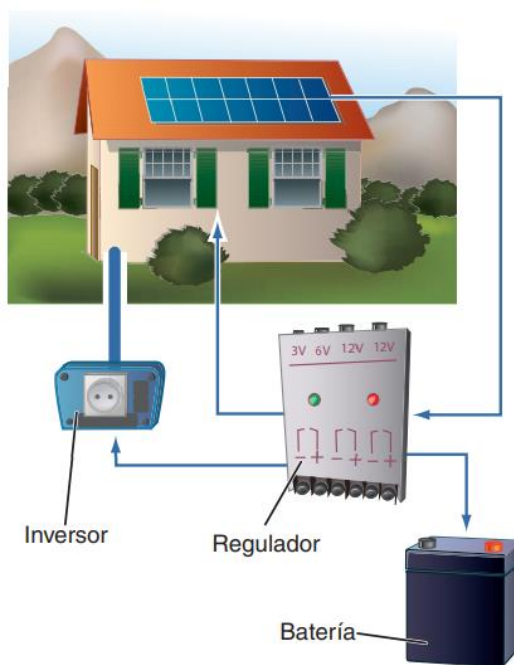
Entre los principales componentes de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica para áreas residenciales, se puede destacar:

- Paneles solares: Elemento mediante el cual se convierte la luz solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.
- Inversor: Convierte el voltaje de corriente continua generado por los paneles fotovoltaicos en voltaje de corriente alterna, la cual es utilizada por los electrodomésticos de una vivienda estándar.
- Sistemas de almacenamiento: Son grupos de baterías interconectadas entre sí, cumplen la función de almacenar el excedente de energía producida por los paneles solares en caso de que el usuario final de la vivienda no la necesite en ese instante.

Además de éstos, un sistema de generación solar fotovoltaica, posee otros componentes para protección o para aumentar la eficiencia del sistema, en la figura 5 se puede ver un diagrama básico del sistema fotovoltaico para una vivienda.

### Figura 5

*Diagrama básico de componentes de un sistema solar fotovoltaico para una vivienda.*



*Nota.* La figura indica los componentes principales de un sistema solar fotovoltaico para una vivienda. Tomado de *Componentes de una instalación solar fotovoltaica*, por McGraw-Hill Education.

### **Sistema de gestión energética (EMS)**

Para lograr los objetivos de una microrred y garantizar que se cumpla su funcionamiento de una forma eficiente, es necesario contar con un sistema de gestión energética que se encargue de administrar el flujo de potencia entre los diferentes elementos que componen la microrred, de acuerdo a las necesidades del usuario final (Olivares et al., 2014).

Un sistema de gestión energética (EMS) se define como un conjunto de componentes físicos y software, el cual se encarga de controlar de una manera eficiente la generación, transporte y almacenamiento de energía eléctrica en una microrred y así garantizar su utilización a un coste mínimo (Zia et al., 2018).

Un EMS por lo general hace uso de herramientas como medidores, interfaces humano máquina (HMI), algoritmos de predicción de generación y consumo de energía entre otros, para proporcionar estrategias de toma de decisiones. El EMS es capaz de almacenar y hacer uso de información como constantes climáticas, precios de energía en el mercado, o cualquier dato que sea necesario para controlar y monitorear cada recurso de generación distribuida que forma parte la microrred (Chen et al., 2011).

Se puede clasificar a los sistemas de gestión energética de una microrred en dos tipos según su forma de operación. Los sistemas de gestión energética centralizados, que almacenan toda la información de los recursos de generación distribuida y variables externas como costos de operación y factores meteorológicos en un controlador principal con el objetivo de tomar las decisiones que sean necesarias y envía esta información a controladores locales de los recursos de generación distribuida para que éstos ejecuten acciones. Por otro lado, en los EMSs descentralizados existe un intercambio de información en tiempo real, entre el controlador

principal y los controladores locales en donde cada controlador local propone una acción a realizarse, esta orden pasa por el controlador principal y éste determina si es correcta, o modifica ésta acción según sea necesario (Zia et al., 2018).

### **Parámetros de calidad para evaluar la eficiencia de microrredes**

Es necesario evaluar el desempeño de la microrred, para tener la posibilidad de comparar la estrategia de gestión energética utilizada con otras. Para esto se han establecido parámetros de calidad que permitan tener datos cuantificables que al compararlos unos con otros sea posible identificar la mejor estrategia de gestión de energía.

Para la presente investigación se ha evaluado el perfil de potencia que la microrred intercambia con la red eléctrica mediante los parámetros detallados a continuación.

#### ***Picos de máxima y mínima potencia de red***

Se miden en el transcurso de un año, el valor máximo  $P_{GRID,max}$  determina la cantidad máxima de potencia que la microrred ha absorbido de la red eléctrica. El valor mínimo  $P_{GRID,min}$ , por el contrario indica la cantidad máxima de potencia que la microrred inyectó a la red eléctrica (Pascual et al., 2014).

#### ***Derivada máxima de potencia (MPD)***

En la presente investigación se tienen datos de un año con un período de muestreo de 15 minutos. Este parámetro indica la máxima razón de cambio en dos muestras consecutivas de la potencia de red  $P_{GRID}$  en todo el año. Dado que la potencia de red es positiva cuando se absorbe energía y negativa cuando se entrega energía a la red eléctrica, se toma el valor absoluto de dicha razón de cambio. Se calcula mediante la ecuación (1) (Pascual et al., 2014).

$$MPD = \max(|P_{GRID}(n) - P_{GRID}(n-1)|) \quad (1)$$

Donde:  $P_{GRID}$  representa la potencia de red y  $n$  es la muestra actual.

### **Promedio de la derivada de potencia (APD)**

Se define como el valor medio de todos los valores de razón de cambio calculados en todo el año, al igual que en el punto anterior es necesario tomar su valor absoluto. Se calcula mediante la ecuación (2) (Pascual et al., 2014).

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |P_{GRID}(n) - P_{GRID}(n-1)| \quad (2)$$

Donde  $N$  es el número total de muestras de todo el año.

### **Rango de variación del perfil de potencia (PVR)**

Se define como la razón entre la diferencia de los valores máximo y mínimo del perfil de red de la microrred con EMS ( $P_{GRID,max}$  y  $P_{GRID,min}$ ) y de la microrred sin EMS ( $P_{LG,max}$  y  $P_{LG,min}$ ). Se calcula mediante la expresión (3) (D. Arcos-Aviles et al., 2015).

$$PVR = \frac{P_{GRID,max} - P_{GRID,min}}{P_{LG,max} - P_{LG,min}} \quad (3)$$

### **Variabilidad del perfil de potencia (THD)**

Es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los armónicos de potencia obtenidos durante un año en relación a la potencia media absorbida por la microrred, se calcula mediante la expresión (4). Debido a que la estrategia de gestión energética busca compensar variaciones

diarias, este parámetro evalúa únicamente frecuencias superiores a  $f_i = 1.65 \times 10^{-6}$  HZ, que corresponde a períodos de variación de una semana o menores (Pascual et al., 2014).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_{GRID,n}^2}}{P_{DC}} \quad (4)$$

Donde:  $P_{GRID,n}$  es la  $n$ -ésima componente de la descomposición del perfil de red mediante la transformada rápida de Fourier y  $P_{DC}$  es la potencia media.

### **Controlador por lógica difusa (FLC)**

#### ***Lógica difusa***

La lógica difusa se caracteriza por utilizar expresiones que no son totalmente ciertas ni totalmente falsas, es decir existe una gama de posibilidades de veracidad ante una premisa. Mediante el uso de la lógica difusa es posible manipular información imprecisa como por ejemplo temperatura alta, en lógica convencional existiría solo dos posibilidades verdadero si la temperatura es alta y falso si la temperatura no es alta, en lógica difusa es posible establecer un rango de valores de veracidad y decir por ejemplo que la premisa anterior es 70% verdadera y 30% falsa (Oscar & Duarte, n.d.).

#### ***Funciones de pertenencia***

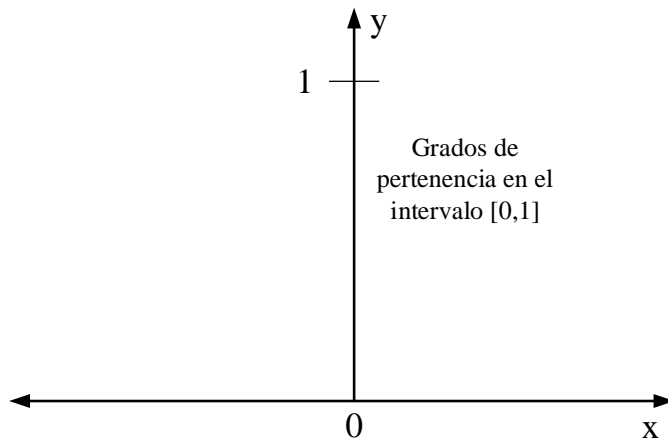
Según la teoría de conjuntos difusos, un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto, por ejemplo, si un elemento pertenece en un 40% a un conjunto quiere decir que también pertenece en un 60% al complemento de este conjunto.

Para representar de una forma visual el grado de pertenencia de cada elemento a un conjunto, se establecen funciones de pertenencia en forma de gráficas sobre un plano cartesiano

como se muestra en la figura 6. Donde el eje de las abscisas representa al universo discurso y el eje de las ordenadas representa el grado de pertenencia (Galindo Gómez, n.d.).

**Figura 6.**

*Representación de una función de pertenencia de un conjunto difuso.*



*Nota.* La figura muestra un plano cartesiano donde se representan las funciones de pertenencia.

Al momento de definir una función de pertenencia es recomendable un modelo sencillo para facilitar los cálculos. Las funciones más utilizadas son triangulares y trapezoidales.

***Sistemas de control de lógica difusa***

El control de lógica difusa, permite automatizar procesos en los cuales no se conozca un modelo matemático que describa la dinámica del sistema. El funcionamiento se describe en cuatro bloques principales, los mismos que se mencionan a continuación.

**Fusificación.** Se convierten los valores de las variables de entrada en valores difusos. Mediante las funciones de pertenencia establecidas se asigna un grado que indica la pertenencia del valor que se tiene como entrada a los conjuntos difusos correspondientes.

**Base de reglas.** En esta etapa se definen reglas lingüísticas de la forma “si – entonces” en donde se debe tener un antecedente que se analiza si es verdadero o falso. Al cumplirse la condición del antecedente establecido, se tiene un evento consecuente que da lugar a la acción del controlador. Es posible combinar dos o mas antecedentes mediante los operadores lógicos “y, o” de ser así se realizan las operaciones lógicas correspondientes para determinar la veracidad de los eventos antecedentes y decidir qué evento consecuente debe ocurrir.

**Inferencia.** Mediante la base de reglas se obtienen conjuntos difusos para las salidas del controlador a partir de los conjuntos difusos obtenidos en la etapa de fusificación, los cuales corresponden a las variables de entrada.

**Defusificación.** En esta etapa se realizan procesos para asignar un único valor a cada salida del controlador, a partir de los conjuntos difusos obtenidos en la etapa de inferencia. (Oscar & Duarte, n.d.).

### Capítulo III

#### Diseño de la estrategia de gestión energética para cada microrred de forma individual

Para el desarrollo de la estrategia de gestión han construido perfiles de generación y consumo de cada microrred con el objetivo de realizar simulaciones en Matlab®.



### **Construcción de perfiles de generación y consumo de cada microrred.**

La presente investigación está proyectada a un vecindario donde existan múltiples residencias, cada vivienda cuenta con un sistema de generación fotovoltaica, como se puede ver en la figura 7. Además, éstas deben tener su propio sistema de almacenamiento de energía y estar conectadas a la red eléctrica.

#### **Figura 7**

*Vecindario de múltiples viviendas con sistemas de generación fotovoltaica.*



*Nota.* La figura muestra un ejemplo del escenario global a analizar, son viviendas localizadas en un mismo vecindario que cuentan con su propio sistema de generación fotovoltaica.

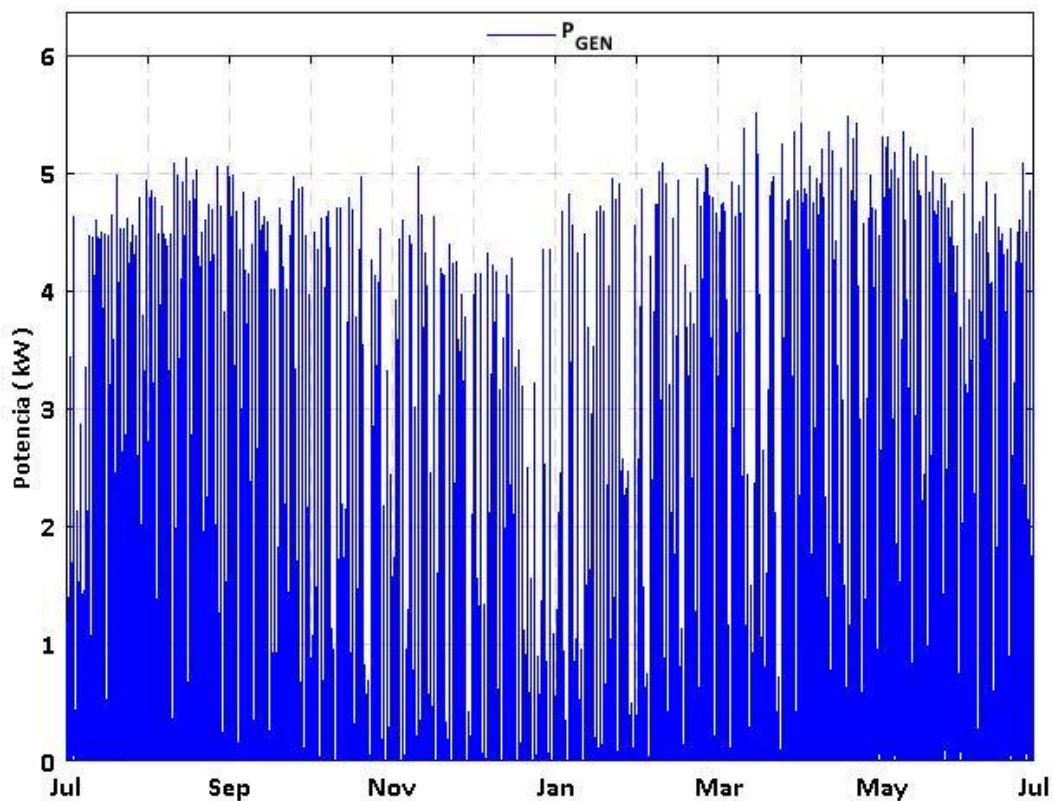
A partir de este concepto, se han establecido puntos clave que se debe tomar en cuenta al momento de generar los perfiles de generación y consumo de cada microrred, además se ha tomado como referencia los datos de las microrredes analizadas en (Diego Arcos-Aviles et al., 2020).

- Se utilizará un perfil de generación igual en todas las microrredes puesto que todas las viviendas cuentan con el mismo sistema de paneles fotovoltaicos y al estar en el mismo lugar la cantidad de luz solar que llega a cada vivienda difiere en valores muy pequeños, los cuales no serán tomados en cuenta.
- Los perfiles de consumo son diferentes en todas las microrredes, puesto que se tomará en cuenta que los usuarios que habitan en cada vivienda difieren en el número de personas, tienen distintos dispositivos y electrodomésticos que consumen energía eléctrica y sus rutinas diarias son diferentes.

En base a los puntos especificados anteriormente, se ha construido el perfil de generación para todas las microrredes, el cual se muestra en la figura 8.

**Figura 8**

*Perfil de generación de las cinco microrredes.*

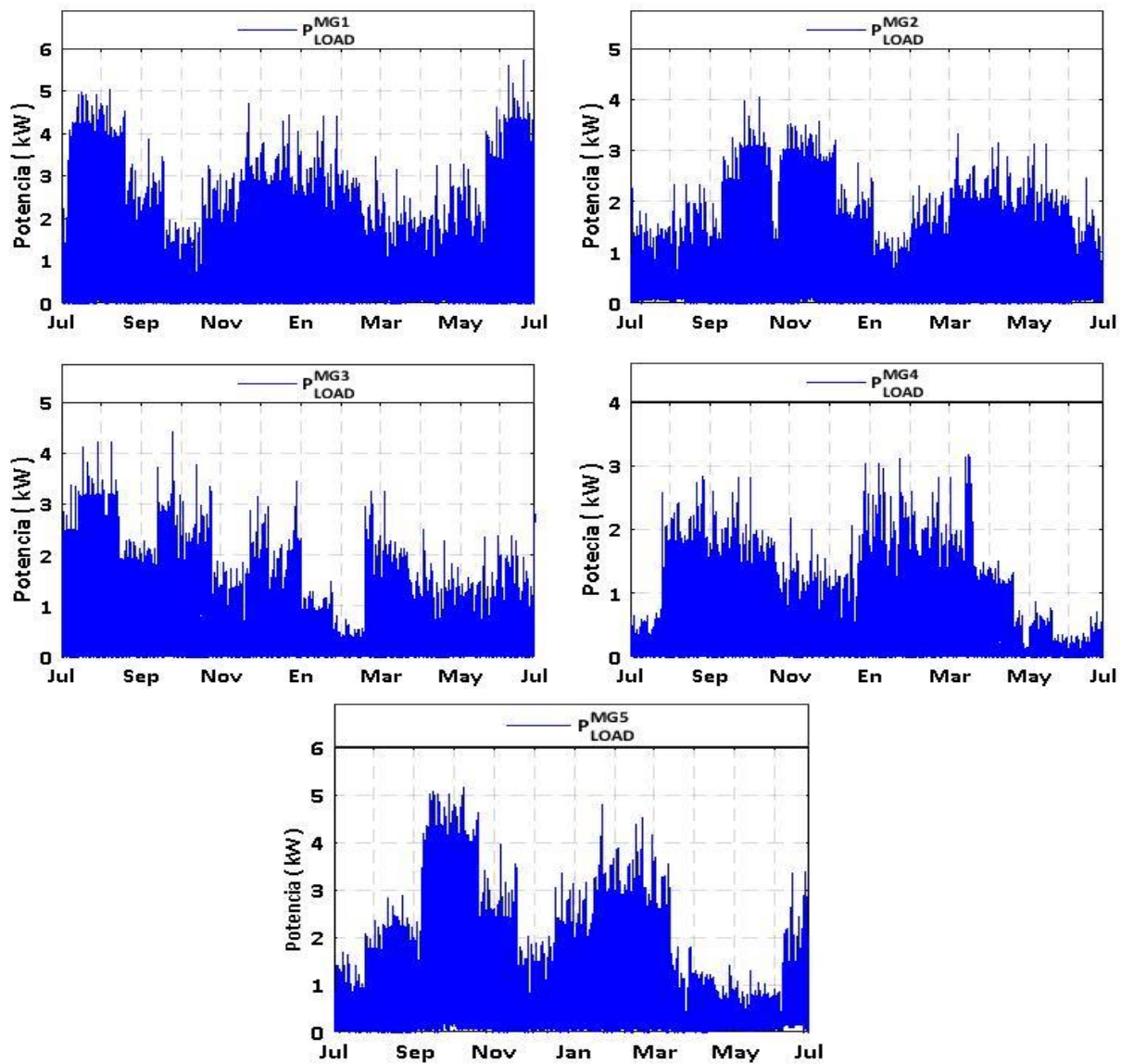


*Nota.* La figura muestra el perfil de generación que será utilizado para realizar las simulaciones de la estrategia de gestión energética.

Para los perfiles de consumo se ha tomado un perfil real y mediante operaciones en Matlab® se ha multiplicado ciertas partes por variables aleatorias además de hacer desplazamientos en el tiempo. De esta forma se ha obtenido cinco perfiles diferentes para cada microrred. En la figura 9 se puede observar los perfiles de consumo generados para cada microrred.

Figura 9

*Perfiles de consumo de las cinco microrredes a analizar.*



*Nota.* La figura muestra el los perfiles de consumo de cada una de las cinco microrredes con las que se realizarán pruebas para validar la estrategia energética.

### EMS de cada microrred

Cada una de las microrredes “x” opera con el EMS descrito en (Diego Arcos-Aviles et al., 2018). Este EMS se encarga de administrar la energía producida por los paneles fotovoltaicos, el EMS toma en consideración la cantidad de energía generada, el estado de carga de las baterías  $SOC^x$  y la potencia neta de la microrred  $P_{LG}^x$  los mismos que se calculan mediante las ecuaciones (5) y (6). Estas dos variables son la base para hacer cálculos posteriores y administrar el flujo de energía en toda la microrred de modo que aumente su eficiencia en general.

$$P_{LG}^x = P_{LOAD}^x(n) - P_{GEN}^x(n) \quad (5)$$

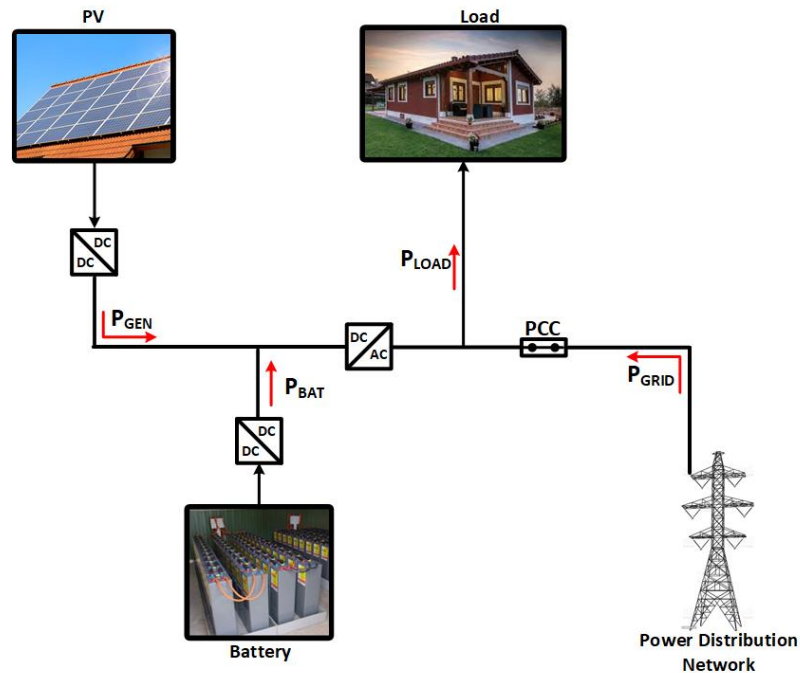
$$SOC^x(n) = SOC^x(n-1) - \Delta SOC^x(n) \quad (6)$$

$$\Delta SOC^x(n) = \frac{\eta}{C_{BAT}} \times P_{BAT}^x(n-1) \times T_s \quad (7)$$

Donde  $n$  es la muestra actual,  $P_{LOAD}$  es la potencia consumida,  $P_{GEN}$  es la potencia generada por los paneles solares,  $\Delta SOC$  es la variación del estado de carga de la batería en cada muestra,  $P_{BAT}$  es la potencia entregada por la batería,  $T_s$  es el tiempo de muestreo y  $\eta$  es la eficiencia de la batería. En la figura 10 se puede ver la estructura de cada microrred, donde se establece el flujo de potencia positivo para cada una de las variables.

Figura 10

Diagrama de la estructura básica de cada microrred.



*Nota.* La figura muestra un diagrama general de la estructura de las microrredes. Adaptado de *Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids*, por Arcos-Aviles et al., 2018.

El EMS hace uso de un controlador de lógica difusa encargado de calcular la cantidad de potencia que se debe inyectar o absorber de la red eléctrica, de tal manera que el perfil de potencia de red  $P_{GRID}$  sea lo más suave posible. Por otro lado, el sistema de almacenamiento se compone de baterías de plomo-ácido las cuales se ven afectadas por ciclos de descargas de profundidad, lo que compromete su vida útil. Llevar la batería a un estado de carga del 100% también puede ser perjudicial ya que se produce corrosión en las placas positivas. Debido a esto,

la estrategia busca mantener el estado de carga de las baterías entre el 50% y 100% (rango seguro para prolongar su vida útil).

Las entradas del controlador fuzzy logic son el estado de carga de las baterías (SOC) y la razón de cambio de la potencia neta  $\dot{P}_{AVG}$  que se calcula mediante la ecuación (8).

$$\dot{P}_{AVG}^x(n) = \frac{P_{AVG}^x(n) - P_{AVG}^x(n-1)}{T_s} \quad (8)$$

Para reducir las fluctuaciones en el perfil de red, este debe acercarse en lo posible al valor medio de la potencia neta  $P_{AVG}$ . Por esta razón se obtiene el valor de  $P_{GRID}$  al sumar a  $P_{AVG}$  la salida del controlador  $P_{FLC}$ , como se muestra en las ecuaciones (9) y (10). El valor de  $P_{FLC}$  se obtiene de acuerdo a la capacidad que tenga la microrred de inyectar o absorber energía de la red eléctrica tomando en cuenta el consumo, la generación y el estado actual de las baterías.

$$P_{AVG}^x(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=n-M}^{n-1} P_{LG}^x(k) \quad (9)$$

$$P_{GRID}^x(n) = P_{AVG}^x(n) + P_{FLC}^x(n) \quad (10)$$

Donde  $M$  es el número de muestras por día. Las muestras fueron tomadas cada 15 minutos por lo tanto en un día se tiene 96 muestras,  $P_{AVG}$  representa el promedio de la potencia neta.

## Capítulo IV

### **Diseño de la estrategia de gestión energética para la interconexión de microrredes**

En esta sección se desarrolla el diseño del controlador encargado de gestionar el intercambio de potencia entre microrredes en dos escenarios distintos: intercambio de potencia entre tres microrredes e intercambio de potencia entre cinco microrredes. También en base a los dos escenarios anteriores se desarrolla una propuesta de un algoritmo genérico que permite la interconexión entre n número de microrredes.

### **Controlador de lógica difusa para el intercambio de potencia entre microrredes**

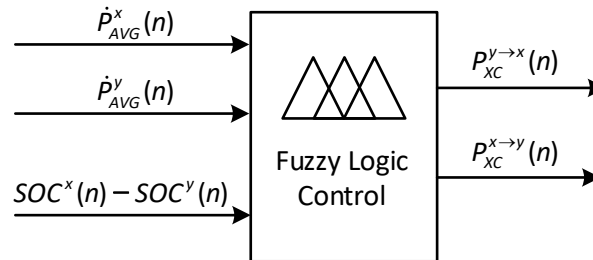
Para el intercambio, se utilizó el controlador de lógica difusa desarrollado en (Diego Arcos-Aviles et al., 2020) donde se tiene una conexión entre dos microrredes.

Para que una microrred pueda dar energía a otra deben cumplirse dos condiciones: existir energía suficiente almacenada en las baterías para el intercambio y la razón de cambio de la potencia neta de dicha microrred debe ser negativa, lo que indica una disminución en el consumo o un aumento de la generación. De igual manera para que una microrred reciba energía de otra debe suceder lo contrario poca energía almacenada en la batería y razón de cambio de la potencia neta positiva. Según estas consideraciones se ha establecido como entradas del controlador, la razón de cambio de la potencia neta de cada microrred y la diferencia de los estados de carga de las baterías de las dos microrredes. El controlador obtiene como salidas dos valores que representan el porcentaje que se deberá calcular de la cantidad de energía almacenada en las baterías que cada microrred intercambiará con la otra. En la figura 11 se tiene un diagrama de entradas y salidas del controlador.



**Figura 11**

Diagrama de entradas y salidas del controlador para el intercambio de potencia entre microrredes.



Nota. La figura indica las entradas y salidas del controlador utilizado para el intercambio de potencia entre las microrredes "x" y "y", donde:  $SOC^x(n)$  es el estado de carga de las baterías,  $P_{XC}^{x \rightarrow y}(n)$  es la potencia que la microrred "x" entregará a la microrred "y",  $P_{XC}^{y \rightarrow x}(n)$  la potencia que la microrred "y" entregará a la microrred "x". Tomado de *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*. Por Arcos-Aviles et al, 2020.

Las entradas  $\dot{P}_{AVG}^x(n)$  y  $\dot{P}_{AVG}^y(n)$  tienen 4 funciones de pertenencia, las mismas que se muestran en la figura 12. Para la diferencia de los estados de carga de las baterías  $SOC^x - SOC^y$  se utilizan dos funciones de pertenencia mostradas en la figura 13 y para las dos salidas  $P_{XC}^{x \rightarrow y}(n)$  y  $P_{XC}^{y \rightarrow x}(n)$  se utilizan las funciones de pertenencia ilustradas en la figura 14

La notación para todas las funciones de pertenencia es la siguiente.

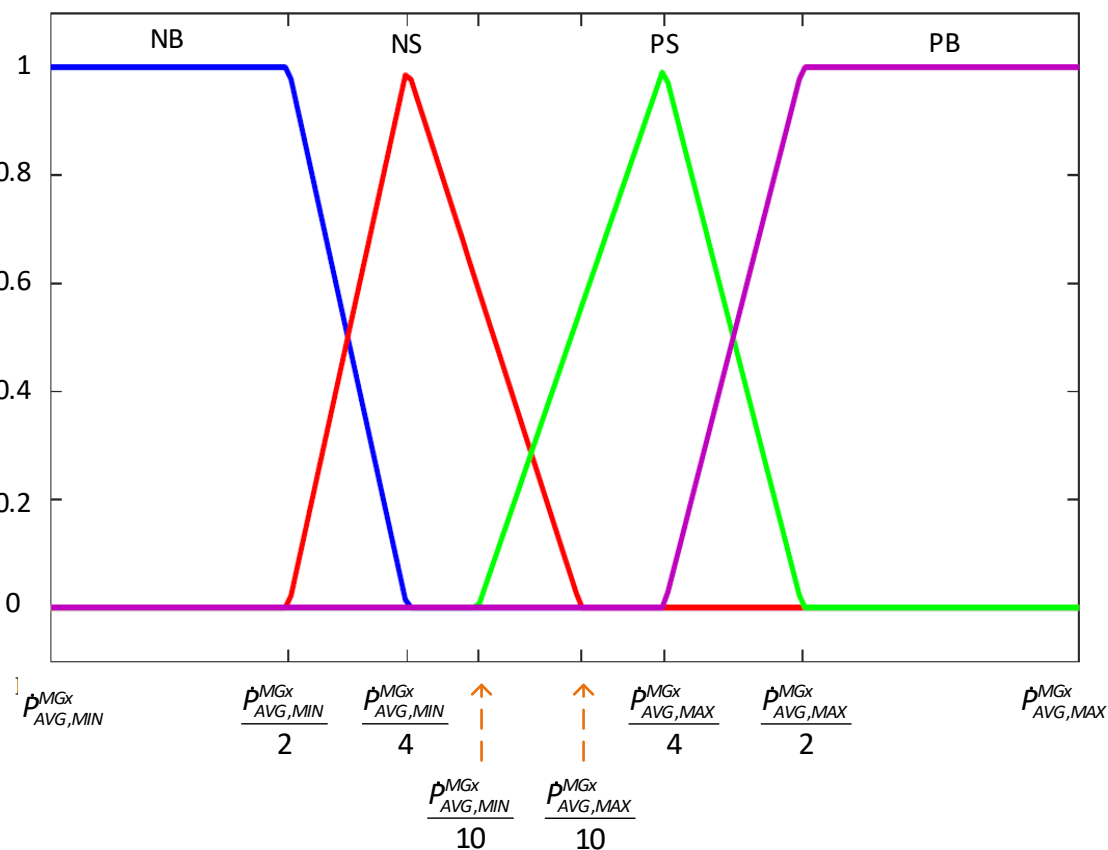
- N = Negativo
- P = Positivo
- ZE = Cero
- SS = muy pequeño

- S = Pequeño
- M = Medio
- B = Grande

Es posible utilizar combinaciones entre las siglas descritas anteriormente como: NB (negativo grande), PM (positivo medio), etc.

**Figura 12.**

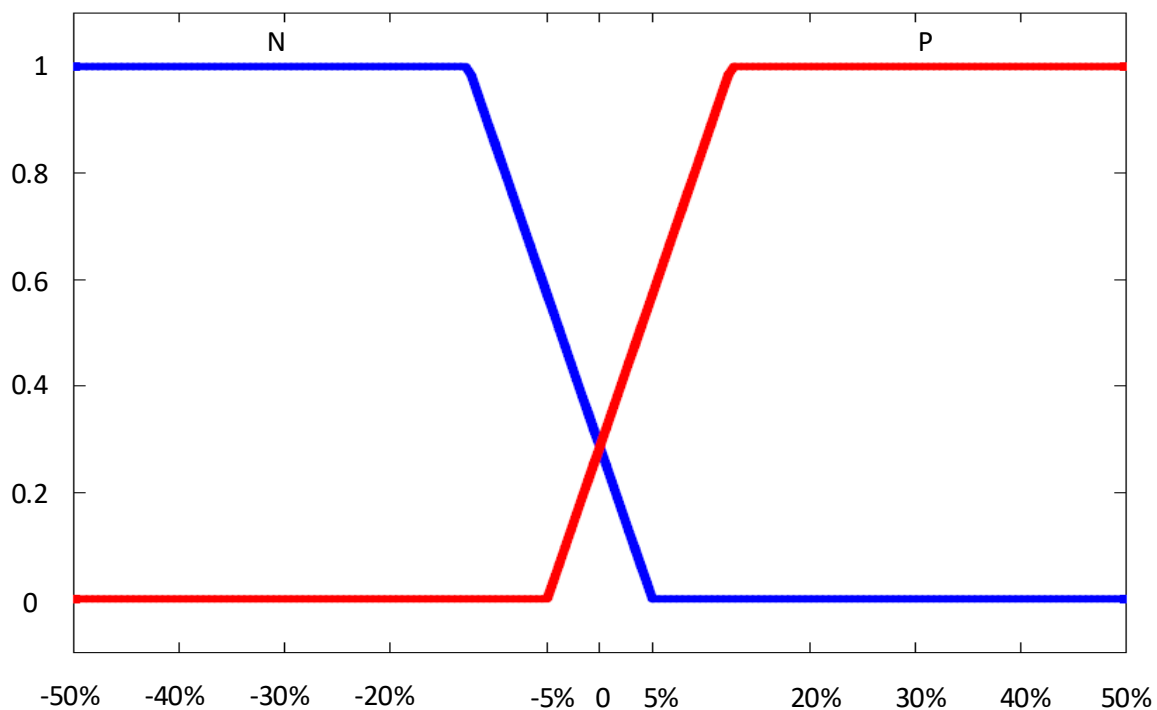
*Funciones de pertenencia para la razón de cambio de la potencia neta de cada microrred.*



*Nota.* La figura muestra las funciones de pertenencia para variable  $\dot{P}_{AVG}$ . Tomado de *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*. Por Arcos-Aviles et al, 2020.

**Figura 13.**

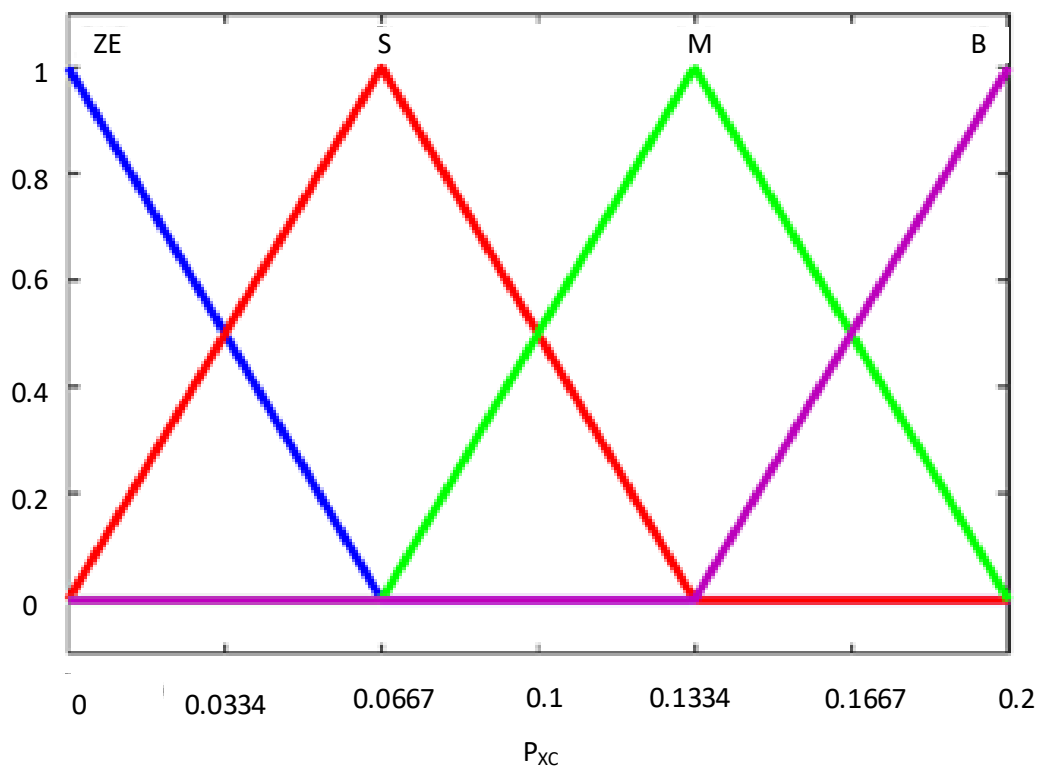
*Funciones de pertenencia para la diferencia de los estados de carga de las baterías.*



*Nota.* La figura indica las funciones de pertenencia de la diferencia de los estados de carga de las baterías. Tomado de *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*. Por Arcos-Aviles et al, 2020.

**Figura 14.**

*Funciones de pertenencia para las salidas del controlador.*



*Nota.* La figura muestra las funciones de pertenencia para las salidas del controlador, para las dos salidas  $P_{XC-y}$  y  $P_{XC-x}$  se utilizan las mismas funciones de pertenencia. Adaptado de *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*. Por Arcos-Aviles et al, 2020.

El funcionamiento del controlador se describe mediante 32 reglas, las cuales se detallan a continuación en la tabla 1.

Tabla 1

*Base de reglas del controlador de lógica difusa para el intercambio de potencia entre microrredes.*

Entradas		Salidas		
$SOC_{MGX} - SOC_{MGY}$	$\dot{P}_{AVG} (MGX)$	$\dot{P}_{AVG} (MGX)$	$P_{XC\ x-y}$	$P_{XC\ y-x}$
P	NB	NB	S	ZE
P	NB	NS	M	ZE
P	NB	PS	B	ZE
P	NB	PB	B	ZE
P	NS	NB	S	ZE
P	NS	NS	M	ZE
P	NS	PS	M	ZE
P	NS	PB	B	ZE
P	PS	NB	ZE	ZE
P	PS	NS	ZE	ZE
P	PS	PS	M	ZE
P	PS	PB	M	ZE
P	PB	NB	S	ZE
P	PB	NS	S	ZE
P	PB	PS	ZE	ZE
P	PB	PB	S	ZE
N	NB	NB	ZE	S
N	NB	NS	ZE	S
N	NB	PS	ZE	ZE
N	NB	PB	ZE	S
N	NS	NB	ZE	M
N	NS	NS	ZE	M
N	NS	PS	ZE	ZE
N	NS	PB	ZE	ZE
N	PS	NB	ZE	B
N	PS	NS	ZE	M
N	PS	PS	ZE	M
N	PS	PB	ZE	S
N	PB	NB	ZE	B
N	PB	NS	ZE	M
N	PB	PS	ZE	S
N	PB	PB	ZE	S

*Nota.* La tabla describe la base de reglas del controlador para el intercambio de potencia entre microrredes. Adaptado de *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids*. Por Arcos-Aviles et al, 2020.

Al realizarse el intercambio de potencia entre las dos microrredes, se obtiene nuevos valores de la potencia de las baterías de cada microrred los mismos que se calculan mediante las ecuaciones (11) y (12).

$$P_{BAT,XC}^x(n) = P_{BAT}^x(n) - P_{XC}^{x \rightarrow y}(n) \cdot P_{BAT,S}^x(n) + P_{XC}^{y \rightarrow x}(n) \cdot P_{BAT,S}^y(n) \quad (11)$$

$$P_{BAT,XC}^y(n) = P_{BAT}^y(n) - P_{XC}^{y \rightarrow x}(n) \cdot P_{BAT,S}^y(n) + P_{XC}^{x \rightarrow y}(n) \cdot P_{BAT,S}^x(n) \quad (12)$$

$$P_{BAT,S}^x(n) = (1/T_s) \cdot E_{BAT}^x(n) \quad (13)$$

$$P_{BAT,S}^y(n) = (1/T_s) \cdot E_{BAT}^y(n) \quad (14)$$

Donde  $P_{BAT,XC}^x(n)$  y  $P_{BAT,XC}^y(n)$  representan la potencia de las baterías de cada microrred después del intercambio,  $P_{BAT}^x(n)$  y  $P_{BAT}^y(n)$  son la potencia de las baterías de cada microrred antes del intercambio,  $P_{XC}^{x \rightarrow y}(n)$  y  $P_{XC}^{y \rightarrow x}(n)$  representan el porcentaje de la potencia de las baterías que la microrred “x” entrega a la microrred “y” y viceversa. Para el trabajo presente, se ha limitado a 20 % la cantidad máxima de potencia que cada microrred intercambia con la otra.  $E_{BAT}^x(n)$  y  $E_{BAT}^y(n)$  son la energía almacenada en las baterías de cada microrred que está disponible para el intercambio.

### **Intercambio de potencia entre tres microrredes**

El intercambio entre tres microrredes se realizó mediante varios intercambios, consiste en emparejar las microrredes de tal manera que se produzca un intercambio de potencia entre todas, es decir, cada microrred tiene que juntarse con las otras dos restantes. Se realizó el intercambio en el siguiente orden:

1. Microrred 1 con microrred 2
2. Microrred 2 con microrred 3
3. Microrred 1 con microrred 3

De esta forma, en cada muestra se realizan 3 intercambios de potencia. El controlador es quien decide la cantidad de potencia que cada microrred intercambia con la otra, para que se aproveche más la energía generada por los paneles solares y reducir los picos y fluctuaciones del perfil de red de cada microrred.

### **Intercambio de potencia entre cinco microrredes y ampliación del algoritmo para N microrredes**

Para el intercambio de potencia entre cinco microrredes, se optó por seguir el mismo procedimiento del escenario anterior, realizar varios intercambios en todas las combinaciones posibles de tal manera que cada microrred intercambie potencia con las otras cuatro restantes en el orden especificado en la tabla2.

Se pudo notar que, al tratarse de más microrredes se presentaron ocasiones en que se emparejaron dos microrredes en las cuales no era factible un intercambio ya sea porque las dos

tenían exceso de energía o escasez de la misma. Esto produjo que se aumenten los picos y fluctuaciones en el perfil de red de algunas microrredes. Por lo tanto, se llegó a la conclusión de que se requiere un proceso previo al intercambio en donde se clasifiquen las microrredes en dos grupos, microrredes con exceso de energía y microrredes con escasez de energía para emparejar las microrredes de un grupo con las del otro grupo.

**Tabla 2**

*Orden establecido en el primer intento de intercambio de potencia entre cinco microrredes.*

Orden de intercambio	Microrredes emparejadas para el intercambio	
1	MG1	MG2
2	MG1	MG3
3	MG1	MG4
4	MG1	MG5
5	MG2	MG3
6	MG2	MG4
7	MG2	MG5
8	MG3	MG4
9	MG3	MG5
10	MG4	MG5

*Nota.* La tabla muestra el orden en que se realizó el intercambio de potencia entre cinco microrredes.

Para solucionar el problema anterior, se propone una nueva estrategia, la cual se puede implementar también para n número de microrredes. La estrategia planteada consta de cuatro bloques principales que serán explicados posteriormente.

#### 1. Medición y Cálculos



2. Selector de microrredes
3. Intercambio de potencia entre microrredes
4. EMS individual de cada microrred

### **Medición y Cálculos**

En esta etapa, se toman los valores de generación y consumo  $P_{GEN}$  y  $P_{LOAD}$ . Mediante estos datos se calculan las variables:  $P_{LG}$ ,  $P_{AVG}$ ,  $\dot{P}_{AVG}$  y se establece el valor inicial de potencia almacenada en las baterías  $P_{BAT}$ .

### **Selector de Microrredes**

Este bloque se encarga de identificar en cada muestra, las microrredes aptas para dar energía a las que les hace falta. Es decir, separa las microrredes en dos tipos: microrredes con exceso de energía y microrredes con escasez de energía eléctrica, con el objetivo de emparejarlas y que se produzca un intercambio de energía entre ellas.

El selector hace uso de dos variables en cada microrred, el estado actual de carga de la batería  $SOC^x$  y la razón de cambio de potencia de la microrred  $\dot{P}_{AVG}$ . Cada una de estas variables, está definida dentro de un rango de operación, como se puede ver en las siguientes expresiones:

$$SOC_{MIN}^x \leq SOC^x(n) \leq SOC_{MAX}^x \quad (15)$$

$$P_{AVG,MIN}^x \leq \dot{P}_{AVG}^x(n) \leq P_{AVG,MAX}^x \quad (16)$$

Donde  $P_{BAT, MIN}$  y  $P_{BAT, MAX}$  son los valores mínimo y máximo respectivamente de la capacidad de las baterías instaladas en la microrred,  $\dot{P}_{AVG, MIN}$  y  $\dot{P}_{AVG, MAX}$  son respectivamente el mínimo y máximo valor de razón de cambio del promedio de la potencia neta calculados mediante las ecuaciones (17) y (18).

$$P_{AVG,MIN}^x = (9/10) \cdot (P_{LOAD}^x / T_W) \quad (17)$$

$$P_{AVG,MAX}^x = (9/10) \cdot (P_{PV}^x / T_W) \quad (18)$$

Donde  $T_W$  representa la ventana de tiempo que para el presente estudio se considera de un día de modo que expresado en segundos:  $T_W = 60 \cdot 60 \cdot 24 = 86400$  s

Para cada microrred se calcula en la muestra actual un valor de  $SOC^x$  normalizado entre [0, 1], y un valor de  $\dot{P}_{AVG}^x$  normalizado entre [-1, 0] mediante las ecuaciones (19) y (20).

$$SOC_{Norm}^x(n) = \frac{SOC^x(n) - SOC_{MIN}^x}{SOC_{MAX}^x - SOC_{MIN}^x} \quad (19)$$

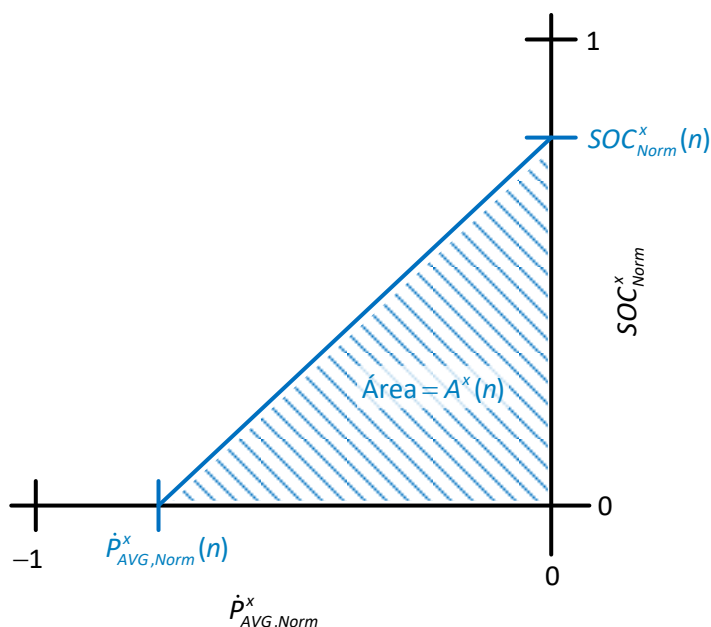
$$\dot{P}_{AVG, Norm}^x(n) = \frac{\dot{P}_{AVG}^x(n) - \dot{P}_{AVG, MAX}^x}{\dot{P}_{AVG, MAX}^x - \dot{P}_{AVG, MIN}^x} \quad (20)$$

Donde  $SOC_{Norm}^x$  y  $\dot{P}_{AVG, Norm}^x$  son los valores normalizados del estado de carga de la batería y la razón de cambio de la potencia neta respectivamente. El cálculo de estos valores, servirá para realizar la gráfica mostrada en la figura 15. En la cual se coloca a  $\dot{P}_{AVG, Norm}^x$  en el eje X, y a  $SOC_{Norm}^x$  en el eje Y, de tal manera que se forme un triángulo. El objetivo de esta gráfica es obtener el área  $A^x$  del triángulo formado a partir de las dos magnitudes, la misma que se calcula mediante la siguiente expresión.

$$A^x(n) = \frac{|\dot{P}_{AVG, Norm}^x(n) \cdot SOC_{Norm}^x(n)|}{2} \quad (21)$$

Figura 15

Triángulo formado por las variables  $SOC_{Norm}^x$  y  $\dot{P}_{AVG, Norm}^x$ .



*Nota.* La figura muestra el triángulo formado con las variables  $SOC_{Norm}^x$  y  $\dot{P}_{AVG, Norm}^x$  cuyo valor de área servirá para cálculos posteriores.

Se sabe que mientras  $\dot{P}_{AVG}$  disminuye, en la microrred existe menos consumo o a su vez mas generación de energía de parte del panel fotovoltaico y viceversa, entonces la microrred con el menor valor de  $\dot{P}_{AVG}$  y con mayor valor de  $SOC$  será la que tiene magnitud de área más grande, lo que indica un exceso de energía en su sistema de almacenamiento, por lo tanto, esta microrred será la indicada para intercambiar energía con otra microrred que tenga la menor magnitud de área del triángulo.

Para identificar las microrredes que deben emparejarse, estos valores de  $A^x$  son almacenados en un vector  $\mathbf{V}_A$ , dicho vector contiene los valores de  $A^x$  de la muestra actual “ $n$ ” de todas las microrredes como se muestra a continuación.

$$\mathbf{V}_A = \begin{bmatrix} A^1(n) \\ A^2(n) \\ \vdots \\ A^N(n) \end{bmatrix} \quad (22)$$

A partir del vector  $\mathbf{V}_A$  se extrae los índices de la posición donde se encuentran el valor máximo  $A_{MAX}$  y mínimo  $A_{MIN}$  de las áreas mediante las ecuaciones (23) y (24) y de esta manera se obtiene la microrred que tiene exceso de energía “ $x$ ” y la microrred con escasez de energía “ $y$ ”.

$$[x, A_{MAX}] = \max(\mathbf{V}_A) \quad (23)$$

$$[y, A_{MIN}] = \min(\mathbf{V}_A) \quad (24)$$

Luego del proceso de selección, se ejecuta el bloque de intercambio y posterior a esto se ejecuta nuevamente éste bloque de selección, con la diferencia que esta vez se descarta las dos microrredes que ya intercambiaron potencia anteriormente, para esto se vuelve a obtener los índices de los valores máximos y mínimos del vector pero esta vez sin tomar en cuenta las filas “ $x$ ” y “ $y$ ” que corresponden a las microrredes emparejadas anteriormente, con el objetivo de identificar las dos siguientes microrredes que van a emparejarse para el próximo intercambio de potencia. Estos nuevos índices se sobrescriben en las variables “ $x$ ” y “ $y$ ”. De esta manera, estas dos variables cambiarán en cada iteración y almacenarán los índices del vector  $\mathbf{V}_A$  correspondientes a las nuevas microrredes que deben emparejarse.

Se realiza este proceso  $N/2$  veces, donde  $N$  es el número total de microrredes, con el fin de que se realice el intercambio entre todas las microrredes existentes en el sistema. En el caso de que exista un número impar de microrredes, se toma únicamente la parte entera de la división  $N/2$ .

En conclusión, este bloque identifica la microrred de mayor superficie y la microrred de menor superficie del triángulo formado por variables  $SOC_{Norm}^x$  y  $P_{AVG, Norm}^x$  para identificar las microrredes “x” y “y”. Estos datos son enviados al siguiente bloque para que se produzca el intercambio de energía entre estas dos microrredes.

#### ***Intercambio de Potencia Entre Microrredes***

Una vez que se han identificado las microrredes con exceso de energía y las microrredes con escasez de energía, se realiza el intercambio de potencia entre ellas de dos en dos, para esto se hace uso del controlador Fuzzy Logic descrito anteriormente. A continuación, en la figura 16 se muestra un diagrama de control del intercambio de potencia entre la microrred “x” y la microrred “y”.

#### ***EMS Individual de Cada Microrred***

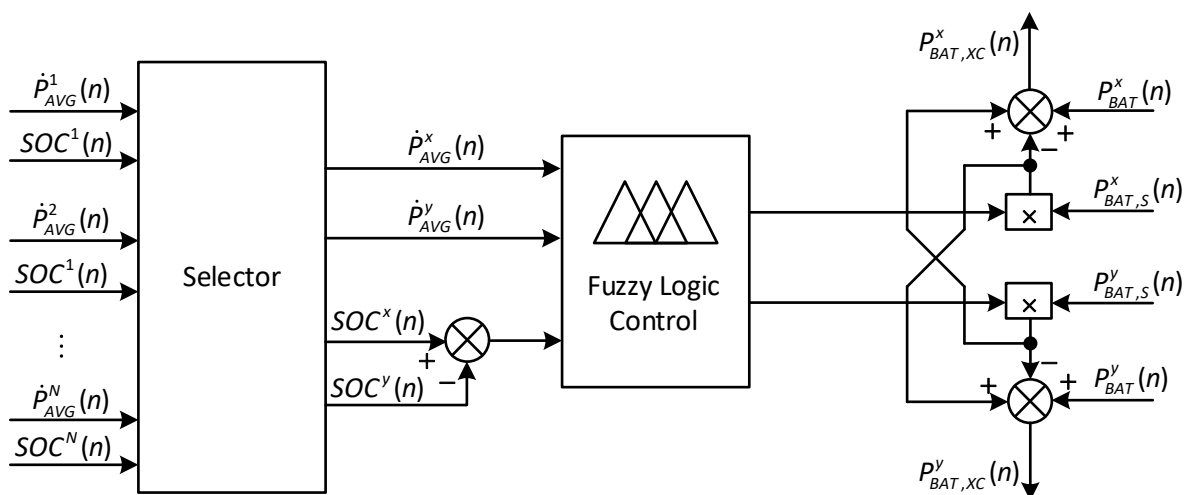
Después de producirse el intercambio de potencia en cada muestra, existe la probabilidad de que todavía ciertas microrredes tengan un exceso o escasez de energía en sus sistemas de almacenamiento. Por esta razón es necesario que cada microrred tenga su EMS encargado de inyectar energía a la red eléctrica o a su vez comprar energía a la red según sean sus necesidades.

Para éste bloque se utiliza el controlador fuzzy logic descrito en el capítulo en (Diego Arcos-Aviles et al., 2018)

Cada una de las microrredes opera con el EMS descrito al final del capítulo III, tomado de (Diego Arcos-Aviles et al., 2018).

**Figura 16.**

*Diagrama de control del intercambio de potencia entre microrredes*

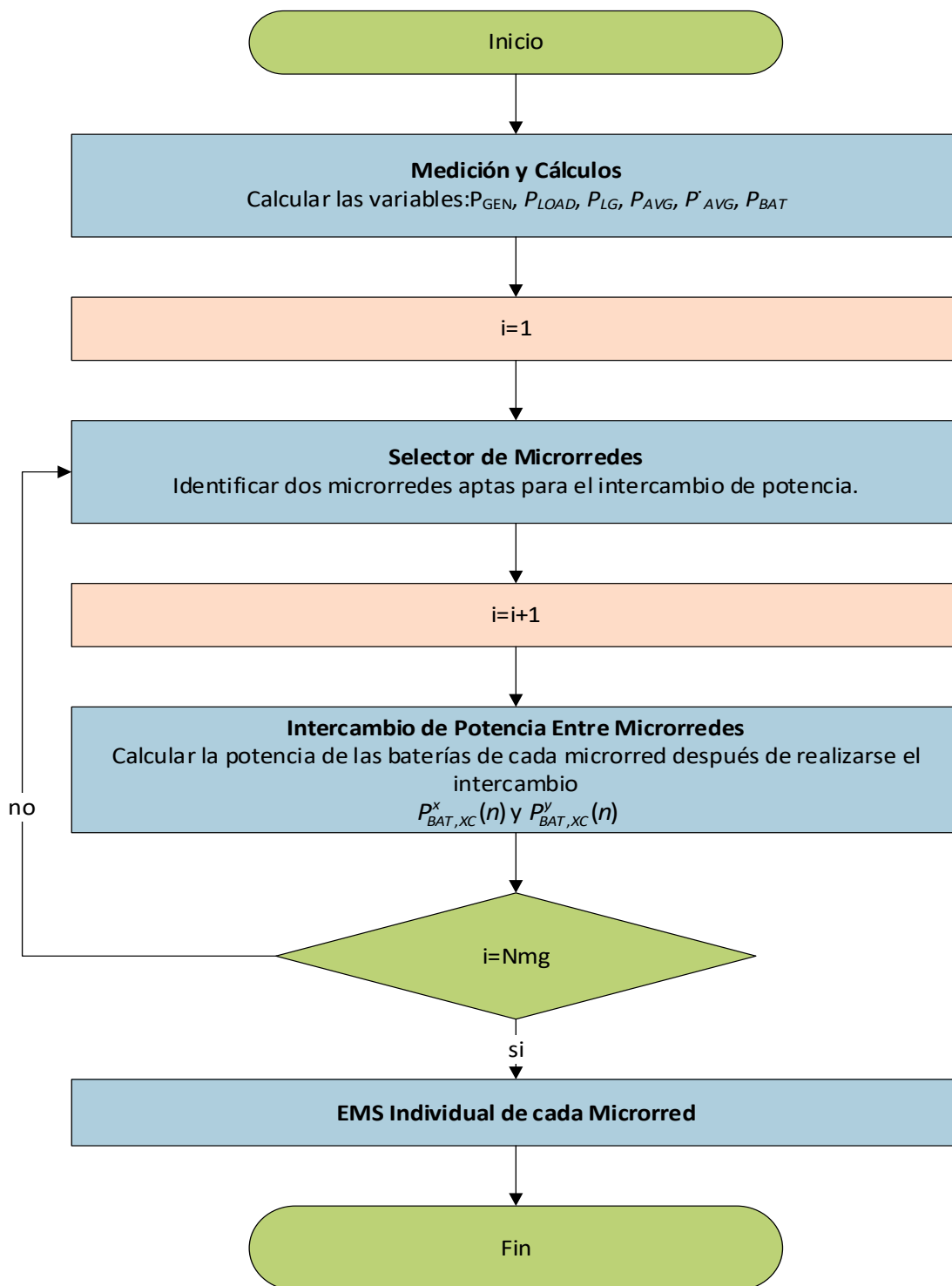


*Nota.* La figura muestra un diagrama de control de la estrategia de gestión energética para el intercambio de potencia entre microrredes.

Los bloques descritos anteriormente conforman la estrategia de gestión energética para el intercambio de potencia entre 'n' número de microrredes, a continuación, se muestra en la figura 17, un diagrama de flujo donde se establece el orden en que se debe ejecutar cada uno para un correcto funcionamiento de la estrategia, donde el valor de la variable  $Nmg$ , se calcula al tomar la parte entera que resulta de dividir el número de microrredes entre dos.

Figura 17

Diagrama de flujo de la estrategia de gestión energética



*Nota.* La figura muestra un diagrama de flujo de la estrategia de gestión energética que permite el intercambio de potencia entre los sistemas de almacenamiento de n número de microrredes.

### ***Ajuste de parámetros del EMS individual***

Al realizarse el intercambio, se pudo notar que cada microrred requiere intercambiar menos energía con la red eléctrica comparado a cuando funcionan individualmente (sin intercambios de potencia). En el escenario donde no se intercambia potencia entre microrredes, cuando la microrred tiene un exceso o déficit de energía, dicha microrred opta por inyectar energía a la red o comprar energía según sea el caso, al trabajar de esta manera el controlador del EMS individual es el único que realiza estas compensaciones.

Por otro lado, cuando la microrred intercambia potencia con otra, el controlador encargado de realizar este proceso busca compensar el exceso o déficit de energía mediante el intercambio de potencia con otras microrredes y posterior a ello el controlador del EMS individual de cada microrred también busca suprimir el exceso o déficit de energía, pero esta vez intercambia potencia con la red eléctrica. En este escenario se tiene dos controladores que trabajan simultáneamente. En un principio el controlador individual de cada microrred estuvo diseñado para trabajar solo, por esta razón es necesario calibrar dicho controlador para que ahora trabaje correctamente junto con el otro.

Para ajustar los parámetros del EMS individual de cada microrred se modificaron las reglas del controlador. Tras realizar varias simulaciones se pudo observar que en ciertos períodos de tiempo el estado de carga de las baterías se salía de los rangos establecidos, entonces al observar el comportamiento previo a esos períodos de tiempo, se determinó que para ciertos valores de



$\dot{P}_{AVG}$  y  $SOC^x$  es necesario tomar acciones menos agresivas para la salida del controlador. En la tabla se muestra la modificación de las reglas realizada para la microrred 1.

**Tabla 3**

*Modificación de reglas del controlador de la MG1*

Microrred 1						
Regla	PAVG	SOC	Sin intercambio	Intercambio entre 3MG	Intercambio entre 5MG	PXC
R1	NB	NB	PSS	PSS	ZE	ZE
R2	NB	NS	PSS	PSS	ZE	ZE
R3	NB	ZE	NS	ZE	ZE	ZE
R4	NB	PS	NSS	NSS	ZE	ZE
R5	NB	PB	NB	NM	ZE	ZE
R6	NS	NB	PSS	PSS	PSS	PSS
R7	NS	NS	ZE	ZE	ZE	ZE
R8	NS	ZE	NSS	ZE	ZE	ZE
R9	NS	PS	NS	NS	ZE	ZE
R10	NS	PB	NM	NM	ZE	ZE
R11	ZE	NB	PS	PS	PM	PM
R12	ZE	NS	PSS	PSS	PSS	PSS
R13	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
R14	ZE	PS	NSS	NSS	NSS	NSS
R15	ZE	PB	NSS	NS	NSS	NSS
R16	PS	NB	PM	PM	PM	PM
R17	PS	NS	PSS	PS	PS	PS
R18	PS	ZE	PSS	PSS	PSS	PSS
R19	PS	PS	PM	PM	ZE	ZE
R20	PS	PB	NSS	NSS	ZE	ZE
R21	PB	NB	PB	PB	PM	PM
R22	PB	NS	PM	PM	PS	PS
R23	PB	ZE	PS	PS	PSS	PSS
R24	PB	PS	PSS	PSS	ZE	ZE
R25	PB	PB	NSS	NSS	ZE	ZE

*Nota.* La tabla muestra las reglas que se utilizaron para el EMS de la microrred 1 en tres escenarios, sin intercambio de potencia, con intercambio de potencia entre tres microrredes y con intercambio de potencia entre cinco microrredes.

## Capítulo V

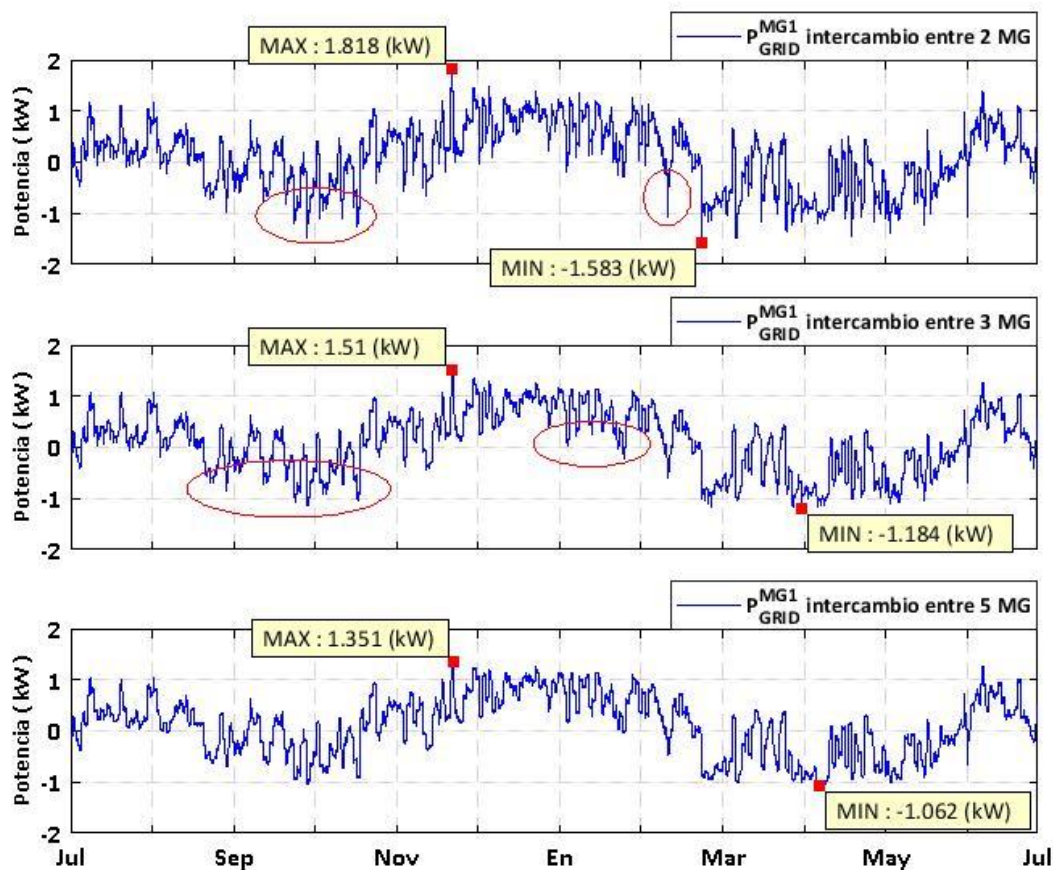
### Comparación de resultados de las estrategias de gestión de energía de cada escenario

El análisis de comparación se realizará en base a los parámetros de calidad definidos previamente. Entre éstos parámetros de calidad esta  $P_{G,MAX}$  máxima potencia suministrada por la red eléctrica en un año,  $P_{G,MIN}$  la máxima potencia inyectada a la red eléctrica en un año,  $MPD$  el máximo valor de potencia de la derivada de  $P_{GRID}$ ,  $APD$  el promedio de la derivada de  $P_{GRID}$  en un año,  $PVR$  el rango de variación de potencia del perfil de red,  $THD$  la variabilidad de la potencia del perfil de red. De modo que para cada uno de los criterios de calidad un menor valor implica un mejor desempeño de la microrred.

En general, se tiene una mejoría de todas las microrredes al intercambiar energía unas con otras. Esta mejoría se puede observar al comparar los perfiles de red en los distintos escenarios, puesto que se puede notar la reducción de picos y fluctuaciones en el mismo. A continuación, en la figura 18 se muestra una comparación del perfil de red de la microrred uno cuando intercambia energía entre 2, 3 y 5 microrredes. Se puede ver que conforme se aumentan microrredes al sistema, se reducen los valores máximos y mínimos de la potencia de red, además que se observa una mejora en cuanto a la suavidad del perfil ya que ciertos picos desaparecen (áreas marcadas en círculos rojos).

Figura 18

Comparación del perfil de red de la MG1 en tres escenarios.

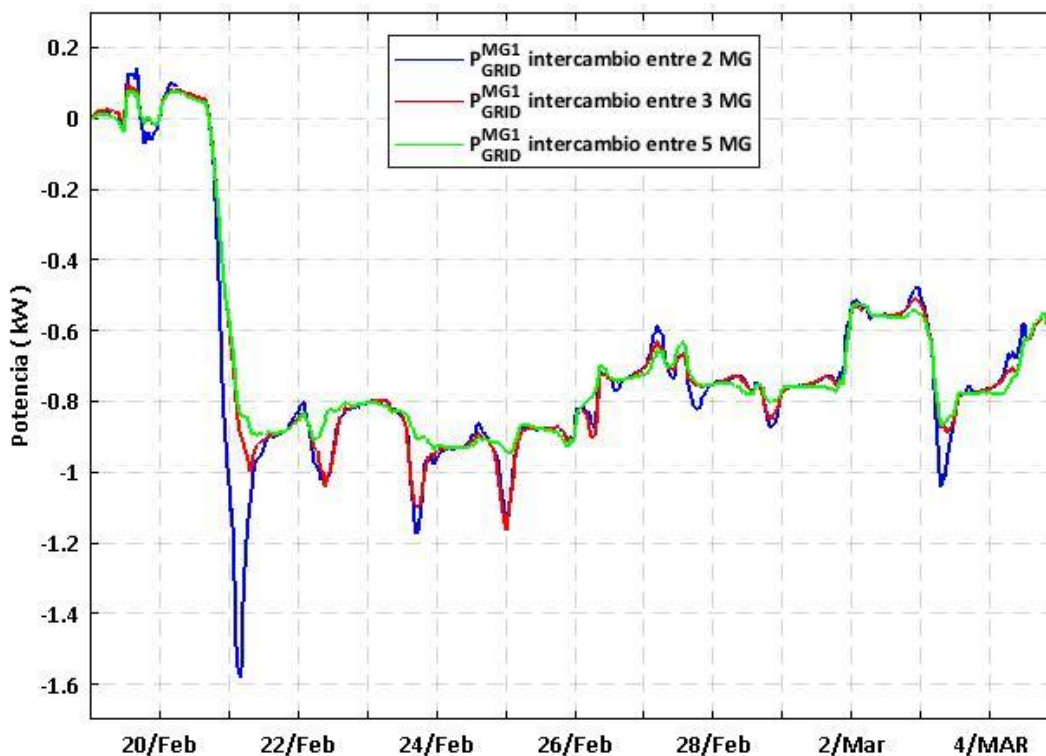


*Nota.* La figura muestra una comparación de los perfiles de red de la microrred 1 obtenidos en tres escenarios distintos.

Para que se pueda evidenciar de mejor manera el comportamiento de los perfiles de red al realizar el intercambio en cada escenario, se ha tomado una ventana de tiempo de la microrred 1, que corresponde al intervalo entre el 20 de febrero y 4 de marzo, como se puede ver en la figura 19. Donde se ve claramente la reducción de picos y fluctuaciones.

Figura 19

Ventana de tiempo del perfil de red de la MG 1.

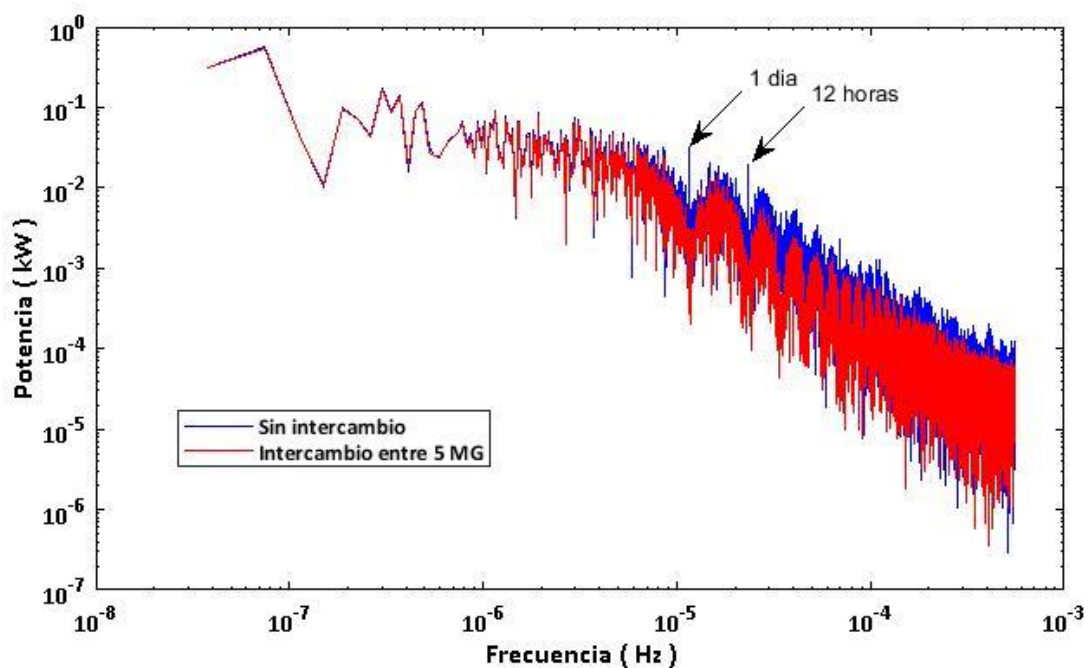


*Nota.* En la figura se muestra el perfil de red de la MG 1 en cada escenario, se puede notar que la gráfica es más suave conforme se aumentan microrredes al sistema.

Se ha hecho un análisis espectral en el perfil de red de la MG1 en donde se comparan los escenarios cuando la microrred no intercambia potencia y cuando se realiza el intercambio con 5 microrredes, como se muestra en la figura 20. Se puede ver en color azul las componentes de frecuencia correspondientes a períodos de un día y 12 horas que se atenúan después de realizarse el intercambio, al igual que sus múltiplos de frecuencias más altas.

Figura 20

*Análisis espectral del perfil de red de la microrred 1*

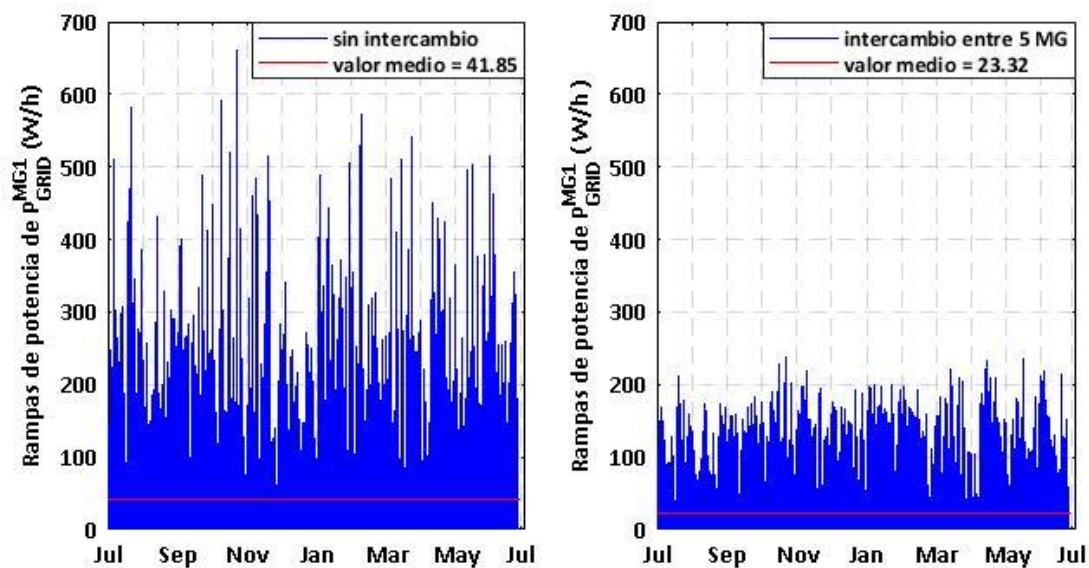


*Nota.* La figura muestra un análisis espectral del perfil de red de la microrred 1

Adicionalmente, en la figura 21 se puede notar una reducción significativa en las rampas de potencia del perfil de red de la microrred 1, al comparar el escenario de cinco microrredes interconectadas y cuando funciona la microrred sin intercambios de potencia. Con la estrategia de gestión energética planteada se logra una reducción del valor medio en un 55,7%. Con lo que se puede concluir que se han eliminado picos grandes que provocan una razón de cambio significativa en el perfil de red.

Figura 21.

Rampas de potencia del perfil de red de MG1



*Nota.* La figura muestra la reducción de rampas de potencia de la microrred 1.

Los resultados de la microrred 1 ilustrados en las figuras anteriores se pueden corroborar mediante los parámetros de calidad calculados, los mismos que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Parámetros de calidad de la microrred 1

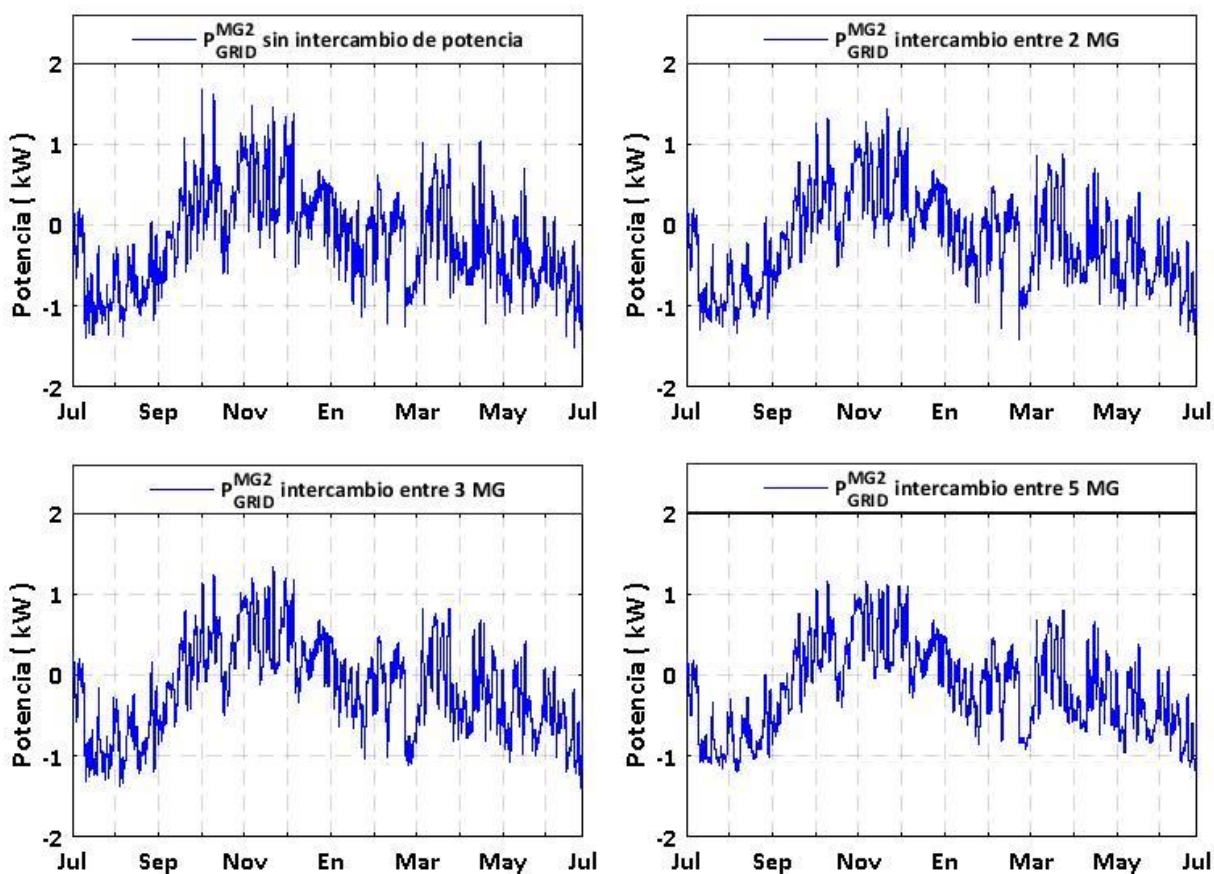
Escenario	MICRORRED 1					
	Pred max	Pred min	MPD	APD	PVR	THD
Sin conexión	1,8744	-1,6253	660,5696	41,8445	0,3440	3,8853
conexión 2 MG	1,8180	-1,5825	579,2442	38,5348	0,3342	3,8804
conexión 3 MG	1,5102	-1,1844	412,6160	26,6105	0,2649	3,5353
conexión 5 MG	1,3513	-1,0620	237,4767	23,3149	0,2372	3,4459

Nota. La tabla muestra los parámetros de calidad de la microrred 1 obtenidos en cada uno de los escenarios planteados.

Para la microrred 2 se ha obtenido los perfiles de red en todos los escenarios planteados, los mismos que se muestran en la figura 22 y en la tabla 5 se pueden ver los parámetros de calidad obtenidos.

**Figura 22**

*Perfiles de red de la MG2 en cada escenario*



*Nota.* La figura muestra todos los perfiles de red de la MG 2 obtenidos como resultado del intercambio de potencia en cada uno de los escenarios.

**Tabla 5**

*Parámetros de calidad de la microrred 2*

Escenario	MICRORRED 2					
	Pred max	Pred min	MPD	APD	PVR	THD
Sin conexión	1,6806	-1,5122	706,8057	36,3354	0,3776	2,4540
conexión 2 MG	1,4300	-1,4162	681,5629	27,1106	0,3366	2,3121
conexión 3 MG	1,3262	-1,3922	500,7944	26,4375	0,3215	2,3396
conexión 5 MG	1,1537	-1,1956	282,1971	21,6965	0,2778	2,1456

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de calidad de la microrred 2 obtenidos en cada uno de los escenarios planteados.

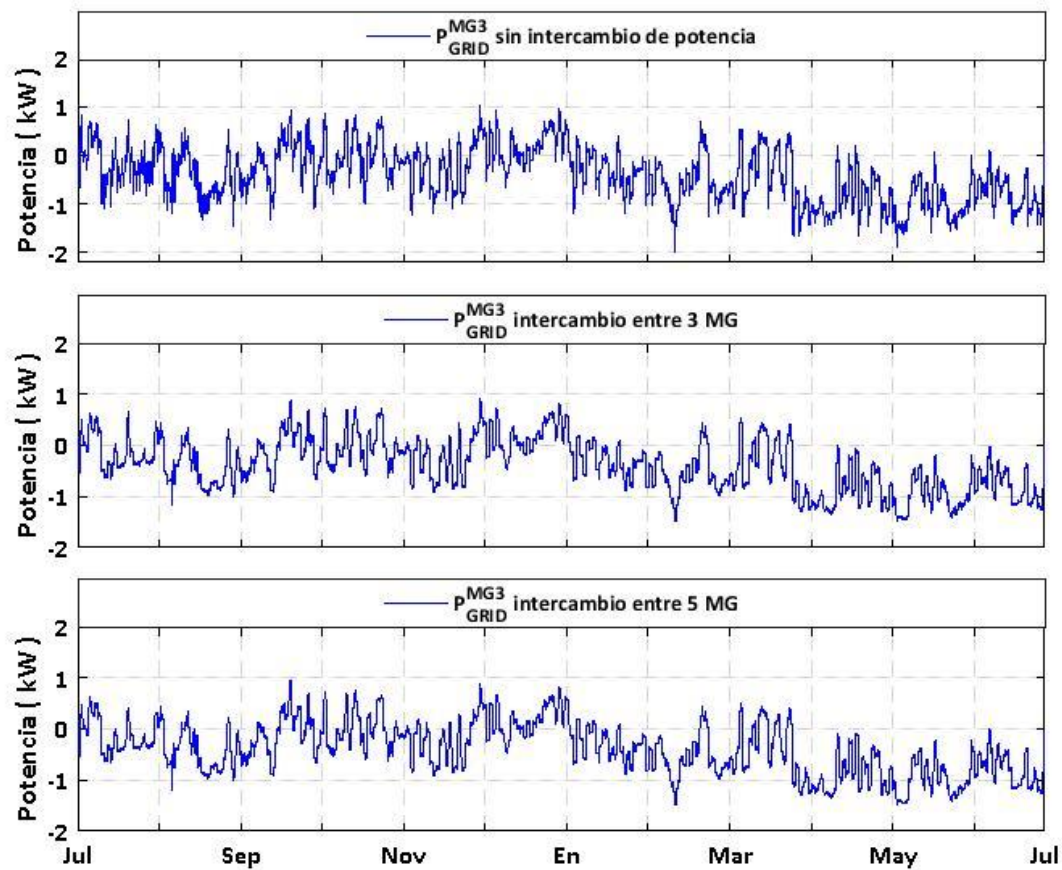
En el escenario de dos microrredes interconectadas se han tomado en cuenta las microrredes 1 y 2, por lo tanto, la microrred 3 está presente únicamente en los escenarios de 3 microrredes interconectadas y 5 microrredes interconectadas.

A continuación, en la figura 23 se muestran los perfiles de red de la microrred 3 seguido de sus parámetros de calidad en la tabla 5.



Figura 23

Perfiles de red de la MG3 en cada escenario



*Nota.* La figura muestra todos los perfiles de red de la microrred 2 obtenidos como resultado del intercambio de potencia en cada uno de los escenarios.

**Tabla 6***Parámetros de calidad de la microrred 3*

Escenario	MICRORRED 3					
	Pred max	Pred min	MPD	APD	PVR	THD
Sin conexión	1,0349	-1,9852	612,6463	43,3754	0,3044	1,0810
conexión 3 MG	0,9089	-1,4907	307,4324	24,9808	0,2419	0,9509
conexión 5 MG	0,9383	-1,4907	215,7928	24,3484	0,2449	0,9254

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de calidad de la microrred 3 obtenidos en cada uno de los escenarios planteados.

Las microrredes 4 y 5 están presentes únicamente en el escenario de 5 microrredes interconectadas, sin embargo, de igual manera se puede ver una mejoría al compararlas cuando funcionan individualmente, sin intercambiar potencia y en el escenario de 5 microrredes interconectadas. De igual manera como las otras microrredes, se han obtenido las gráficas de los perfiles de red mostrados en las figuras 24 y 25. También se calcularon los parámetros de calidad correspondientes, los mismos que se puede observar en las tablas 6 y 7.

**Tabla 7***Parámetros de calidad de la microrred 4*

Escenario	MICRORRED 4					
	Pred max	Pred min	MPD	APD	PVR	THD
Sin conexión	1,3955	-2,2813	745,1965	51,7811	0,4179	0,6766
conexión 5 MG	0,7779	-1,8528	218,0244	22,6975	0,2990	0,5365

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de calidad de la microrred 4

Tabla 8

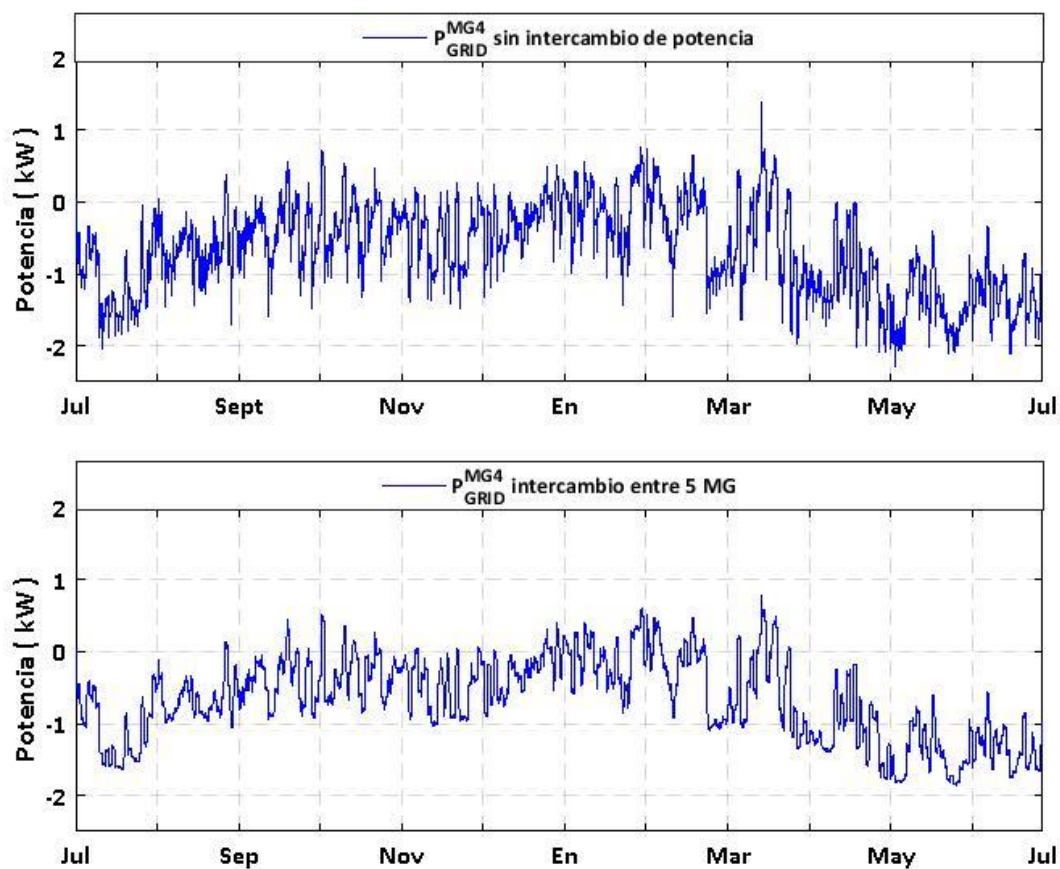
Parámetros de calidad de la microrred 5

Escenario	MICRORRED 5					
	Pred max	Pred min	MPD	APD	PVR	THD
Sin conexión	2,5266	-1,8281	765,8100	47,0126	0,4243	2,7143
conexión 5 MG	2,1233	-1,2465	301,7071	25,4588	0,3283	2,1405

Nota. La tabla muestra los parámetros de calidad de la microrred 4

Figura 24

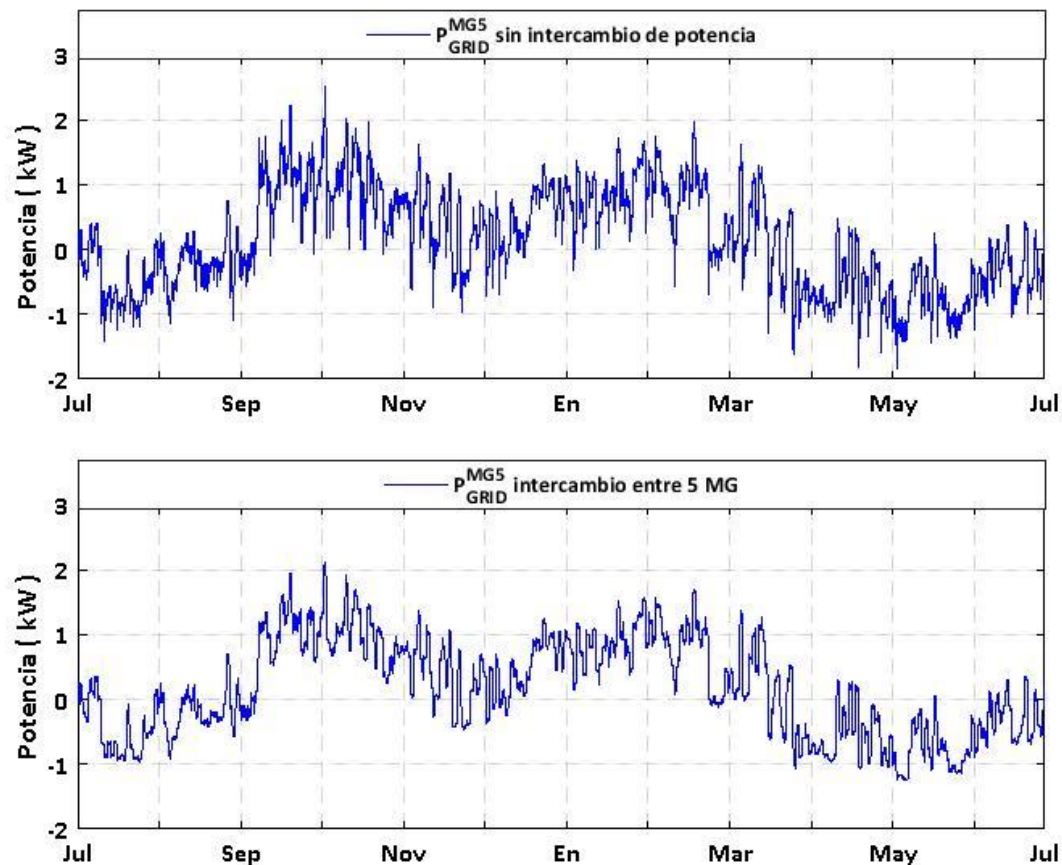
Perfiles de red de la MG4



*Nota.* La figura muestra los perfiles de red de la microrred 4.

**Figura 25**

*Perfiles de red de la MG5*



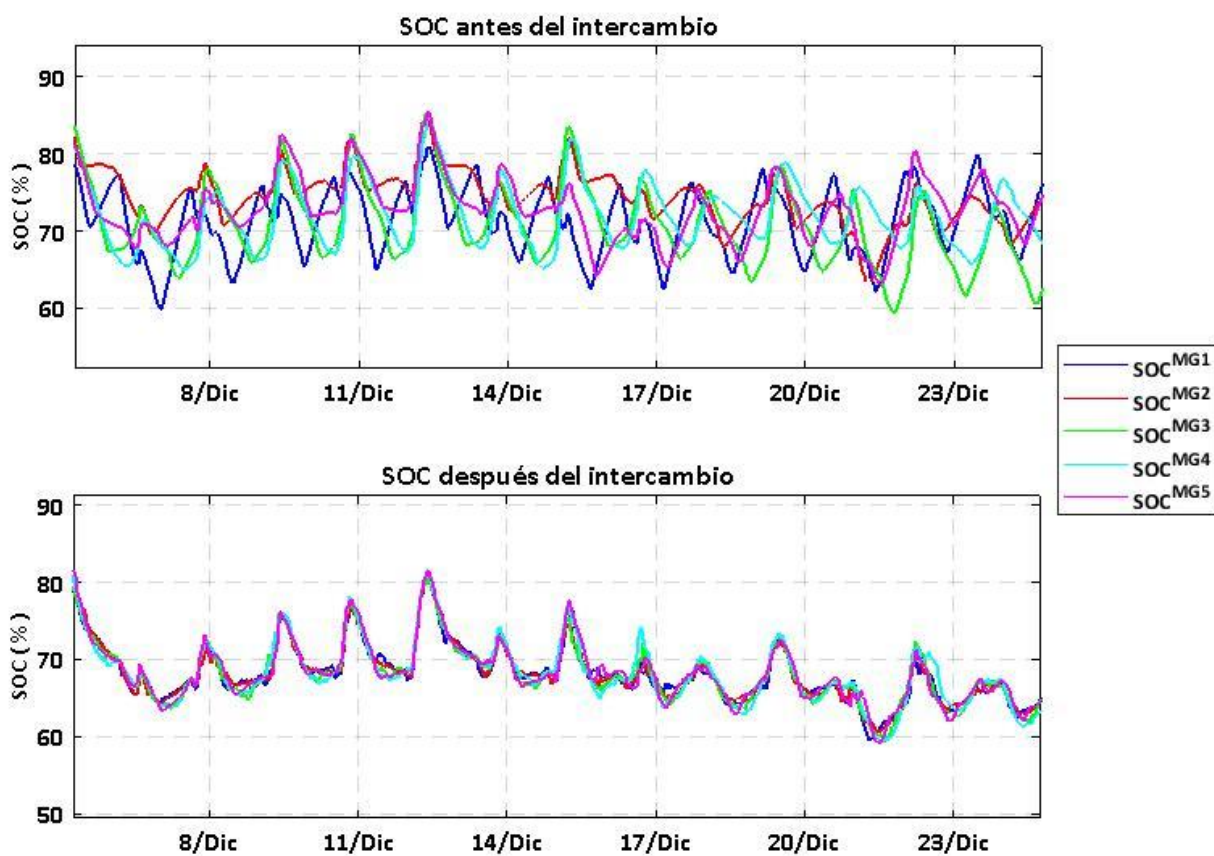
*Nota.* La figura muestra todos los perfiles de red de la microrred 5.

En cuanto al estado de carga de las baterías, en la figura 26 se puede observar una comparación entre el SOC de las microrredes antes y después del intercambio. Se observa se reducen ciertos picos de algunas microrredes y además tienden a sincronizarse. Cabe recalcar que el SOC de todas las microrredes se mantiene dentro del rango de 50% y 100% con la finalidad de

evitar sobrecargas y descargas profundas que provocan que el plomo en las placas de la batería se desgaste. De esta manera se puede prolongar su tiempo de vida útil.

**Figura 26**

*Comparación del SOC de todas las microrredes antes y después del intercambio*



*Nota.* La figura muestra el estado de carga de las baterías de todas las microrredes antes y después del intercambio de potencia.

## Capítulo VI

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolla una estrategia de gestión energética capaz de compensar cierta cantidad de exceso, o déficit de energía en microrredes residenciales interconectadas, mediante el intercambio de potencia entre sus sistemas de almacenamiento.

Mediante el intercambio de potencia entre microrredes se logra una reducción de picos y fluctuaciones en el perfil de potencia que cada microrred intercambia con la red eléctrica, lo cual permite dar estabilidad a la red principal al inyectar potencia, se evita eventos de sobretensión que pueden ser causantes de daños producidos en instalaciones además que en el ámbito económico existen penalizaciones al introducir armónicos a la red eléctrica mediante intercambios de potencia con la misma.

Se ha determinado que realizar intercambios con mas de tres microrredes sin conocer con exactitud las microrredes aptas para entregar o recibir energía, provoca cargas y descargas innecesarias en los sistemas de almacenamiento. Debido a que los controladores buscan evitar estas sobrecargas y sobre descargas, el perfil de red sufre cambios bruscos. Por esta razón se ha desarrollado un método para identificar microrredes con exceso y déficit de energía.

El método utilizado para identificar microrredes con exceso o escases de energía utiliza el estado de carga de las baterías de cada microrred y una predicción local de consumo y generación obtenida mediante la derivada de la potencia neta de cada microrred  $\dot{P}_{AVG}$ . La microrred que presenta un valor de  $\dot{P}_{AVG}$  negativo indica que su generación está en aumento o a su vez el consumo disminuye y viceversa. Por lo tanto, el exceso de energía de una microrred se determina

por un  $\dot{P}_{AVG}$  bajo y un valor de SOC alto. De la misma manera, el déficit de energía de la microrred se determina por un valor de  $\dot{P}_{AVG}$  alto y un valor de SOC bajo. Mediante estos datos se realiza el intercambio de potencia entre las microrredes que tengan exceso de energía con las que tienen déficit.

Para que la estrategia de gestión energética cumpla con los objetivos propuestos fue necesario modificar la base de reglas del controlador del EMS individual de cada microrred con el objetivo de tomar acciones menos agresivas para la salida del controlador. Esto se debe a que el EMS de cada microrred al igual que el controlador del intercambio buscan reducir los picos y fluctuaciones en el perfil de red. En un principio el controlador del EMS individual de cada microrred estuvo diseñado para trabajar solo.

Se puede cuantificar la mejoría de cada microrred mediante los análisis realizados en las simulaciones, así como también mediante el cálculo de los parámetros de calidad establecidos, de esta forma se puede comparar esta estrategia con otras y tener una base para trabajos futuros.

### **Recomendaciones**

Se recomienda realizar intercambios de potencia entre microrredes menores al 30% de la energía almacenada en cada microrred, ya que al extraer una cantidad significativa de energía de una batería puede provocar que el controlador tome acciones muy agresivas al intentar compensar el cambio realizado. Lo que conlleva a que el SOC salga de los rangos establecidos.

### Referencias

- Afrakhte, H., & Bayat, P. (2020). A contingency based energy management strategy for multi-microgrids considering battery energy storage systems and electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27, 101087. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101087>
- Akorede, M. F., Hizam, H., & Pouresmaeil, E. (2010). Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 724–734. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.10.025>
- Anvari-Moghaddam, A., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Monsef, H., & Rahimi-Kian, A. (2017). Efficient energy management for a grid-tied residential microgrid. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 11(11), 2752–2761. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1129>
- Arcos-Aviles, D., Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., Guinjoan, F., & Marietta, M. P. (2015). Optimal Fuzzy Logic EMS design for residential grid-connected microgrid with hybrid renewable generation and storage. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2015-September*, 742–747. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2015.7281561>
- Arcos-Aviles, Diego, García-Gutierrez, G., Guinjoan, F., Ayala, P., Ibarra, A., Motoasca, E., Llanos, J., & Pascual, J. (2020). *Fuzzy-based power exchange management between grid-tied interconnected residential microgrids.*
- Arcos-Aviles, Diego, Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., & Guinjoan, F. (2018). Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 530–543. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>



- Badii, M. H., Guillen, A., & Abreu, J. L. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation). In *Daena: International Journal of Good Conscience* (Vol. 11, Issue 1).
- Bermeo, M., & Bravo, B. (2019). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA MICRORREDES ELÉCTRICAS INTERCONECTADAS*. [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control.]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/20561>
- Borbely, A.-M., & Kreider, J. F. (2001). *Distributed Generation : The Power Paradigm for the New Millennium*. <https://doi.org/10.1201/9781420042399>
- Bordons, C., García-Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(2), 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001>
- Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B., & Hu, G. (2011). Smart energy management system for optimal microgrid economic operation. *IET Renewable Power Generation*, 5(3), 258–267. <https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2010.0052>
- Energía – Desarrollo Sostenible*. (n.d.). Retrieved July 20, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Galindo Gómez, J. (n.d.). *Conjuntos y Sistemas Difusos (Lógica Difusa y Aplicaciones)*.
- Hanania, J., Stenhouse, K., & Donev Jason. (2015). *Photovoltaic effect - Energy Education*. [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic\\_effect](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect)
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. In *IEEE Power and Energy*

*Magazine* (Vol. 5, Issue 4, pp. 78–94). <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>

Herzog, A. V., Lipman, T. E., & Kammen, D. M. (2016). *RENEWABLE ENERGY SOURCES*.

Igualada, L., Corchero, C., Cruz-Zambrano, M., & Heredia, F. J. (2014). Optimal energy management for a residential microgrid including a vehicle-to-grid system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 2163–2172. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2318836>

Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., & Dimeas, A. (2008). Microgrids management. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3), 54–65. <https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702>

Kriett, P. O., & Salani, M. (2012). Optimal control of a residential microgrid. *Energy*, 42(1), 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.049>

Lasseeter, R. H. (2002). MicroGrids: A Conceptual Solution. *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 1, 305–308. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>

Lede, A. M. R., Molina, M. G., Martinez, M., & Mercado, P. E. (2017). Microgrid architectures for distributed generation: A brief review. *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2017.8126746>

Li, C., Shi, H., Cao, Y., Wang, J., Kuang, Y., Tan, Y., & Wei, J. (2015). Comprehensive review of renewable energy curtailment and avoidance: A specific example in China. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41, pp. 1067–1079). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.009>

Mahmud, K., Nizami, M. S. H., Ravishankar, J., Hossain, M. J., & Siano, P. (2020). Multiple Home-

- to-Home Energy Transactions for Peak Load Shaving. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1074–1085. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2964593>
- Mariam, L., Basu, M., & Conlon, M. F. (2016). Microgrid: Architecture, policy and future trends. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 64, pp. 477–489). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.037>
- Medina, R. D. (2014). Microrredes basadas en Electrónica de Potencia: Características, Operación y Estabilidad. *INGENIUS*, 12, 15–23. <https://doi.org/10.17163/ings.n12.2014.02>
- Monfared, H. J., Ghasemi, A., Loni, A., & Marzband, M. (2019). A hybrid price-based demand response program for the residential micro-grid. *Energy*, 185, 274–285. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.045>
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G. A., & Hatziaargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1905–1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Orellana, A., & Sarango, J. (2015). *Estudio de factibilidad para el uso de energía solar y eólica en sistemas de alumbrado público para la vía de integración barrial, sector el plateado servido por la empresa eléctrica regional del sur*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Oscar, G., & Duarte, V. (n.d.). Sistemas de lógica difusa. Fundamentos. *Ingeniería e Investigación* No. 42.
- Pascual, J., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2014). Implementation and control of a residential electrothermal microgrid based on renewable energies, a hybrid storage system and

- demand side management. *Energies*, 7(1), 210–237. <https://doi.org/10.3390/en7010210>
- Robles, C., & Rodríguez, O. (2018). Un panoramade las energías renovables en el mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*.
- Rodrigues, D. L., Ye, X., Xia, X., & Zhu, B. (2020). Battery energy storage sizing optimisation for different ownership structures in a peer-to-peer energy sharing community. *Applied Energy*, 262, 114498. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114498>
- Romerio, F. (n.d.). *La energía como fuente de crecimiento y desarrollo en la perspectiva del fin de la era de los combustibles fósiles*. Retrieved June 21, 2020, from <http://hdr.undp.org/reports/>
- Salas, P., & Guerrero, J. M. (2014). Mas Roig Mini-Grid: A Renewable-Energy-Based Rural Islanded Microgrid. *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*, 975–982. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850544>
- Tiwari, G., & Mishra, R. (2012). *Advanced renewable energy sources*. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=s8gng2vA\\_88C&oi=fnd&pg=PA483&dq=RENEWABLE+ENERGY+sources+definitions&ots=ubaa5dyl9o&sig=QQiOWR4pxun6wEpMr48\\_IF1S2As](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=s8gng2vA_88C&oi=fnd&pg=PA483&dq=RENEWABLE+ENERGY+sources+definitions&ots=ubaa5dyl9o&sig=QQiOWR4pxun6wEpMr48_IF1S2As)
- Tolón, M., & Tamara, I. (2013). *Operación y Gestión de Microrredes Energéticas Urbanas rn un entorno de sostenibilidad Energética y Ambiental*.
- Zhang, W., & Xu, Y. (2019). Distributed Optimal Control for Multiple Microgrids in a Distribution Network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4), 3765–3779. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2834921>

Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. In *Applied Energy* (Vol. 222, pp. 1033–1055). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>