



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **DISEÑO DE UN ALGORITMO DE GESTIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA EL INTERCAMBIO DE POTENCIA ENTRE MICRORREDES ELÉCTRICAS.**

**VÍCTOR HUGO RAMOS RODRÍGUEZ**

**Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo,  
presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH,  
como requisito parcial para la obtención del grado de:**

**MAGÍSTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN  
INDUSTRIAL**

**RIOBAMBA - ECUADOR**

Noviembre 2020

©2020, Víctor Hugo Ramos Rodríguez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación** modalidad **Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado “DISEÑO DE UN ALGORITMO DE GESTIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA EL INTERCAMBIO DE POTENCIA ENTRE MICRORREDES ELÉCTRICAS”, de responsabilidad del Sr. Víctor Hugo Ramos Rodríguez ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Luis Eduardo Hidalgo Almeida; PhD.  
**PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Ing. Diego Gustavo Arcos Avilés; PhD.  
**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Ing. Henry Ernesto Vallejo Vizhuete; Mag.  
**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Ing. Fausto Ramiro Cabrera Aguayo; Mag.  
**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_  
FIRMA

Riobamba, Noviembre 2020

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Ramos Rodríguez Víctor Hugo, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, “DISEÑO DE UN ALGORITMO DE GESTIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA PARA EL INTERCAMBIO DE POTENCIA ENTRE MICRORREDES ELÉCTRICAS”, fue desarrollado en base a los estudios acerca de las estrategias de gestión energética pertenecientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad Pública de Navarra y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

VÍCTOR HUGO RAMOS RODRÍGUEZ  
No. Cédula: 1804237137

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Víctor Hugo Ramos Rodríguez, declaro que el presente proyecto de investigación es de mi autoría, basado en los estudios acerca de las estrategias de gestión energética pertenecientes a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad Pública de Navarra y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación de Maestría.

---

VÍCTOR HUGO RAMOS RODRÍGUEZ

No. Cédula: 1804237137

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico de todo corazón a mi amada e idolatrada esposa por su amor y apoyo incondicional en todas las dificultades que se han presentado en todos los ámbitos de la vida estando siempre conmigo alentando a seguir siempre hacia adelante, a mis hijos que son la razón de mi vida y que me impulsan a seguir adelante siendo mi todo, a mis padres por sus consejos, voz de aliento y ejemplo de valores éticos y morales, a mis hermanas por alegrarse ante los retos que se han superado y por supuesto a la memoria de mi hermano que siento que siempre está junto a mí apoyándome como siempre solía hacerlo. ¡¡¡¡De ustedes éste triunfo!!!!

Víctor H. Ramos Rodríguez

## AGRADECIMIENTO

Mediante estas cortas pero sentidas líneas quiero hacer extensivo mi sincero agradecimiento en primer lugar a Dios por haberme guiado por el camino del bien, a mis familiares por estar siempre a mi lado apoyándome incondicionalmente, a la ilustre Escuela Superior Politécnica de Chimborazo “ESPOCH” que con todo su contingente de profesores han impartido sus conocimientos para enriquecernos con el saber. Al Dr. Diego Arcos, quien en calidad de tutor con muchísima paciencia ha estado siempre presto brindándome toda su experticia, valiosos conocimientos, consejos y sus constructivas sugerencias para la realización del presente proyecto investigativo. Al Mcs. Henry Vallejo y al Mcs. Fausto Cabrera por ser parte esencial en la consecución del presente proyecto por sus meritorios comentarios, sugerencias y observaciones. Así mismo un agradecimiento afectuoso a los compañeros de aulas por compartir gratos momentos, así como también a los compañeros de labores y más, que de una u otra forma han permitido seguir adelante para la finalización de éste proyecto.

¡¡¡¡¡ Infinitas gracias a todos y todas !!!!!!!.

Víctor H. Ramos Rodríguez.

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

RESUMEN.....	xv
SUMMARY .....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Situación problemática.....	1
1.2. Formulación del problema .....	3
1.3. Preguntas directrices .....	3
1.4. Justificación de la investigación.....	3
1.5. Objetivos de la investigación .....	5
1.5.1. Objetivo General .....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Hipótesis.....	5
CAPÍTULO II .....	6
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1. Antecedentes del problema.....	6
2.2. Bases Teóricas .....	8
2.2.1. Control Lógica Difusa.:.....	8
2.2.1.1. Conceptos básicos .....	9
2.2.1.2. Operaciones en conjuntos difusos.....	10
2.2.1.3. Propiedades de los conjuntos difusos.....	11



2.2.2. Control Fuzzy.....	11
2.2.2.1. Inferencia Difusa.....	11
2.2.3. Fuentes de energía renovables. ....	13
2.2.3.1. Energía Eólica.....	13
2.2.3.2. Energía Solar Fotovoltaica.....	13
2.2.3.3. Energía Hidráulica. ....	14
2.2.3.4. Biomasa.....	14
2.2.3.5. Energía Geotérmica.....	15
2.2.4. Red inteligente. ....	15
2.2.4.1. Objetivos de las redes inteligentes: .....	16
2.2.4.2. Comparación entre las redes convencionales y las redes inteligentes.....	17
2.2.4.3. Tecnologías inmersas en las Redes Inteligentes. ....	19
2.2.5. Microrredes. ....	20
2.2.5.1. Características: .....	21
2.2.5.2. Elementos básicos de las microrredes.....	21
2.2.5.3. Formas de operación de las Microrredes en relación a la Red Principal. ....	22
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>23</b>
<b>3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>23</b>
3.1. Intercambio entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2.....	24
3.1.1. Descripción de las microrredes.....	24
3.1.1.1. Microrred 1 .....	24
3.1.1.2. Microrred 2.....	26

3.1.2. Criterios de Calidad.....	28
3.1.2.1. Criterios de Calidad Microrred 1. ....	29
3.1.2.2. Criterios de Calidad Microrred 2. ....	29
3.1.3. Diagrama de Bloques. ....	29
3.1.4. Diseño de la estrategia de gestión de energía basado en FLC .....	31
3.1.4.1. Entradas. ....	32
3.1.4.2. Salida. ....	33
3.1.4.3. Base de Reglas del Controlador. ....	33
3.2. Intercambio entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1.....	34
3.2.1. Base de Reglas del Controlador. ....	34
3.3. Intercambio entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1 y de la Microrred 1 hacia la Microrred 2. ....	35
3.3.1. Base de Reglas del Controlador. ....	36
CAPITULO IV.....	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2.....	37
4.2. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1.....	43
4.3. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2 y de la Microrred 2 hacia la Microrred 1. ....	48
CONCLUSIONES .....	55
RECOMENDACIONES .....	57
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1-2. Comparación entre las redes convencionales y las redes inteligentes. ....	17
Tabla 1-3: Índices de Calidad de la Microrred 1.....	29
Tabla 2-3: Índices de Calidad de la Microrred 2.....	29
Tabla 3-3: Potencias máxima y mínima de las MG1 y MG2.....	32
Tabla 4-3: Base de Reglas del Controlador FLC-Caso1.....	33
Tabla 5-3. Base de Reglas del Controlador FLC-Caso2.....	35
Tabla 6-3: Base de Reglas del Controlador FLC - Caso3.....	36
Tabla 1-4: Índices de calidad de la Microrred 1 – Caso 1.....	42
Tabla 2-4: Índices de calidad de la Microrred 2 – Caso 1.....	42
Tabla 3-4: Índices de calidad de la Microrred 2 – Caso 2.....	47
Tabla 4-4: Índices de calidad de la Microrred 1 – Caso 2.....	47
Tabla 5-4: Índices de calidad de la Microrred 1 - Caso 3.....	53
Tabla 6-4: Índices de calidad de la Microrred 2 - Caso 3.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1-2. Fuentes de energía primaria utilizadas desde 1850 hasta el presente y proyección hasta 2050. ....	6
Figura 2-2. Algunos parámetros de importancia de la Lógica Difusa.....	8
Figura 3-2. Funciones de pertenencia comúnmente utilizadas.....	9
Figura 4-2. Operaciones estándar en conjuntos difusos. ....	10
Figura 5-2. Modelo de la red eléctrica convencional y modelo futuro. ....	15
Figura 6-2. Esquema de una Red de Distribución Eléctrica con la incorporación de energías no convencionales. ....	16
Figura 7-2. Localización de las tecnologías relacionadas a las Redes Inteligentes.....	19
Figura 1-3. Topología de microrred residencial.....	23
Figura 2-3. Diagrama de bloques del FLC para el intercambio de potencia entre dos microrredes residenciales vecinas. ....	30
Figura 3-3. Funciones de pertenencia de las variables de entrada del Controlador. ....	32
Figura 4-3. Funciones de pertenencia de la variable de salida del Controlador.....	33

## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfico 1-3. Potencia fotovoltaica máxima de la Microrred 1.....	25
Gráfico 2-3. Potencia máxima de la carga de la Microrred 1. ....	25
Gráfico 3-3. SOC de la batería MG1. ....	26
Gráfico 4-3. Perfil de potencia intercambiada con la red.....	26
Gráfico 5-3. Potencia fotovoltaica máxima de la Microrred 2.....	26
Gráfico 6-3. Potencia máxima de la carga de la Microrred 2. ....	27
Gráfico 7-3. SOC de la batería MG2. ....	27
Gráfico 8-3. Perfil de potencia intercambiada con la red.....	27
Gráfico 1-4. Potencia intercambiada por la MG1. ....	37
Gráfico 2-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC. ....	38
Gráfico 3-4. Perfil de Potencia original de la MG1. ....	38
Gráfico 4-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC. ....	38
Gráfico 5-4. Perfil de Potencia original de la MG2. ....	38
Gráfico 6-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS_FLC en la Microrred 1. ....	39
Gráfico 7-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.....	40
Gráfico 8-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS.....	40
Gráfico 9-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS.....	41
Gráfico 10-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS_FLC en la Microrred 1. ....	41
Gráfico 11-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2. ....	42

Gráfico 12-4. Potencia intercambiada por la MG2. ....	43
Gráfico 13-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC. ....	43
Gráfico 14-4. Perfil de Potencia original de la MG1. ....	44
Gráfico 15-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS_FLC.....	44
Gráfico 16-4. Perfil de Potencia original de la MG2. ....	44
Gráfico 17-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 1.....	45
Gráfico 18-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.....	45
Gráfico 19-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS.....	46
Gráfico 20-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS.....	46
Gráfico 21-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 1. ....	46
Gráfico 22-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2. ....	47
Gráfico 23-4. Potencia intercambiada por la MG1 y la MG2.....	48
Gráfico 24-4. Perfil de potencia MG1 al aplicarse el EMS-Caso 3. ....	49
Gráfico 25-4. Perfil de Potencia original de la MG1. ....	49
Gráfico 26-4. Perfil de potencia MG2 al aplicarse el EMS – Caso 3.....	49
Gráfico 27-4. Perfil de Potencia original de la MG2. ....	50
Gráfico 28-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 1.....	50
Gráfico 29-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.....	51
Gráfico 30-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS-FLC.....	51

Gráfico 31-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS-FLC.....	52
Gráfico 32-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 1. ....	52
Gráfico 33-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 2. ....	53

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación, detalla el diseño de un algoritmo de gestión de energía basado en lógica difusa que realiza el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas (MG) interconectadas entre ellas para garantizar la provisión del suministro de energía eléctrica. Para el diseño del sistema de gestión de energía (EMS) se seleccionó el uso del Control Fuzzy Logic (FLC) por el conocimiento heurístico que se tiene del sistema, por tanto, el FLC no requiere aproximar el modelo matemático del sistema, ni tampoco necesita linealizarlo. Las microrredes en estudio se consideran de tipo residencial conectada a la red y utilizan la tasa de cambio de energía ERoC y el estado de carga de la batería (SOC) para aumentar-conservar-disminuir la potencia consumida/entregada por la red eléctrica. Para diseñar el EMS se analiza los perfiles de potencia de cada microrred tomando en cuenta el excedente de potencia generada, por lo que se planteó tres casos comprobando la hipótesis: primer caso, MG1 aporta una potencia máxima (PM) de 187,50W a la MG2; segundo caso, la MG2 aporta a la MG1 la PM de 125,00W y en el último caso el intercambio de potencia es bidireccional, aportando la MG1 a la MG2 una PM de 62,50W y la MG2 a la MG1 aporta una PM de 62,40W. En los dos primeros el SOC oscila al 75% (garantizando la vida útil de las baterías), no así en el tercer escenario, por tanto se necesitará obligatoriamente incluir a la variable SOC en el FLC para tomar acciones de control en función del estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía de cada microrred. La validación de las estrategias diseñadas se realizó en Matlab® evidenciando los intercambios de potencia, reduciendo las fluctuaciones y los picos de potencia, manteniendo los índices de calidad en niveles aceptables.

**Palabras clave:** <ALGORITMO DE GESTIÓN>, <MICRORRED ELÉCTRICA>, <INTERCAMBIO DE POTENCIA>, <CONTROL FUZZY LOGIC>, <PERFIL DE POTENCIA>, <ESTADO DE CARGA DE LA BATERÍA>.



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**



0003-DBRAI-UPT-IPEC-2020



## SUMMARY

This research work details the design of an energy management algorithm based on fuzzy logic that performs the exchange of power between two electrical microgrids (MG) interconnected between them to guarantee the provision of electrical energy supply. For the design of the energy management system (EMS), the use of the Fuzzy Logic Control (FLC) was selected due to the heuristic knowledge of the system, therefore, the FLC does not need to approximate the mathematical model of the system, nor does it need to linearize it. The microgrids under study are considered to be of a residential type connected to the grid and use the ERoC energy change rate and the state of charge of the battery (SOC) to increase- conserve-decrease the power consumed/delivered by the electrical network. To design the EMS, the power profiles of each microgrid are analyzed taking into account the excess power generated, for which three cases were proposed, testing the hypothesis: first case, MG1 provides maximum power (PM) of 187.50W to the MG2; In the second case, the MG2 provides the MG1 with a PM of 125.00W and in the latter case the power exchange is bidirectional, with the MG1 providing the MG2 with a PM of 62.50W and the MG2 providing the MG1 with a PM of 62, 40W. In the first two, the SOC oscillates at 75% (guaranteeing the useful life of the batteries), but not in the third scenario, therefore it will be necessary to include the SOC variable in the FLC to take control actions based on the state of a load of the energy storage systems of each microgrid. The validation of the designed strategies was carried out in Matlab®, evidencing the power exchanges, reducing fluctuations and power peaks, keeping the quality indices at acceptable levels.

**Keywords:** <MANAGEMENT ALGORITHM>, <ELECTRICAL MICROGRID>, <POWER EXCHANGE>, <FUZZY LOGIC CONTROL>, <POWER PROFILE>, <BATTERY STATE OF CHARGE>.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Situación problemática

El Ecuador es un país pequeño pero con abundante disponibilidad de fuentes renovables y limpias, que pueden servir de apoyo para la construcción de microrredes eléctricas y que podrán dotar del suministro de energía eléctrica limpia y segura. Las microrredes eléctricas se definen como un conjunto de elementos de generación distribuida (Distributed Generation - DG), cargas y sistemas de almacenamiento de energía (Energy Storage System - ESS), que tienen una estrategia de gestión de energía (Energy Management Strategy - EMS), están conectados en un punto único denominado punto de acoplamiento común (Point of Common Coupling - PCC) y que pueden trabajar de manera aislada o con conexión a la red eléctrica (Lasseter y Fellow, 2002: p.305; Arcos et al., 2016: p.1; Hatziaargyriou et al., 2007: p.79). Estos sistemas pueden ser gestionados de manera coordinada para suministrar electricidad de forma fiable (Bordons et al., 2015: p.117). La limitante de estos sistemas es el costo que puede representar su instalación debido a que es una tecnología que todavía no está implantada masivamente en los mercados, sin embargo las microrredes orientadas a la integración y la gestión eficaz de recursos renovables han obtenido importancia a nivel mundial (Blizard y Rabia: p.86).

En base a lo que dictamina el Artículo 15 de la Constitución de la República del Ecuador, la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica en el Artículo 26 establece que, “el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable promoverá el uso de tecnologías limpias y energías alternativas, de conformidad con lo señalado en la Constitución que propone desarrollar un sistema eléctrico sostenible, sustentado en el aprovechamiento de los recursos renovables de energía”. (Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica, 2015, p.13).

Por un lado el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017, p.64), versión aprobada por el Consejo Nacional de Planificación, el cual consta de nueve objetivos y que, específicamente en el objetivo 3 “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” indica lo siguiente: Una economía amigable con la naturaleza implica acoger el conjunto de saberes, conocimientos y aplicaciones tanto tradicionales como científicas, para marcar una nueva era de bioeconomía basada en el aprovechamiento sustentable de los recursos biológicos renovables para la producción de alimentos, energía y bienes industriales, obtenidos a través de transformaciones de material orgánico.”

Con este desafío, se busca reducir la dependencia de productos derivados de energías fósiles, y, así, modificar el patrón de producción y acumulación sin descuidar los límites biofísicos y ciclos naturales.

El Programa de Gobierno establece que “la Revolución Ecológica debe ser la consolidación del cambio de la matriz productiva y de la matriz energética, como base para la generación de empleo y riqueza, reduciendo las emisiones que contribuyen al cambio climático y garantizando la conservación y el mantenimiento de nuestro patrimonio natural” (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017, p.64). Bajo esta representación, la política ambiental del Gobierno del Ecuador perfila los esfuerzos para la construcción de un país que equilibre el uso de recursos renovables, la capacidad regenerativa y de asimilación de la naturaleza; enfoque con el que se prevé la disminución de la pobreza.

Por otro lado, la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), anteriormente Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), que es el ente regulador del sector eléctrico de la República del Ecuador ha expedido varias regulaciones relacionadas a las fuentes de generación renovable, por citar, mediante Regulación No. ARCONEL-004/15 estableció los criterios y requisitos técnicos relacionados con la conexión de los generadores renovables no convencionales (solar fotovoltaica y termoeléctrica, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas, geotérmica, biomasa, biogás y mareomotriz) a las redes de transmisión y distribución (ARCONEL, 2015, pp.1-18), por tanto, son de cumplimiento obligatorio de todas las personas naturales y jurídicas que estén interesadas en desarrollar proyectos de generación renovable no convencional con el fin de no afectar el suministro de energía eléctrica. Mediante Regulación No. ARCONEL-003/18 cuyo nombre es “Generación fotovoltaica para autoabastecimiento de consumidores finales de energía eléctrica” (ARCONEL, 2018, pp.1-41) determina los parámetros técnicos y comerciales relacionados a la instalación de sistemas fotovoltaicos, los requisitos y el procedimiento a seguir para la conexión del sistema de microgeneración fotovoltaica a las redes de la EED (Empresa Eléctrica de Distribución) y la operación en sincronismo, condiciones para la definición del medidor a instalarse y el método comercial a aplicarse por la energía producida, consumida y posibles excedentes de generación entregados a la EED.

Este proyecto propone realizar un algoritmo de gestión energética basado en un controlador de lógica difusa (FLC) para realizar el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas interconectadas entre ellas con el fin de garantizar el suministro de energía eléctrica a los consumidores minimizando las fluctuaciones y los picos de potencia en el perfil de potencia intercambiada.

Así mismo, se busca, propender el desarrollo de proyectos con generación renovable que contribuyan a la erradicación de la pobreza y disminuyan la contaminación ambiental lo cual está respaldado por la Constitución de la República y el Ministerio de Electricidad.

El algoritmo base de la estrategia de gestión que se utilizará fue facilitado y pertenece a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad Pública de Navarra y se encuentra descrito en Arcos et al. ( 2016: pp.1-14). Es preciso mencionar que los datos disponibles son registros anuales históricos de generación de energía y consumo de carga.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Es posible realizar el intercambio del excedente de potencia, entre dos microrredes residenciales vecinas, para cubrir los déficits de energía de cualquiera de ellas y minimizar los costos de operación de cada microrred relacionados con la inyección de potencia desde la red principal de distribución?

## **1.3. Preguntas directrices**

¿Qué elementos tienen estas microrredes con integración de energías renovables y Fuzzy Logic Control?

¿Cómo se analizará el estado de carga de los sistemas de almacenamiento?

¿Bajo qué condiciones se puede realizar el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas?

¿Qué tareas debe realizar el controlador con el objetivo de realizar el intercambio de potencia?

## **1.4. Justificación de la investigación**

Según el Objetivo 5 “Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria” del Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021- Toda una Vida (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017, p. 83) dos de las metas establecidas para el 2021 es: Incrementar de 68,8% al 90% la generación eléctrica a través de energías renovables e incrementar el ahorro de combustible por la optimización en generación eléctrica y eficiencia energética en el sector hidrocarburos de 9,09 a 26,6 millones de Barriles Equivalentes de Petróleo.

La industria en todo el mundo aborda numerosos desafíos, incluida la diversificación de la generación, activos costosos, la respuesta a la demanda, la conservación de energía y la reducción de la contaminación ambiental. Es evidente que tales cuestiones críticas no pueden abordarse dentro de la red eléctrica existente, ya que la misma es de naturaleza unidireccional, convierte solo un tercio de la energía del combustible en electricidad, sin recuperar el calor residual. (Farhangi, 2010, p.19).

Por tanto se espera que la red eléctrica de la próxima generación, conocida como “red inteligente” aborde las principales deficiencias de la red existente siendo los pilares claves las microrredes, como lo indica Farhangi (2010, p. 19) y Arcos et al. (2016: p.1) y que están basadas en fuentes de energía renovable, las cuales son de varios tipos, a saber: solar, eólica, hidráulica, biomasa, geotérmica y de los océanos; todas estas fuentes de energía tienen el denominador común que se encuentran en la naturaleza y de cantidad ilimitada; contienen gran cantidad de energía y pueden renovarse por medios naturales. Estas tecnologías se denominan colectivamente recursos energéticos distribuidos (Distributed Energy Resources - DER), que pueden reducir sustancialmente las emisiones de carbono y los gases de efecto invernadero (Greenhouse Gases - GHG) (Hatzigiorgiou et al., 2007: p.79).

Para este proyecto se tomará en consideración las microrredes cuya fuente sea la energía solar la cual es obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitido por el sol. El Sol produce el viento, la evaporación de las aguas superficiales, la formación de nubes, las lluvias, etc. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales, cuyos restos, con el paso de los siglos, originaron los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural (Schallenberg Rodríguez et al., 2008, p.14). El sol de forma directa o indirecta, es el origen de todas las energías renovables, exceptuando la energía maremotriz y la geotérmica.

Las microrredes constituyen una buena forma de producir y entregar energía en lugares específicos y el excedente de energía podría ser distribuido apropiadamente a través de una estrategia de gestión, con el consiguiente beneficio económico para el consumidor. (Fossati, 2011, p.16).

Por tanto, mediante este proyecto se pretende realizar una simulación del Diseño de un algoritmo de gestión de energía basado en lógica difusa para el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas residenciales de baja tensión y se comprobará el buen funcionamiento de la estrategia en función de los criterios de calidad que se presentan en Arcos

et al. (2016: p.4), Arcos et al. (2017: pp.72-73) y Pascual (2015, pp.27-30), lo cual será demostrado y quedará en evidencia mediante las simulaciones que se realice en MATLAB.

## **1.5. Objetivos de la investigación**

### *1.5.1. Objetivo General*

Diseñar un algoritmo de gestión de energía basado en lógica difusa que realice el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas interconectadas entre ellas para garantizar la provisión del suministro de energía eléctrica a los consumidores.

### *1.5.2. Objetivos Específicos*

- Realizar una investigación de las diferentes estrategias de gestión para la consecución del intercambio de potencia de dos microrredes, basadas en control Fuzzy.
- Investigar las características generales de las diferentes fuentes de energía renovables como sus particularidades.
- Implementar un algoritmo de gestión que garantice el intercambio confiable (minimizando las interrupciones) y seguro de potencia de dos microrredes con fuente de generación fotovoltaica con el fin de utilizar el exceso de energía proveniente de una microrred para solventar parte de la energía que necesita otra microrred.
- Simular en la plataforma MatLab el desempeño del algoritmo de gestión de energía propuesto.
- Evaluar el desempeño de las estrategias de gestión a fin de comprobar el funcionamiento del intercambio de potencia de dos microrredes.

## **1.6. Hipótesis**

¿Es posible realizar el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas residenciales vecinas, mediante un algoritmo de gestión de energía basado en un controlador de lógica difusa (FLC)?

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del problema

La energía eléctrica es un elemento necesario para el desarrollo y desenvolvimiento de las sociedades actuales, por lo que el ser humano ha explotado los recursos energéticos fósiles con las consiguientes contaminaciones del medio ambiente.

En la Figura 1-2 se muestra la evolución del consumo de energía primaria en el mundo desde 1850 hasta nuestros días y la proyección hasta el año 2050 (Pascual, 2015, p.2).

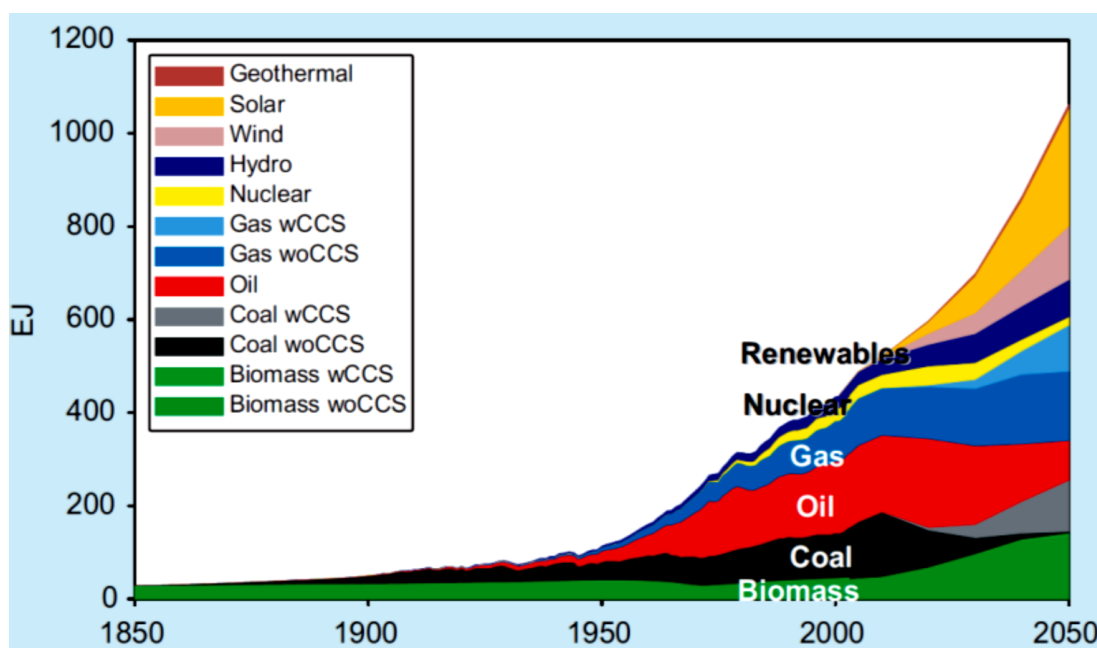


Figura 1-2. Fuentes de energía primaria utilizadas desde 1850 hasta el presente y proyección hasta 2050.

Fuente: (Pascual, 2015).

Para cubrir las necesidades humanas básicas las sociedades necesitan de servicios energéticos por lo que la demanda de la energía va en aumento lo que ha dado como resultado un incremento del consumo de combustibles fósiles (e.g., carbón, petróleo y gas), situación que ha dado lugar a un rápido aumento de los gases tóxicos y de efecto invernadero lo que causa el deterioro de la atmósfera y el calentamiento global. (Arcos et al., 2017: p.69).

La transición del sistema energético actual basado en combustibles fósiles a un nuevo sistema con implantación de energías renovables y sistemas eléctricos de transporte requiere el

desarrollo de nuevos algoritmos de control que permitan gestionar los aspectos relacionados tanto con la intermitencia y la distribución de la generación como con los nuevos perfiles de consumo (Bordons et al., 2015: p.117). Entre las diferentes arquitecturas de control implementadas para el control de potencia de microrredes se destacan las siguientes: i) Control Fuzzy, sistema experto en tiempo real, se basa en reglas heurísticas de forma que poseen un antecedente y un consecuente ( Arcos et al., 2017: pp.69-84; Arcos et al., 2017: pp.1-7; Arcos et al., 2016: pp.1-14), ii) Control de Caída, es que elimina la necesidad de comunicación y la acción de control se basa meramente en mediciones locales y características de caída en consecuencia (Olivares et al., 2014: 1905-1919) iii) Control Predictivo del Modelo, es una estrategia de control digital que predice la salida del sistema en un horizonte de tiempo basado en la suposición sobre las secuencias de salida futuras del controlador (Low y Cao, 2008: pp.2884-2893); iv) Sistemas Multi-Agente, permite crear un modelo del sistema, lo más detallado posible, cada agente utiliza la información exacta que necesita, deja los detalles técnicos para los agentes que están debajo de él en el organigrama; por lo tanto, es esencial tener una forma formal de describir la información y dar a cada agente la información que necesita (Dimeas y Hatzargyriou, 2005: pp.1447-1455); entre otros.

Por el conocimiento heurístico que se tiene del sistema, se seleccionó el uso del Control Fuzzy Logic (FLC) para el diseño del algoritmo de gestión, ya que este enfoque integra fácilmente la experiencia del usuario, se basa en el conocimiento que tiene el ser humano acerca de cómo funciona un proceso, por tanto, el FLC no requiere aproximar el modelo matemático del sistema, ni tampoco necesita linealizarlo, lo cual facilita el diseño del controlador. Las microrredes fotovoltaicas son sistemas no lineales porque existen muchas imprecisiones debido al cambio de radiación solar, por tanto se debe aplicar el FLC.

Estudios previos han demostrado que el FLC es ampliamente utilizado en el control de microrredes eléctricas por cuanto brinda varias ventajas tales como: intercambio de energía eléctrica, disminución de costos operativos de la MG, mejora del perfil de potencia de red, entre otros (Arcos et al., 2017: 69-84).

El algoritmo de gestión de energía para el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas residenciales que se prevé utilizar y modificar está basado en control de lógica difusa (FLC) descrito en Arcos et al. (2016: pp.1-14).



## 2.2. Bases Teóricas

### 2.2.1. Control Lógica Difusa.:

La lógica difusa o borrosa, fue concebida a mediados de los años sesentas por Lofti Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkeley (Morales, 2002, p.1). Esta es una herramienta que imita la forma en que los humanos manejan y procesan la información; es un método de gran simplicidad para procesar información, tomar decisiones y controlar procesos. Por ejemplo, en los conjuntos clásicos un cuarto se puede considerar solamente “oscuro” (0) o claro (1), en cambio en la lógica difusa se puede considerar otras condiciones “muy oscuro”, “ligeramente claro”, etc. (Alvarado et al., 2005: p.6).

A través de la lógica difusa se incorpora el razonamiento humano en el algoritmo de control y simplifica el diseño de controlador, se parte del hecho de que conceptos como bajo, alto, dulce, amargo, etc. son percibidos de manera diferente por cada observador. (Guzmán y Castaño, 2006: pp.87-107).

La lógica difusa ha dado origen a sistemas expertos de tipo difuso y a sistemas de control automático (Morales, 2002, p.2) y resulta muy útil cuando los datos y sus relaciones no pueden ser representados en términos matemáticos precisos. Los conjuntos borrosos contienen objetos que pertenecen de forma imprecisa o gradual al conjunto. El grado de pertenencia viene definido por una función de pertenencia, que generalmente toma valores entre 0 y 1 (da una gama de veracidad). (Santos, 2011, p.286).

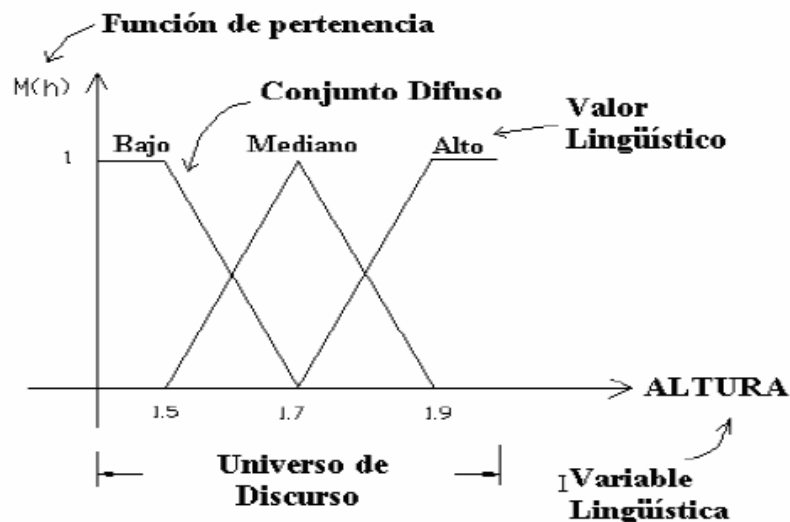


Figura 2-2. Algunos parámetros de importancia de la Lógica Difusa.

Fuente: (Parra et al., 2007)

### 2.2.1.1. Conceptos básicos

- *Conjuntos difusos:* Fueron formulados como una generalización de los conjuntos clásicos (en donde un elemento pertenece o no a un conjunto, es decir 0-exclusión o 1-inclusión) y la lógica difusa permite tomar valores de verdad multivaluados, es decir, cualquier valor dentro del intervalo unitario continuo (0,1) (Blancas y Noel, 2018: p.17); mientras más se acerque a 0 ó a 1 el valor de verdad de una proposición, ella se considerará más falsa o más verdadera, respectivamente.
- *Universo de discurso:* Son todos los posibles valores que puede tomar una variable (González, 2015, p.14).
- *Variable lingüística:* Es una descripción simbólica constante que procede del lenguaje natural para determinar un calificativo o una valoración a una cantidad variable en el tiempo dentro del intervalo definido por un universo de discurso. (Gómez et al., 2009: p.51)
- *Funciones de pertenencia:* Las funciones de pertenencia representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Existe una gran variedad de formas para las funciones de pertenencia, las cuales varían según el problema y el usuario, siendo la única condición que debe respetarse es que tome valores entre 0 y 1. Las más comunes son del tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, pi, S, entre otras. (Mondelo, 2015, p.61).

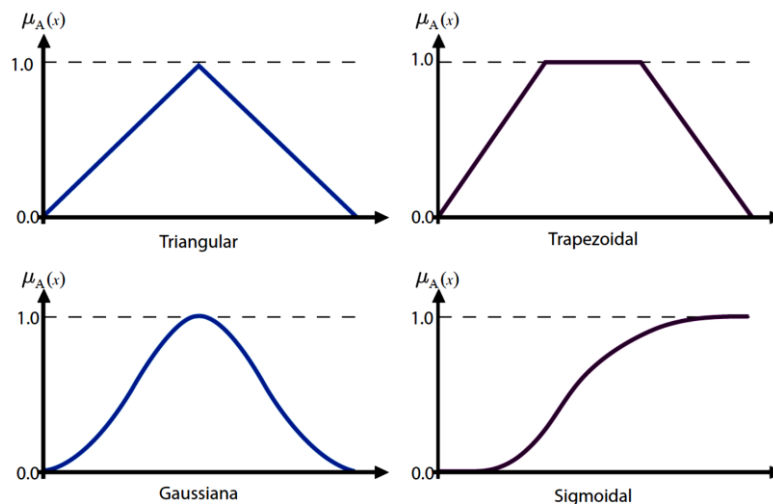


Figura 3-2. Funciones de pertenencia comúnmente utilizadas.

Fuente: (Chahuara, 2005)

- *Base de reglas:* Una vez definidas las variables difusas y sus respectivos valores lingüísticos, es posible expresar el modelo cualitativo del sistema difuso mediante el conjunto de reglas que las relacionan, pero al igual que la base de datos, no existen

métodos generales para obtener las reglas adecuadas. Quizá la forma más común para representar el conocimiento humano es formarlo en una expresión del lenguaje natural del tipo:

IF (SI) premisa (antecedente),

THEN (ENTONCES) conclusión (consecuente)

Éstas reglas expresa una inferencia tal que si conocemos un hecho (premisa, hipótesis, antecedente), entonces podemos inferir (derivar), otro hecho llamado conclusión (consecuente). Las relaciones difusas determinan el grado de presencia o ausencia de asociación o interacción entre dos o más conjuntos (Medina, 2006, p.204).

### 2.2.1.2. Operaciones en conjuntos difusos.

Las tres operaciones básicas que se definen para los conjuntos convencionales se puede generalizar para los conjuntos difusos (Mondelo, 2015, pp.62-63):

- *Unión*.- La unión de dos conjuntos difusos  $A \cup B$  tiene la siguiente función característica:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{máx}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.1)$$

- *Intersección*: La intersección de dos conjuntos difusos  $A \cap B$  tiene la siguiente función característica:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{mín}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.2)$$

- *Complemento*: El conjunto complementario  $\bar{A}$  tiene la siguiente función característica:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.3)$$

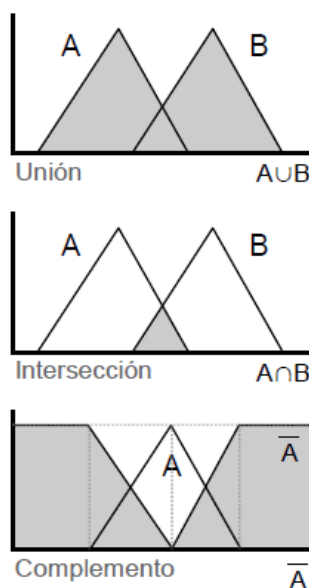


Figura 4-2. Operaciones estándar en conjuntos difusos.

Fuente: (González, 2015)

Las tres operaciones expuestas cumplen las propiedades: asociativa, conmutativa, distributiva y Leyes de Morgan.

### 2.2.1.3. Propiedades de los conjuntos difusos.

Los conjuntos difusos al igual que los conjuntos clásicos tienen las siguientes propiedades (González, 2015, p.17):

- *Conmutativa:*  $A \cap B = B \cap A$
- *Asociativa:*  $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$
- *Distributiva:*  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
- *Idempotencia:*  $A \cup A = A$  y  $A \cap A = A$
- *Involución:*  $\neg(\neg A) = A$
- *Transitiva:* *If*  $(A \subset B) \cap (B \subset C)$  *then*  $A \subset C^1$
- *Leyes de Morgan:*  $\neg(A \cap B) = \neg A \cup \neg B$  y  $\neg(A \cup B) = \neg A \cap \neg B$

Existen dos leyes que no se cumplen en los conjuntos difusos:

- *Contradicción:*  $A \cup \bar{A} = U$
- *Exclusión:*  $A \cap \bar{A} = 0$

### 2.2.2. Control Fuzzy.

En 1974 Ebrahim Mandani aplica los conceptos de lógica difusa en el control de procesos y desarrolla el primer control difuso para la regulación de un motor de vapor (Guzmán y Castaño, 2006: p.87).

La lógica difusa ha ganado un gran campo de acción en procesos complejos de modelar matemáticamente (Morales, 2002, p.1), ya que el diseño y sintonización del controlador difuso se basa únicamente en la experiencia del experto en el proceso (Guzmán y Castaño, 2006: p.95). Puede ser considerado como una aproximación entre las matemáticas convencionales precisas y las tomas de decisiones de los humanos (Chahuara, 2005, p.31). Hoy en día se encuentra numerosa aplicaciones en la industria, medicina, control automático, aeronáutica, electrónica, visión artificial, juegos complejos (ajedrez, azar), inteligencia artificial, etc. (Guzmán y Castaño, 2006: p.87; Morales, 2002, p.2; D'Negri y De Vito, 2006: p.126). El control Fuzzy permite diseñar soluciones de excelente calidad evitando las patentes existentes en otros controladores (González, 2015, p.11).

#### 2.2.2.1. Inferencia Difusa.

El corazón de cualquier sistema basado en lógica difusa es el mecanismo de inferencia, por cuanto procesa información de variables de entrada para dar valores de salida en base a los planteamientos lógicos que usan el razonamiento aproximado (González y Ballarín, 2008: p.224). Las

reglas difusas son el conjunto de proposiciones If-Then que establecen el problema a resolver (Mondelo, 2015, p.64).

Las reglas difusas tienen la siguiente estructura: “Si  $u$  es  $A$  entonces  $v$  es  $B$ ”, siendo  $A$  y  $B$  conjuntos difusos definidos en los rangos  $u$  y  $v$  respectivamente.

Existe una gran variedad de métodos de inferencia difusa, siendo los más utilizados los dos siguientes (Guzmán y Castaño, 2006: pp.87-107; Arango-Serna et al., 2012: pp.47-53; González, 2015, pp.1-29):

- *Inferencia de Mandani*: Propuesto por Ebrahim Mandani en 1975, es el método más utilizado y consta de cuatro pasos.
  - a. *Fuzzyficación* de las variables de entrada: transforma los datos concretos (valores del mundo real) de la medición en valores lingüísticos apropiados a través de las funciones de membresía,
  - b. *Evaluación de las reglas*: se toman las entradas anteriores y se aplican a los anteriores de las reglas difusas utilizando el operador AND u OR cuyo valor de verdad se aplica al consecuente,
  - c. *Agregación de las salidas de las reglas*: es el proceso de unificación de las salidas de todas las reglas y
  - d. *Defuzzyficación*: se usa para producir una decisión no difusa o acción de control de una acción de control difusa inferida por la máquina de inferencia (se traslada al mundo real los datos). De los diferentes métodos de defusificación existentes el más común y ampliamente utilizado es el método del centroide o centro de gravedad. Con este método se calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas con igual masa.
- *Inferencia TSK (Takagi, Sugeno y Kang)*:  
Consta de una serie de reglas If-Then (Si-Entonces) de la forma siguiente:

$$\text{Si } X(t) \text{ es } A \text{ entonces } Z \text{ es } Y = k_{i0} + k_{i1}X(t) \quad (2.4)$$

Dónde:

$A$ : Conjunto difuso,

$X$ : Atributos medibles del sistema,

$Y$ : Ecuación de salida lineal.

### *2.2.3. Fuentes de energía renovables.*

Las fuentes de energía renovable son aquellas que se encuentran en la naturaleza en cantidades inagotables y provienen de forma directa o indirecta del sol o no solares. La integración de las fuentes de energías renovables al sistema eléctrico obedece a razones de diversificación, seguridad energética, combate a la contaminación ambiental, generación de empleo entre otras. Las principales fuentes de energía renovable son: la eólica, fotovoltaica, biomasa, hidráulica, geotérmica, etc.

En la medida que se refuerza la utilización de energías renovables y se optimiza la utilización del resto de energía no renovable, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Las fuentes de energía renovables se caracterizan por ser escalables permiten instalaciones modulares, flexibles, y con tiempos reducidos de instalación, además se pueden construir, de manera distribuida por todo el territorio y por la cercanía de la ubicación de las fuentes de generación y el aprovechamiento en red de los diversos sistemas de energía y calor aumentan considerablemente la eficiencia energética del conjunto. (Fossati, 2011, p.17).

#### *2.2.3.1. Energía Eólica.*

La energía eólica se obtiene de la fuerza del viento, se aprovecha mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de los aerogeneradores.

Un grupo de aerogeneradores (parque eólico) pueden producir energía eléctrica capaz de verter a la red de distribución.

Para producir energía eólica el viento debe cumplir ciertas características relativas a velocidad, continuidad, estabilidad, etc, siendo un dato de gran importancia la relacionada a la “densidad de potencia” del viento, lo cual representa la máxima potencia que se podría conseguir por cada unidad de área barrida por el viento, tal es el caso que por debajo de los 50 vatios/m<sup>2</sup> no se justificaría las instalaciones eólicas y solo si supera los 200 vatios/m<sup>2</sup> resultaría provechoso, pese a esto, se necesita densidades superiores a 1000 vatios/m<sup>2</sup> para que los aerogeneradores tengan rendimientos aceptables. (Espejo, 2004, pp.45-66).

#### *2.2.3.2. Energía Solar Fotovoltaica.*

La energía solar fotovoltaica es la transformación directa de las radiaciones solares en energía eléctrica, cuya transformación se produce en unos dispositivos llamados paneles fotovoltaicos, en los cuales la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando

un flujo de electrones en el interior del material lo cual se denomina como efecto fotoeléctrico obteniendo energía eléctrica. (Pérez, 2017, p.17).

Un sistema fotovoltaico está formado por (Alonso, 2011, p.3):

- Un generador fotovoltaico,
- Una batería de almacenamiento,
- Un regulador de carga,
- Un inversor y
- Consumo.

#### *2.2.3.3. Energía Hidráulica.*

La energía hidráulica es en cierta forma una forma de energía solar, ya que el sol evapora el agua de océanos, ríos, etc, formando nubes. Consiguientemente el agua caerá en forma de precipitación (lluvia y nieve) sobre la tierra y la energía que poseen las mismas se disipa al regresar a los lagos, ríos, etc.

Las centrales hidráulicas generan la electricidad mediante la energía potencial del agua ubicada en el cauce de un río para convertirla en primera instancia en energía mecánica (movimiento del eje de una turbina al caer el agua, cuyo giro pone en movimiento el generador) y consiguientemente convertirla en energía eléctrica.(Soria, 2009, pp.1-20).

#### *2.2.3.4. Biomasa.*

La biomasa es materia orgánica y para convertirla en energía (lo cual depende de la biomasa que se lo esté tratando) se lo realiza mediante un proceso de combustión.

Existen dos fuentes de biomasa que se utilizan con fines energéticos: biomasa natural (por ejemplo leña) y biomasa residual (por ejemplo se produce en explotaciones ganaderas).

Para la obtención de energía eléctrica se lo realiza mediante una Central de Biomasa mediante diferentes procesos de transformación (EPEC, 2018, pp.1-8):

- La biomasa se quema en calderas,
- El calor producido por la combustión se utiliza para hervir agua y obtener vapor,
- El vapor producido se encarga de mover una turbina la cual se encuentra conectada a un generador,
- Este generador se encarga de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y

- La tensión de electricidad generada se eleva para la distribución.

#### 2.2.3.5. Energía Geotérmica.

Se define como “fuente energética renovable que ocupa el calor contenido en el interior de la tierra”, siendo la fuente que se encuentra presente en todo el mundo, otras ventajas es que no necesita importación, tiene una vida útil larga, menor costo, la energía no es intermitente como ocurre con el resto de fuentes de energía renovables más bien la producción es constante y previsible, entre otras ventajas (Valenzuela, 2011, p.2; Schallenberg Rodríguez et al., 2008: p.111).

Para la producción de electricidad se aprovecha la salida del vapor de las fuentes geotérmicas que ponen en marcha turbinas las cuales accionan generadores eléctricos. Para dicha acción es necesario que la temperatura del agua subterránea supere los 150°C.

#### 2.2.4.Red inteligente.

Las redes eléctricas o conocidas también como Smart Grids es la visión del futuro sistema de suministro de energía eléctrica y son sus elementos centrales el uso de: 1) tecnología de la información; 2) comunicación; y 3) dispositivos electrónicos de potencia. Opera bajo una filosofía actualizada con un aumento significativo en el nivel de monitoreo, comunicación, control y coordinación (Yazdanian y Mehrizi-Sani, 2014: p.2901) que se traduce en una gestión eficiente de la electricidad por cuanto el flujo de información y de electricidad es bidireccional entre la Empresa Eléctrica Distribuidora y el consumidor final.

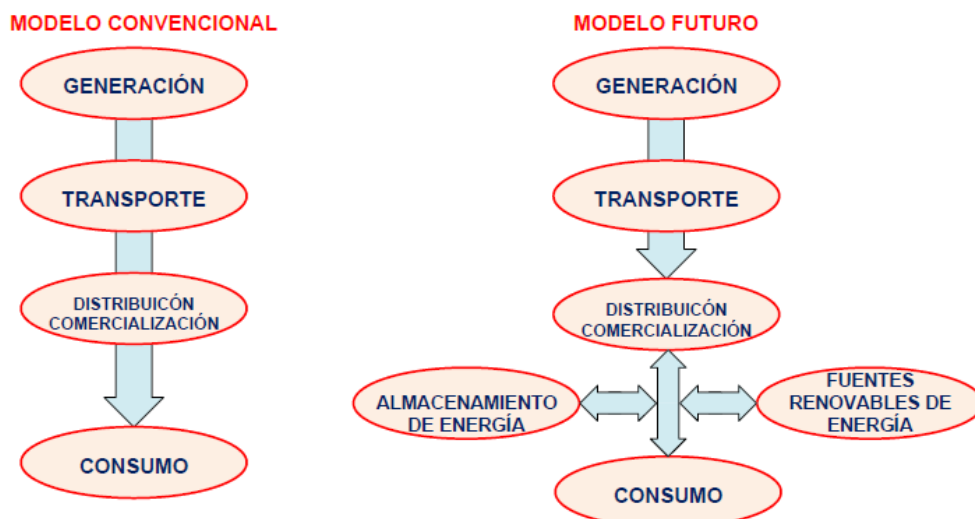


Figura 5-2. Modelo de la red eléctrica convencional y modelo futuro.

Fuente: (Sanango, 2015)



En esencia, la red inteligente es una malla de microrredes interconectadas y que necesita proporcionar a las empresas de servicios públicos una visibilidad completa y un control generalizado sobre sus activos y servicios. La red inteligente debe ser auto curable y resistente a las anomalías del sistema. Por último, la red inteligente necesita empoderar a sus partes interesadas para que definan y descubran nuevas formas de relacionarse entre sí y realizar transacciones de energía en todo el sistema (Farhangi, 2010, p.19).

#### 2.2.4.1. Objetivos de las redes inteligentes:

Las redes inteligentes tienen como objetivos los siguientes (Sanango, 2015, p.13):

- Minimizar las pérdidas de energía,
- Mejorar los niveles de voltaje, sobretodo de los consumidores lejanos,
- Aumentar los índices de calidad (fluctuaciones de voltaje, armónicos, etc),
- Aumentar los índices de confiabilidad (minimizando las interrupciones),
- Planificar la expansión o repotenciación de los sistemas de distribución.

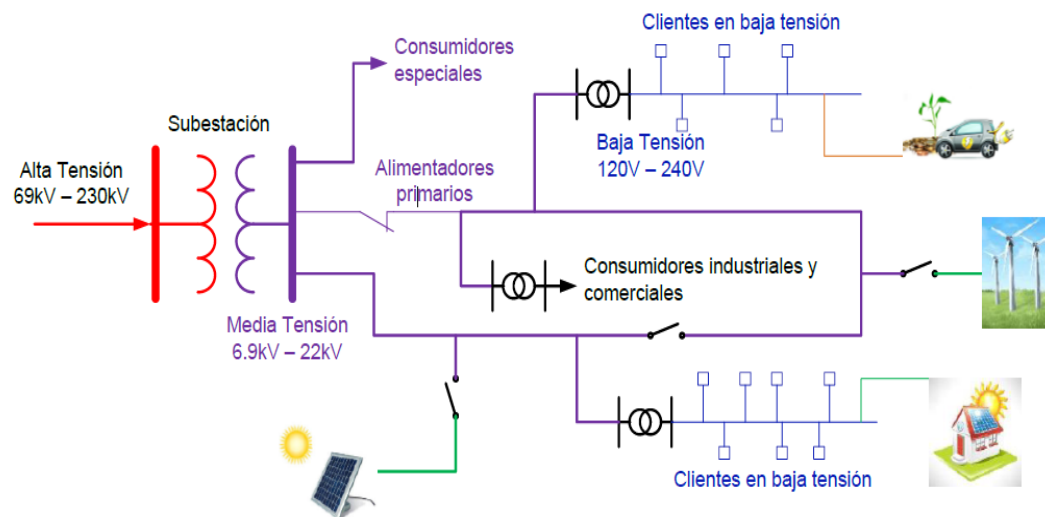


Figura 6-2. Esquema de una Red de Distribución Eléctrica con la incorporación de energías no convencionales.

Fuente:(Sanango, 2015).

Es importante destacar que el desarrollo de las telecomunicaciones en las últimas décadas ha permitido el desarrollo de las redes inteligentes de tal forma que se ha logrado reducir las fallas de los equipos y humanas, (Sanango Fernández, 2015, pp.21-22), siendo fundamental que la información fluya a través de la red de tal forma que la red y los consumidores conozcan la

potencia que requieren, los precios que generan, cortes y reconexiones, etc., dando lugar a que la propia red pueda solucionar por si sola los problemas que se puedan presentar.

#### 2.2.4.2. Comparación entre las redes convencionales y las redes inteligentes.

En la siguiente tabla se hace una comparación entre las redes convencionales y las redes inteligentes (OLADE, 2012, p.3):

Tabla 1-2. Comparación entre las redes convencionales y las redes inteligentes.

<b>Característica</b>	<b>Red Convencional</b>	<b>Red inteligente</b>
Automatización	Muy limitada	Integración masiva de sensores, medidores inteligentes (AMI) y esquemas de automatización en todos los niveles de la red.
Inteligencia y Control	Carece de inteligencia y el control es manual	Se enfoca en la creación de un sistema de información e inteligencia distribuido en la red.
Autoajuste	Se basa en la protección ante fallos del sistema	Detecta y automáticamente supera los problemas de transmisión y distribución en tiempo real minimizando el impacto en el usuario.
Participación del consumidor y generación distribuida	Desconocimiento por parte del consumidor y el flujo de energía es unidireccional ya que no genera energía localmente.	Incorporación masiva de generación distribuida y participación del consumidor quien entrega parte del exceso de energía generada

		localmente.
Gestión de la demanda	No cuenta con ningún tipo de gestión.	Incorporación por parte de los consumidores de equipos inteligentes que permiten ajustarse a la gestión establecida (por ejemplo: seguimiento de cronogramas de operación)
Calidad eléctrica	Se superan los cortes de energía más no se toma en cuenta el resto de indicadores de calidad.	El suministro de energía eléctrica satisface los requerimientos de los consumidores conservando índices de calidad aceptables, ya que los problemas son detectados y resueltos en corto tiempo, existiendo así mismo varios tipos de tarifas.
Optimización del transporte eléctrico	Debido a la eficiencia no óptima del transporte eléctrico se traduce en pérdidas de energía en gran cantidad.	Sistemas de control inteligente que permiten aprovechar eficientemente la capacidad de transmisión de las redes.
Mercado eléctrico	Al existir problemas en la transmisión separa compradores de vendedores, por tanto no existiendo una buena integración entre ellos.	Buena integración de los mercados al por mayor y menor.

Fuente: (OLADE, 2012)

### 2.2.4.3. Tecnologías inmersas en las Redes Inteligentes.

Los principales campos de investigación de la rama están relacionados con las TICs, la electrónica de potencia, tecnologías de control y automatización, lo cual se detalla a continuación, (López, 2016, pp.38-45; CITCEA, 2013, pp. 4-28):

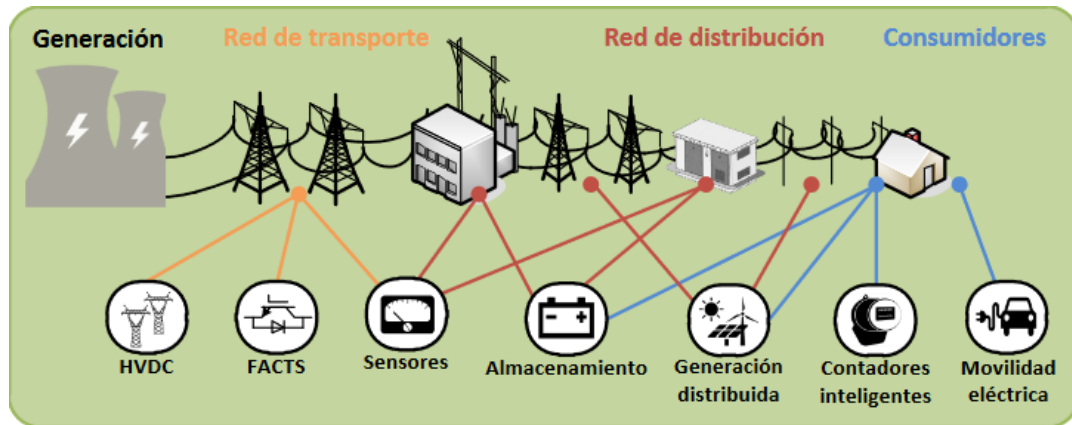


Figura 7-2. Localización de las tecnologías relacionadas a las Redes Inteligentes.

Fuente: (CITCEA, 2013)

- *Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs).*

Es la parte medular del sistema eléctrico ya que integra y comunica todos los elementos que forman parte de las redes inteligentes, aportando mayor inteligencia.

Las TICs deben respetar los estándares de comunicación que posibiliten el intercambio de datos los cuales deben ser tratados para convertirlos en información.

- *Sistemas de Almacenamiento.*

La generación y la demanda en el sistema eléctrico deben mantener equilibrio, lo cual muchas veces se complica debido a varios factores, siendo uno de ellos, por ejemplo, el comportamiento de los consumidores.

Por lo que, a más de los TICs, de la electrónica de potencia se considera los sistemas de almacenamiento (ESS).

Los beneficios de los sistemas de almacenamiento comprenden un incremento de la capacidad efectiva de la red de transporte y distribución, la mejora de la fiabilidad del sistema y reducción

de los picos de generación. Ejemplos de tecnologías de almacenamiento: bombeo hidráulico, almacenamiento de aire comprimido, volantes de inercia, supercondensadores, baterías electroquímicas, etc.

- *Equipos de medición inteligentes.*

Contador que a más de registrar el consumo de un usuario (residencial, comercial, etc) aporta con otras funcionalidades que los medidores convencionales, por ejemplo: detecta fallas, se puede realizar el corte y la reconexión, etc. Se divide en dos grupos AMR y AMI.

- a. AMR (Automatic Meter Reading): Contador habilitado para la telemedida, es un elemento pasivo con comunicación unidireccional.
  - b. AMI (Advanced Metering Infrastructure): Contador habilitado para telegestión, puede ser leído y gestionado de manera remota mediante comunicación bidireccional.
- *Sensores.*

Son dispositivos cruciales de la estructura de las redes inteligentes por cuanto son los encargados de detectar magnitudes físicas, convertirlas en señales eléctricas para tratarlos y suministrar la información sobre el estado de la red eléctrica a las aplicaciones que han de dotar de inteligencia a las redes eléctricas.

#### *2.2.5.Microrredes.*

Las microrredes eléctricas se presentan como un bloque de construcción de la red inteligente (Yazdanian y Mehrizi-Sani, 2014: p.2902), son conjuntos que están formadas por la integración de variedad de cargas de clientes, generadores distribuidos y dispositivos de almacenamiento de energía (Lidula y Rajapakse, 2011: p.187; Olivares et al., 2014: p.1906) que funcionan como un único sistema controlable que proporciona tanto energía como calor a su área local (Lasseter y Fellow, 2002: p.305). Las microrredes pueden operar en paralelo con la red, como una isla de potencia autónoma o en transición entre el modo conectado a la red y el modo de operación aislada. (Yazdanian y Mehrizi-Sani, 2014: p. 2902; Lidula y Rajapakse, 2011: p.187). En general, según Lasseter y Fellow (2002: p.305) y Arcos et al. (2017: p.70) las MG se definen como una red de distribución de bajo voltaje que comprende cargas, unidades DG y Sistema de almacenamiento de energía (ESS). La conexión eléctrica de estos elementos constituye la arquitectura de potencia MG que, a su vez, se puede conectar a la red en un único punto de acoplamiento común (PCC).

A más de contar con un sistema de gestión de energía en el lado de la oferta, en la demanda se deben desarrollar tecnologías, software, metodologías y normas para contar con modelos de

administración y control que permita al propio usuario integrarse al mercado eléctrico local o nacional. (INEEL - Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, 2018, p.3).

Las microrredes ofrecen varias ventajas, entre ellas: mejorar la confiabilidad local, reducir pérdidas de alimentadores, soportar tensiones locales, proporcionar una mayor eficiencia mediante el uso de calor y energía combinados (CHP) de calor residual, corrección de caída de voltaje o funciones de suministro de energía ininterrumpida (Jiayi et al., 2008: p.2473) generación distribuida, beneficios ambientales sustanciales mediante la utilización de recursos de energía renovable con la reducción de gases tóxicos y de efecto invernadero, etc. (Lidula y Rajapakse, 2011: p.187).

Las microrredes aprovechan recursos energéticos renovables tales como eólica, fotovoltaica, et. y al ser descentralizadas, por tanto al estar las fuentes cerca a las cargas hace que se tengan excelentes niveles de voltajes, aumenten los índices de calidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica (Sanango, 2015, p.11).

Por el uso (INEEL - Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, 2018, p.1), del suministro de energía eléctrica se pueden considerar los siguientes tipos de microrredes: residenciales/comerciales/industriales, comunidades/empresas de servicio, edificaciones/campus/institucionales, militares, remotas (Zonas no interconectadas).

#### *2.2.5.1. Características:*

Las microrredes brindan las siguientes características al sistema eléctrico (Peralta y Amaya, 2013: p.51):

- *Escalabilidad:* Flexibilidad para reconfigurar y redireccionar los flujos de potencia.
- *Confiabilidad:* Disponibilidad de los recursos relacionados con la gestión, monitoreo, operación y control del sistema.
- *Seguridad energética:* Disponibilidad de fuentes de energía renovable que se integrará al sistema convencional eléctrico y almacenamiento de energía que se utilizará cuando se requiera.
- *Sustentabilidad:* Uso y distribución adecuado y eficiente de la energía eléctrica.
- *Competitividad:* Consumo eficiente con la posibilidad de que la energía excedente se pueda vender a otros países.

#### *2.2.5.2. Elementos básicos de las microrredes.*

Los elementos básicos de las microrredes son (IEE, 2010, pp.104-105; López, 2016, p.37):

- *Inversores*: Convierten la corriente directa (CD) en corriente alterna (CA).
- *Contadores inteligentes*: Son los medidores AMI los cuales cuentan con varias funcionalidades y brindan varios beneficios: ahorro económico y energético, privacidad, pronta detección de daños, etc.
- *Dispositivo de seccionamiento*: Provee alta velocidad de separación entre la microrred y la red principal.
- *Recursos Distribuidos*: Son las fuentes de energía (renovables: solar eólica, etc) que pueden funcionar de forma autónoma.
- *Control y manejo de la microrred*: Esta sección es el responsable de mantener el voltaje y la frecuencia dentro de límites permisibles, así como también la operatividad y el despacho dentro de la microrred.
- *Protección*: Elemento que debe coordinar con los esquemas de la red principal y brindar protección a los distintos elementos de la microrred cuando opera de forma aislada.

#### 2.2.5.3. Formas de operación de las Microrredes en relación a la Red Principal.

Existen dos formas de operación (Arcos et al., 2017: p.70):

- *Microrred aislada*: La microrred está separada de la red de distribución, por tanto, la estrategia de gestión de energía (Energy Management Strategy - EMS) debe mantener una fuente de alimentación confiable para el consumidor, limitando la salida de potencia cuando sea necesario y en ocasiones utilizando técnicas para evitar el agotamiento de la batería.
- *Microrred conectado a la red*: La microrred debe ser capaz de inyectar o exportar energía hacia o desde la red de distribución para controlar los flujos de potencia.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se describe el desarrollo de la investigación para diseñar el algoritmo de gestión basado en lógica difusa (FLC) que permite realizar el intercambio de potencia entre microrredes eléctricas, el cual, como ya se ha mencionado, se basa en el algoritmo que está descrito en Arcos et al. (2016: pp.1-14), el cual utiliza datos históricos de generación y consumo de carga, adquiridos desde julio del año 2013 a julio 2014 con un tiempo de muestreo de 15 minutos, por tanto, la implementación se realiza mediante programación lineal (línea de código) en la herramienta Matlab, mismo que se encarga de direccionar o gestionar las diferentes potencias que generan los diferentes elementos que están dentro de una microrred.

Este tipo de programación no requiere la utilización de un modelo Simulink, ya que no utiliza los modelos matemáticos de los diferentes componentes del sistema. Este trabajo asume que el Generador fotovoltaico está trabajando siempre en su punto de máxima potencia (MPPT) y no es controlable, así como tampoco es controlable la carga. El elemento controlable es el inversor inteligente que se encarga de controlar la inyección de potencia a la batería o a la red eléctrica. En este sentido, el control de la potencia intercambiada con la red se lo realiza a través de un control de la potencia inyectada o absorbida por la batería.

En la Figura 1-3 se muestra la topología de una microrred residencial de bajo voltaje conectado a la red convencional con un sistema de almacenamiento de energía, generador fotovoltaico y carga residencial.

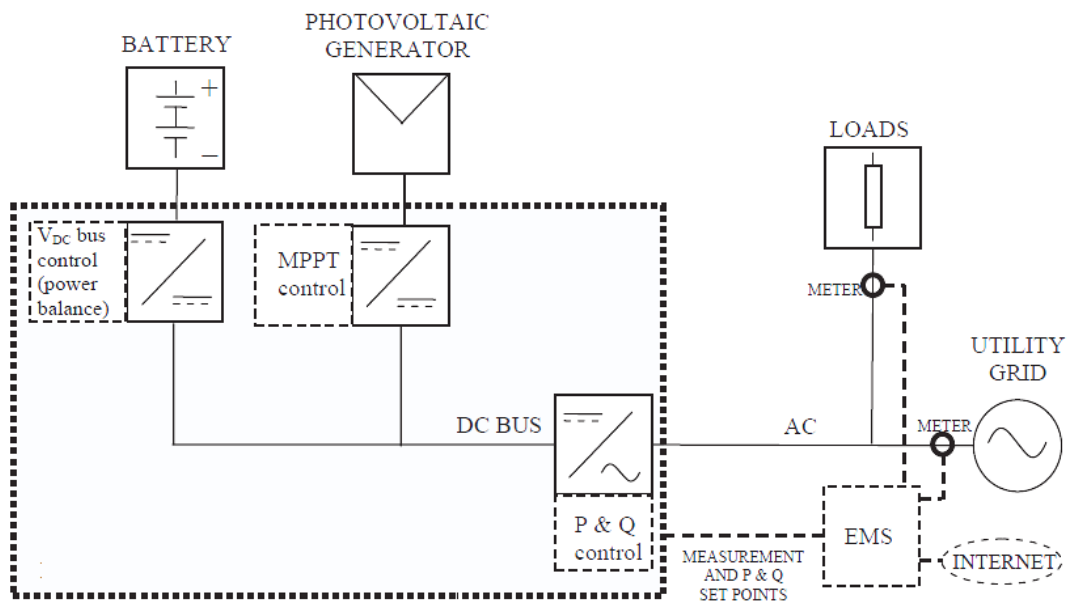


Figura 1-3. Topología de microrred residencial.

Fuente: (Arcos et al., 2017)



Se analizarán tres escenarios posibles de intercambio de potencia analizando los perfiles de potencia de red:

- Intercambio entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2,
- Intercambio entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1,
- Intercambio entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2 y de la Microrred 2 hacia la Microrred 1.

Es sumamente importante mencionar el siguiente principio en relación a los perfiles de potencia de red que regirá todo éste trabajo investigativo y que es el siguiente: “si el perfil de potencia de red es negativo significa que existe excedente de potencia generada o no existe demasiado consumo, en contraparte, si el perfil de potencia de red es positivo implica que existe déficit de potencia generada o existe demasiado consumo”.

Por cada uno de los escenarios expuestos se desarrollará lo siguiente:

- Descripción de las microrredes,
- Índices de calidad,
- Diagrama de bloques, y
- Diseño de la estrategia de gestión de energía basado en FLC

Los “Resultados y Discusión” se presentarán en el cuarto capítulo.

### **3.1. Intercambio entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2.**

Para este primer caso en análisis la Microrred 1 (MG1) aporta potencia a la Microrred 2 (MG2), de tal forma que el FLC determinará la cantidad de potencia que se restará de la MG1 y que será sumada a la MG2, lo que se traduce en que se merma el perfil de potencia de red negativo de la MG1 así como también el perfil de potencia de red positivo de la MG2.

#### *3.1.1. Descripción de las microrredes.*

##### *3.1.1.1. Microrred 1*

El estudio desarrollado en este proyecto contempla la Microrred 1 la cual está basada y descrita en Arcos et al. (2016: pp.1-14) y Arcos et al. (2017: pp.69-84): una fuente de energía renovable que comprende un generador fotovoltaico cuya potencia máxima es de 6.13kW (Gráfico 1-3), la carga doméstica con una potencia nominal de 5.77kW (Gráfico 2-3) y una ESS formada por un banco de baterías de plomo-ácido con una capacidad nominal de 72 kWh.

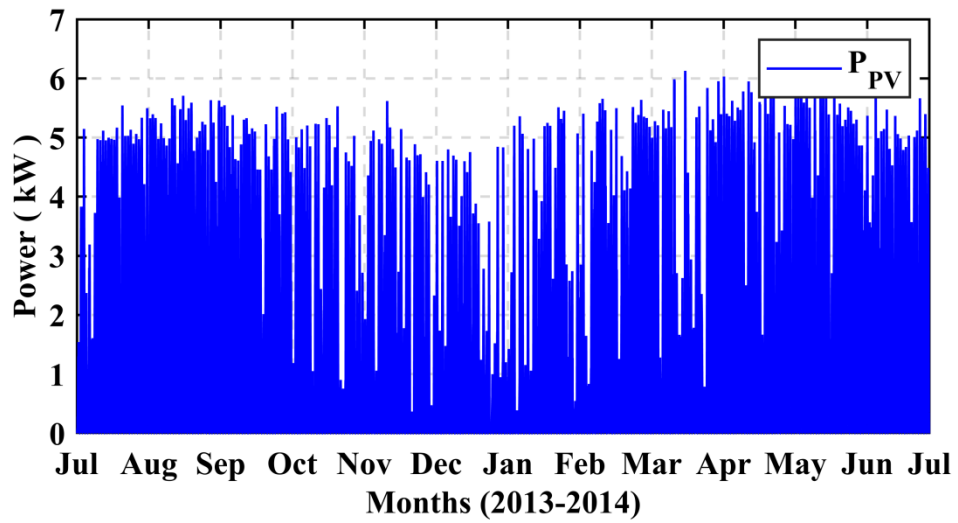


Gráfico 1-3. Potencia fotovoltaica máxima de la Microrred 1.

Fuente: Basado en (Arcos et al., 2017; Arcos et al., 2016)

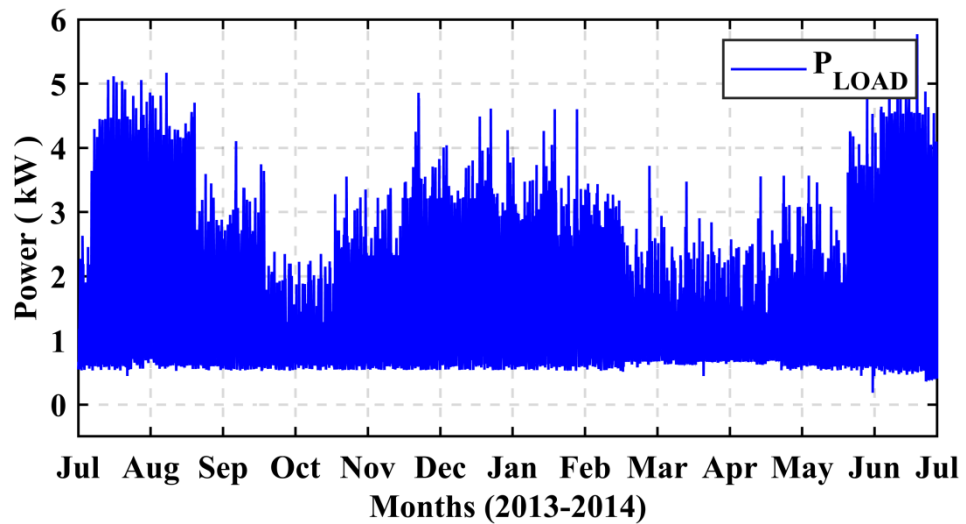


Gráfico 2-3. Potencia máxima de la carga de la Microrred 1.

Fuente: Basado en (Arcos et al., 2017; Arcos et al., 2016)

El SOC de la batería de la Microrred 1 oscila al 75% de su capacidad de almacenamiento lo cual se muestra en el Gráfico 3-3, tomando en cuenta que el SOC debe estar por sobre el 50% y en el Gráfico 4-3 se evidencia el perfil de potencia intercambiada con la red.

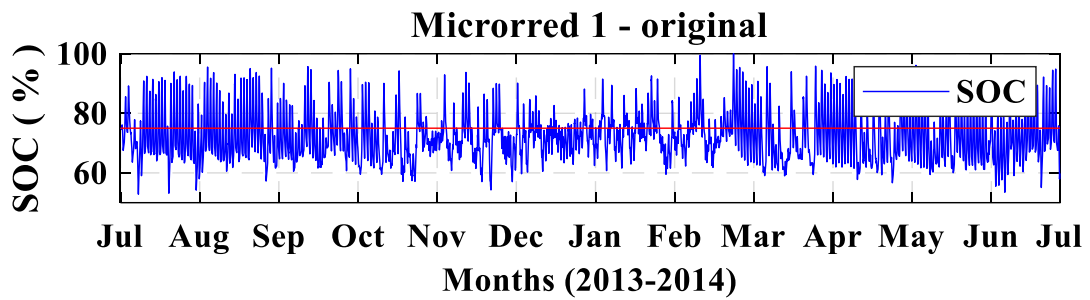


Gráfico 3-3. SOC de la batería MG1.

Fuente: Basado en (Arcos et al., 2017; Arcos et al., 2016)

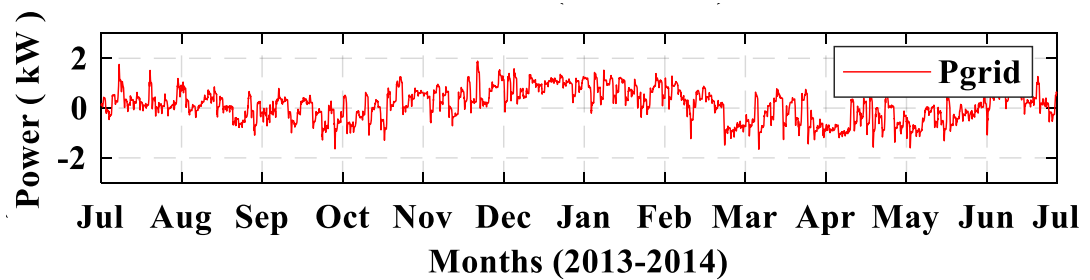


Gráfico 4-3. Perfil de potencia intercambiada con la red.

Fuente: Basado en (Arcos et al., 2017; Arcos et al., 2016)

### 3.1.1.2. Microrred 2

El diseño de la Microrred 2 toma como referencia la Microrred 1 con el fin de simular el intercambio de potencia, obteniendo los siguientes parámetros: potencia fotovoltaica con un pico máximo de 6.68kW (Gráfico 5-3) y una carga de uso residencial con una potencia máxima de 2.20kW (Gráfico 6-3).

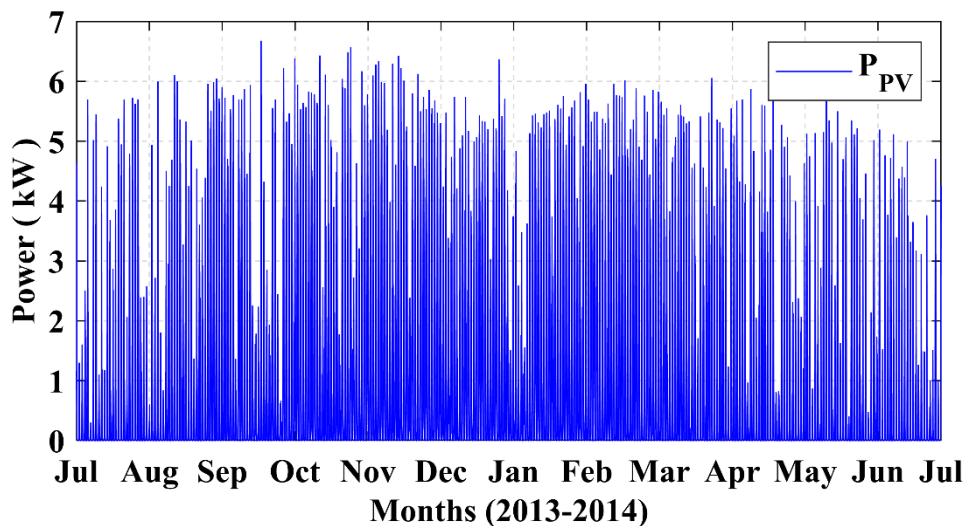


Gráfico 5-3. Potencia fotovoltaica máxima de la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

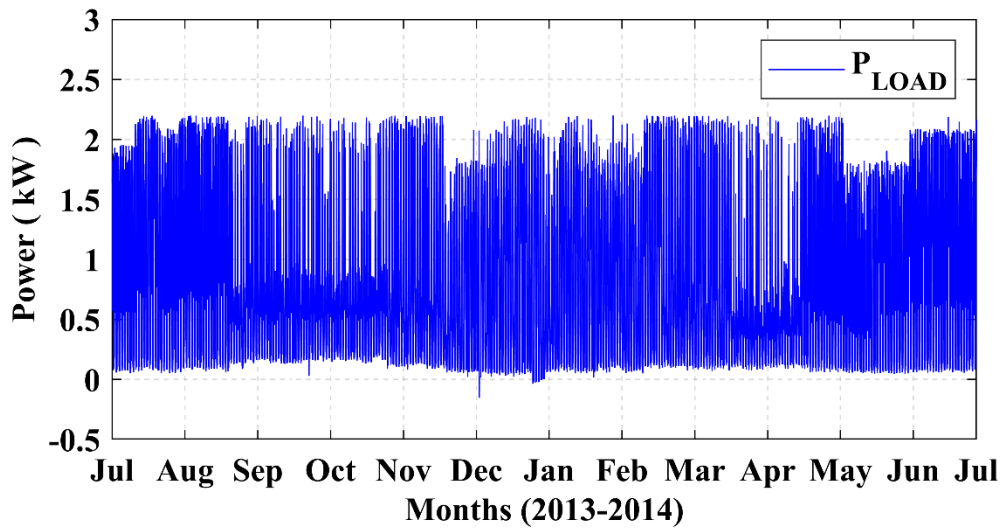


Gráfico 6-3. Potencia máxima de la carga de la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

El SOC de la batería de la Microrred 2 oscila alrededor del 75% de su capacidad de almacenamiento lo cual se muestra en el Gráfico 7-3 y en el Gráfico 8-3 se evidencia el perfil de potencia intercambiada con la red.

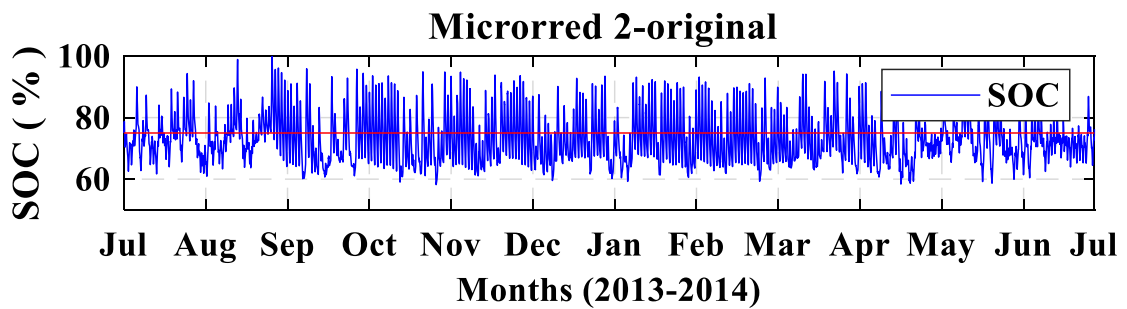


Gráfico 7-3. SOC de la batería MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

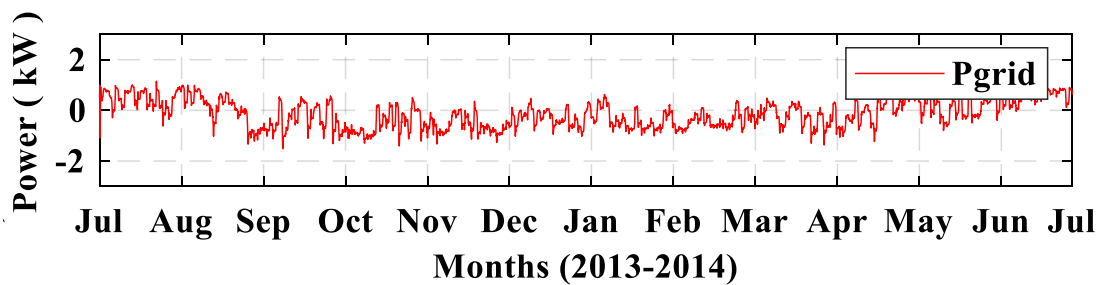


Gráfico 8-3. Perfil de potencia intercambiada con la red.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

### 3.1.2. Criterios de Calidad.

Los criterios de calidad permiten demostrar que la estrategia de gestión de energía ha cumplido los objetivos planteados (reducción de las fluctuaciones y picos de potencia), estos mientras más bajos sean traduce una mejorada estrategia de gestión. Arcos et al. (2016: p.4), Arcos et al. (2017: pp.72-73) y Pascual (2015, pp:27-30) describen los siguientes criterios de calidad que se deben tomar en consideración al momento de desarrollar una estrategia de gestión de energía:

- **Pico de potencia de red positivo ( $P_{G,MAX}$ ) [kW]:** Potencia máxima entregada por la red durante un año.

$$P_{G,MAX} = \max(P_{GRID}) \quad (1.3)$$

- **Pico de potencia de red negativo ( $P_{G,MIN}$ ) [kW]:** Potencia máxima alimentada a la red durante un año.

$$P_{G,MIN} = \min(P_{GRID}) \quad (2.3)$$

- **Derivada de Potencia Máxima (MPD) [W/h]:** Representa la tasa de variación máxima del perfil de potencia de la red en un año (es decir, la pendiente de dos muestras consecutivas, con un período de muestreo de 15 min, es decir  $T_s = 900s$ ).

$$MPD = \max(|\dot{P}_{GRID}|) \quad (3.3)$$

$$\dot{P}_{GRID}(n) = [P_{GRID}(n) - P_{GRID}(n-1)]/T_s \quad (4.3)$$

- **Derivada de Potencia Promedio (APD) [W/h]:** Se define como el valor absoluto del valor promedio anual de las pendientes de dos muestras consecutivas.

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\dot{P}_{GRID}(n)| \quad (5.3)$$

Dónde:

$N$ : Número de muestras en un año,

$T_s$ : Período de muestreo,

$n$ : Índice de la muestra.

- **Variabilidad del Perfil de Potencia (PPV):** Mide la estabilidad del perfil de potencia de la red.

$$PPV = \frac{\sqrt{\sum_{f=f_1}^{f_f} P_{GRID,f}^2}}{P_{DC}} \quad (6.3)$$

Dónde:

$P_{GRID,f}$ : Es el armónico de potencia de la red a la frecuencia  $f$ ,

$f_i$  y  $f_f$ : Son las frecuencias inicial y final, respectivamente,

$P_{DC}$ : Valor promedio anual de potencia.

### 3.1.2.1. Criterios de Calidad Microrred 1.

En la Tabla 1-3 se muestran los índices de calidad que arroja la Microrred 1 al aplicar la estrategia de gestión de Arcos et al. (2016; pp.1-14):

Tabla 1-3: Índices de Calidad de la Microrred 1.

<b>PG,MAX1 (kW)</b>	<b>PG,MIN1 (kW)</b>	<b>MPD1 (W/h)</b>	<b>APD1 (W/h)</b>	<b>PPV1</b>
1,89	-1,65	727,43	47,03	3,11

Fuente: Basado en (Arcos et al., 2017; Arcos et al., 2016)

### 3.1.2.2. Criterios de Calidad Microrred 2.

En lo correspondiente a la Microrred 2, en la Tabla 2-3 se muestra los índices de calidad:

Tabla 2-3: Índices de Calidad de la Microrred 2.

<b>PG,MAX2 (kW)</b>	<b>PG,MIN2 (kW)</b>	<b>MPD2 (W/h)</b>	<b>APD2 (W/h)</b>	<b>PPV2</b>
1,15	-1,51	608,03	41,18	2,71

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

### 3.1.3. Diagrama de Bloques.

El diagrama de bloques de control de este caso se muestra en la Figura 2-3, está compuesto de tres bloques:

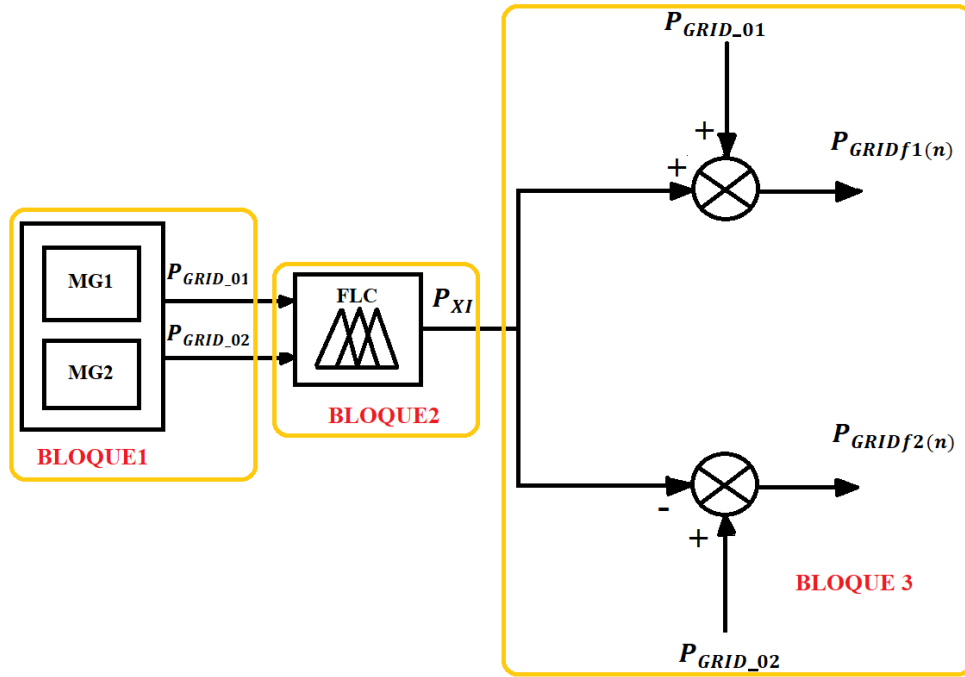


Figura 2-3. Diagrama de bloques del FLC para el intercambio de potencia entre dos microrredes residenciales vecinas.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

- **Bloque 1:** Este bloque corresponde a las Microrredes 1 y 2 en las cuales se cuenta con los perfiles de potencia de red antes de efectuar el intercambio de potencia:  $P_{GRID\_01}$  y  $P_{GRID\_02}$ .

Cabe mencionar, que de Arcos et al.( 2016: pp.1-14) y Arcos et al.(2017: pp.69-84) se tiene lo siguiente en relación a los  $P_{GRID}$ :

$$P_{GRID\_01}(n) = P_{AVG1}(n) + P_{FLC1}(n) + P_{SOC1}(n) \quad (7.3)$$

$$P_{GRID\_02}(n) = P_{AVG2}(n) + P_{FLC2}(n) + P_{SOC2}(n) \quad (8.3)$$

Donde  $P_{AVG1}$  y  $P_{AVG2}$  es el componente de baja frecuencia de  $P_{LG}$ ,  $P_{FLC1}$  y  $P_{FLC2}$  es la potencia obtenida por la estrategia de gestión ERoC.

- **Bloque 2:** Es el Controlador FLC que está asociado con  $P_{XI}$  que es la variable dado por FLC y que representa la cantidad de potencia a intercambiarse, por tanto, que se restara de la una microrred y que será añadida a la otra microrred, consiguiendo que disminuya el perfil de potencia de red negativo de la una microrred y el perfil de potencia de red positivo de la otra microrred.
- **Bloque 3:** Éste bloque permite obtener los resultados finales de los perfiles de potencia de red luego que se han realizado el intercambio de potencia y que está representado por  $P_{GRIDf1}$  y  $P_{GRIDf2}$ .

$$P_{GRIDf1}(n) = P_{GRID\_01}(n) + P_{XI}(n) \quad (9.3)$$

$$P_{GRIDf2} = P_{GRID\_02}(n) - P_{XI}(n) \quad (10.3)$$

#### 3.1.4. Diseño de la estrategia de gestión de energía basado en FLC

Como ya se ha mencionado, el objetivo de diseñar el controlador FLC es “suavizar” el perfil de potencia intercambiado, es decir, minimizar las fluctuaciones de potencia de la red y los picos de potencia de la red sin descuidar los criterios de calidad, para lo cual es necesario definir las variables de entrada y salida, así como también la base de reglas del controlador que permitan alcanzar tal cometido.

Para el diseño del FLC se sigue el siguiente orden:

1° Definición de las entradas y salidas, así como también el rango de variación de cada una de ellas.

2° Seleccionar el número de funciones de pertenencia (MF) asociadas (número, tipo mapeado, base de reglas) para entradas y salidas. Inicialmente se asume una distribución uniforme de un número de funciones de pertenencia y éstas vienen dadas de acuerdo al conocimiento de funcionamiento del sistema y como se necesita que opere.

3° Selección de mecanismo de inferencia. El mecanismo de inferencia a utilizar es el Método de Mandani por mínimos por su simplicidad, el Método de Mandani es el método general siendo los otros métodos (Takagi-Sugeno-Kang, Tsukamoto) simplificaciones que se inspiran en éste método y que sigue el siguiente proceso:

- a) Se fuzzifican las entradas,
- b) Consiguientemente se evalúan la base de reglas (set de reglas IF-THEN). La base de reglas se construye en función del conocimiento y cómo se necesita que funcione el sistema,
- c) La evaluación conlleva a la conclusión de cada regla y
- d) Se finaliza con la defusificación (transformación de los datos al mundo real) lo cual se lo consigue mediante el método del centroide.

El diseño y ajuste de parámetros del FLC se lo realiza mediante simulaciones numéricas utilizando Matlab, con el objetivo de minimizar los índices de calidad.



### 3.1.4.1. Entradas.

Este trabajo se enfoca en los perfiles de potencia de red de las dos microrredes en estudio, por lo que se definen como entradas a  $P_{GRID\_01}$  y a  $P_{GRID\_02}(n)$  y que en base a las fluctuaciones del perfil de potencia definirán si existe déficit o excedente de potencia. Estas variables son los antecedentes del Controlador FLC.

Luego que se ha definido los antecedentes se procede a establecer las funciones de pertenencia (MF) para cada una de las variables de entrada asumiendo una definición estándar de cuatro MFs triangulares.

Estas MFs corresponden a cuatro subconjuntos borrosos denominados como NB, NS, PS y PB indicando así mismo lo siguiente: N corresponde a “Negativo”, B es “Grande”, S es “Pequeño” y P es “Positivo”.

Las MFs son de tipo triangular, por cuanto la pendiente sufre cambios drásticos en algunos puntos del universo de discurso, se requiere analizar todas las fluctuaciones del perfil de potencia de red y que atenúen cuando corresponda de tal manera que otorgue a la salida  $P_{XI}$  el valor adecuado para realizar el intercambio de potencia. Las MFs se distribuyen a lo largo del rango de variación de cada entrada, lo cual está definido por las potencias máximas y mínimas del perfil de potencia de red de cada microrred lo cual se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 3-3: Potencias máxima y mínima de las MG1 y MG2.

	PG,MAX (kW)	PG,MIN (kW)
<b>Microrred 1</b>	1,89	-1,65
<b>Microrred 2</b>	1,15	-1,51

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Los valores de la Tabla 3-3 se toman como referencia en la programación en Matlab para definir el universo de discurso de las dos entradas.

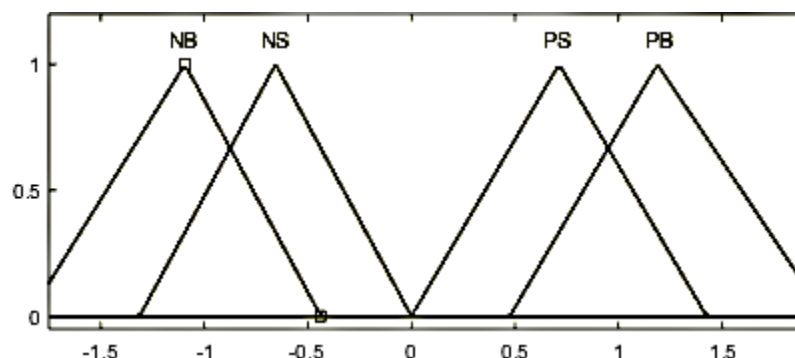


Figura 3-3. Funciones de pertenencia de las variables de entrada del Controlador.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

### 3.1.4.2. Salida.

La variable  $P_{XI}$  es la salida del controlador FLC y se asume cinco funciones de pertenencia NB, NS, ZE, PS y PB, mismas que son del tipo triangular con el fin de atenuar el valor de potencia a intercambiar. Cabe destacar la MF ZE (cero) que indica que no existirá intercambio de potencia.

El rango de fuzzyficación de la salida está sujeto al porcentaje de potencia a intercambiar por la MG1 hacia la MG2.

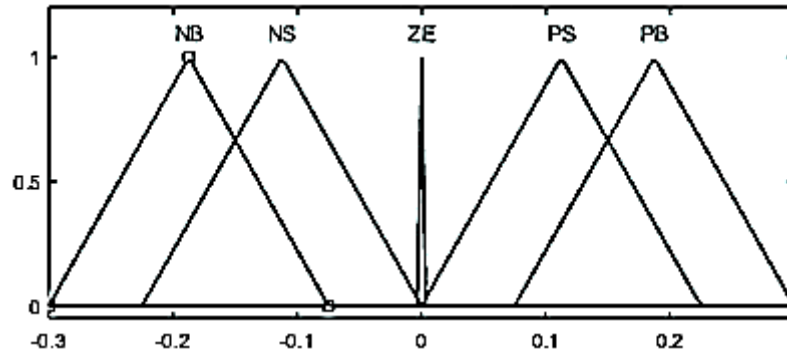


Figura 4-3. Funciones de pertenencia de la variable de salida del Controlador.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

### 3.1.4.3. Base de Reglas del Controlador.

Luego que se han definido las entradas y salida del FLC con sus respectivas MFs se procede a establecer la base de reglas teniendo en cuenta el conocimiento lingüístico del comportamiento de las microrredes aplicando el Método de Inferencia de Mandani por lo que a partir de los antecedentes de cada regla se obtiene una conclusión. La base de reglas del controlador está formada por 16 reglas de control, lo que permite definir como máximo 16 MFs para la variable de salida  $P_{XI}$ , el procedimiento de diseño lleva a cabo un conjunto de simulaciones de la microrred, calculando también los criterios de calidad para comprobar cuando se minimizan.

La base de reglas establece la política de control de la variable  $P_{XI}$ .

Tabla 4-3: Base de Reglas del Controlador FLC-Caso1.

$P_{XI}$		$P_{GRID\_01}$			
		NB	NS	PS	PB
$P_{GRID\_02}$	NB	PS	ZE	ZE	ZE
	NS	PB	PS	ZE	ZE
	PS	PS	PS	ZE	ZE
	PB	<u>PB</u>	PB	PS	ZE

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Es importante resaltar que, teóricamente las reglas 1(NB-NB), 2 (NB-NS) y 12 (PS-PB) la salida debería ser ZE, sin embargo, al simular en Matlab® arrojaba índices de calidad no idóneos por lo que al analizar los datos de la MG1 se observó que tenía picos elevados siendo necesario trasladar potencia a la MG2 por lo que fue necesario realizar el ajuste de la base de reglas inicial para minimizar los criterios de calidad estableciendo la base de reglas expuesta en la Tabla 4-3.

Por ejemplo al analizar la regla 12 (PS-PB) al colocar ZE, da como resultado PG,MAX de la MG2 igual a 1.1526kW, siendo la original 1.1525kW, es por eso que se ha colocado PS con el fin de que a la salida  $P_{XI}$  arroje un valor y se logró corregir el problema expuesto, obteniendo como resultado que se reduce a 1.0418kW

Tomando en consideración que se va a intercambiar la potencia de la Microrred 1 hacia la Microrred 2 se centra el análisis en la MG1 (en positivo) para la construcción de la base de reglas, de tal forma y tomando como ejemplo la cuarta regla (en negritas y subrayado) se formula de la siguiente manera, “SI el perfil de potencia de red de la Microrred 1 es NB (es decir exceso de generación) y el perfil de potencia de red de la Microrred 2 es PB (es decir tiene déficit de generación) ENTONCES  $P_{XI}$  es Positivo Grande, lo que significa que el perfil de potencia de la MG 1 aportará el máximo de potencia a la MG2. Otro ejemplo “SI el perfil de potencia de red de la MG1 es PB es decir tiene déficit de generación o excesivo consumo por tanto no tiene potencia que compartir a la MG2 que tiene el perfil de potencia PB entonces  $P_{XI}$  toma el valor de cero por tanto no se intercambia potencia”.

### **3.2. Intercambio entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1.**

Para el segundo caso en análisis la Microrred 2 (MG2) aporta potencia a la Microrred 1 (MG1), de tal forma que el Controlador de Lógica Difusa FLC determinará la cantidad de potencia que se restara de la MG2 y que será sumada a la MG1, lo que se traduce en que se merma el perfil de potencia de red negativo de la MG2 así como también el perfil de potencia de red positivo de la MG1.

Todos los ítems visto en el punto 3.1 son aplicables para este segundo caso, excepto lo relacionado a la “Base de Reglas del Controlador” que difiere y por tanto se lo desarrolla a continuación:

#### *3.2.1. Base de Reglas del Controlador.*

Similar al escenario 1 ya descrito, en base a las entradas y salida del FLC con sus respectivas MFs ya definidas se procede a establecer la base de reglas teniendo en cuenta el conocimiento lingüístico del comportamiento de las microrredes aplicando el Método de Inferencia de

Mandani por lo que a partir de los antecedentes de cada regla se obtiene una conclusión. De la misma forma se cuenta con 16 reglas.

Tabla 5-3. Base de Reglas del Controlador FLC-Caso2.

$P_{XI}$		$P_{GRID\_01}$			
		NB	NS	PS	PB
$P_{GRID\_02}$	NB	NS	NB	NB	<u>NB</u>
	NS	ZE	NS	NS	NS
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE
	PB	ZE	ZE	ZE	ZE

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Las reglas 1 (NB-NB) y 5 (NB-NS) teóricamente deberían ser ZE sin embargo y similar al caso anterior se presentaron valores no idóneos siendo necesario depurar la base de reglas lo que dio lugar a la Tabla 5-3.

Tomando en consideración que se va a intercambiar la potencia de la Microrred 2 hacia la Microrred 1 se centra el análisis en la MG2 (en negativo) para la construcción de la base de reglas, de tal forma y tomando como ejemplo la regla número 13 (en negritas y subrayado) se formula de la siguiente manera, “SI el perfil de potencia de red de la Microrred 2 es NB (es decir exceso de generación) y el perfil de potencia de red de la Microrred 1 es PB (es decir tiene déficit de generación) ENTONCES  $P_{XI}$  es NB, lo que significa que el perfil de potencia de la MG 2 aportará el máximo de potencia a la MG1. Otro ejemplo “SI el perfil de potencia de red de la MG2 es PB es decir tiene déficit de generación o excesivo consumo por tanto no tiene potencia que compartir a la MG2 que el perfil de potencia es PS entonces  $P_{XI}$  toma el valor de cero por tanto no se intercambia potencia”.

### 3.3. Intercambio entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1 y de la Microrred 1 hacia la Microrred 2.

Para el último caso en análisis tanto la Microrred 1 como la Microrred 2 intercambiarán potencia entre sí. Se podría decir que este caso es una combinación de los dos casos analizados previamente, por cuanto el Controlador de Lógica Difusa FLC al mismo tiempo deberá determinar la cantidad de potencia que se restara de la MG1 y que será sumada a la MG2 como también la cantidad de potencia que se restará a la MG2 y que será sumada a la MG1, lo que se traduce en que se merma los perfiles de potencia negativo y positivo de las dos microrredes.

Todos los ítems visto en el punto 3.1 son aplicables para este tercer caso, excepto lo relacionado a la base de reglas.

### 3.3.1. Base de Reglas del Controlador.

Teniendo definido las entradas y salida del FLC con sus respectivas MFs se procede a establecer la base de reglas teniendo en cuenta el conocimiento lingüístico del comportamiento de las microrredes aplicando el Método de Inferencia de Mandani. Similar a los dos casos anteriores se cuenta con 16 reglas.

En la Tabla 6-3 se han definido la Base de reglas.

Tabla 6-3: Base de Reglas del Controlador FLC - Caso3.

$P_{XI}$		$P_{GRID\_01}$			
		<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
$P_{GRID\_02}$	<b>NB</b>	NS	NS	NB	NB
	<b>NS</b>	PB	NS	NS	NB
	<b>PS</b>	PS	PS	ZE	ZE
	<b>PB</b>	PB	PB	PS	ZE

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Los casos de formulación de las reglas ya se han visto en los anteriores dos casos los cuales serían de forma similar en éste tercer caso.

## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El capítulo cuatro muestra los resultados obtenidos al diseñar el algoritmo de gestión de energía basado en Lógica Difusa – FLC para el intercambio de potencia entre dos microrredes eléctricas, para lo cual se han tomado en cuenta los perfiles de potencia de red de cada una de las microrredes y se establecieron tres casos de estudio con el fin de verificar la hipótesis planteada.

Las herramientas estadísticas que permiten comprobar la hipótesis planteada son los cinco parámetros de calidad que permiten evaluar el comportamiento del perfil de red, el cual debe ser suavizado y con la menor cantidad de pico y fluctuaciones de potencia.

Por cada caso se analizará los resultados obtenidos.

#### 4.1. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2.

En este punto se muestran los resultados obtenidos al realizar el intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2 obteniendo como resultado, que se da un intercambio máximo de potencia de 187.50 W, como se muestra en el Gráfico 1-4.

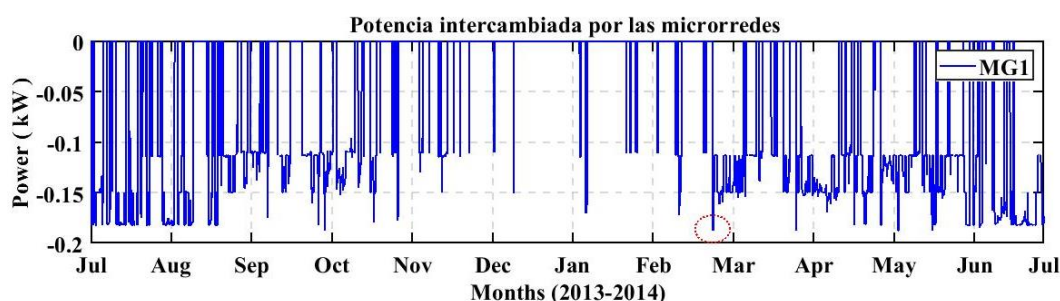


Gráfico 1-4. Potencia intercambiada por la MG1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En los siguientes Gráficos (2-4 y 3-4) en relación a la Microrred 1, luego que se ha realizado el intercambio de potencia se puede apreciar los perfiles de potencia de red, tanto la potencia intercambiada como el perfil original, en el cual se evidencia la reducción de picos negativos.

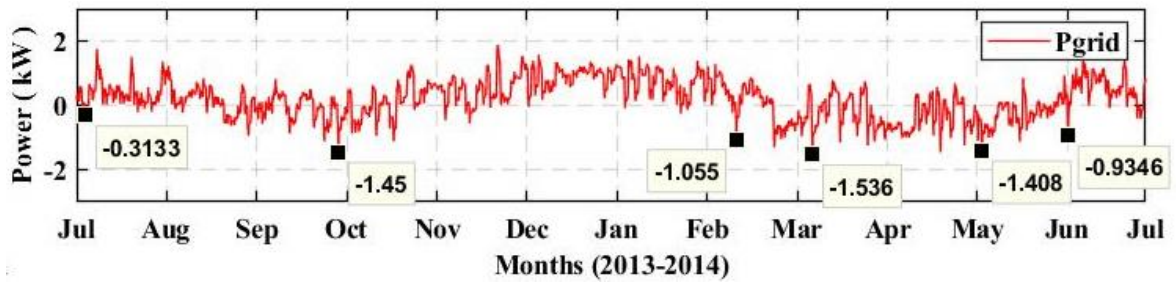


Gráfico 2-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

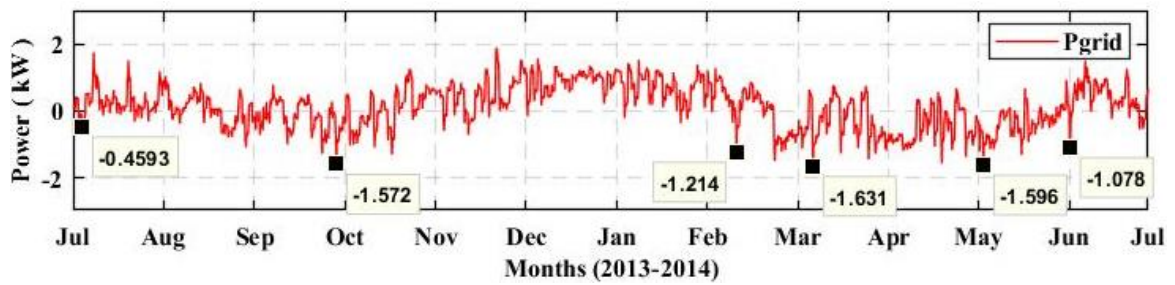


Gráfico 3-4. Perfil de Potencia original de la MG1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a la Microrred 2 se obtiene los siguientes Gráficos (4-4 y 5-4) en la cual se evidencia la reducción de los picos positivos:

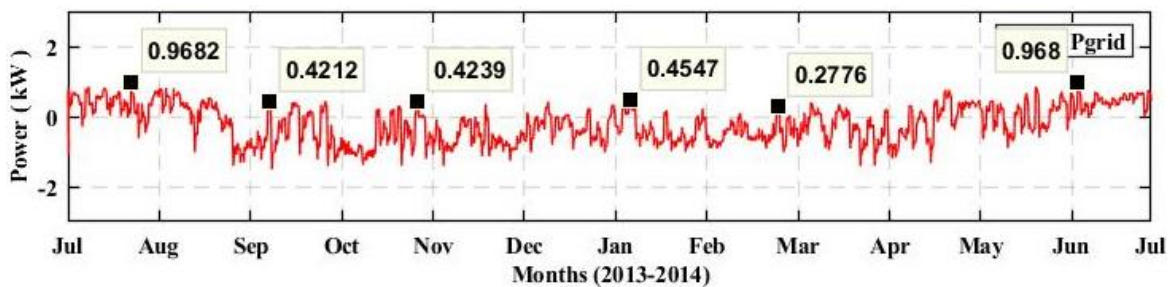


Gráfico 4-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

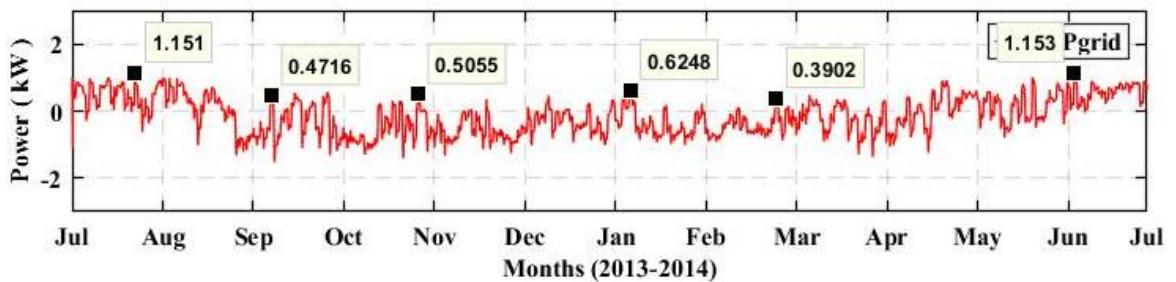


Gráfico 5-4. Perfil de Potencia original de la MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En el Gráfico 6-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC (línea azul) referente a la MG1, en el cual se evidencia de mejor forma el intercambio de potencia por cuanto se nota la disminución del perfil de potencia negativo de MG1 (la línea azul es menor), siendo la disminución promedio de 68.72 W en el perfil negativo producto del intercambio de potencia.

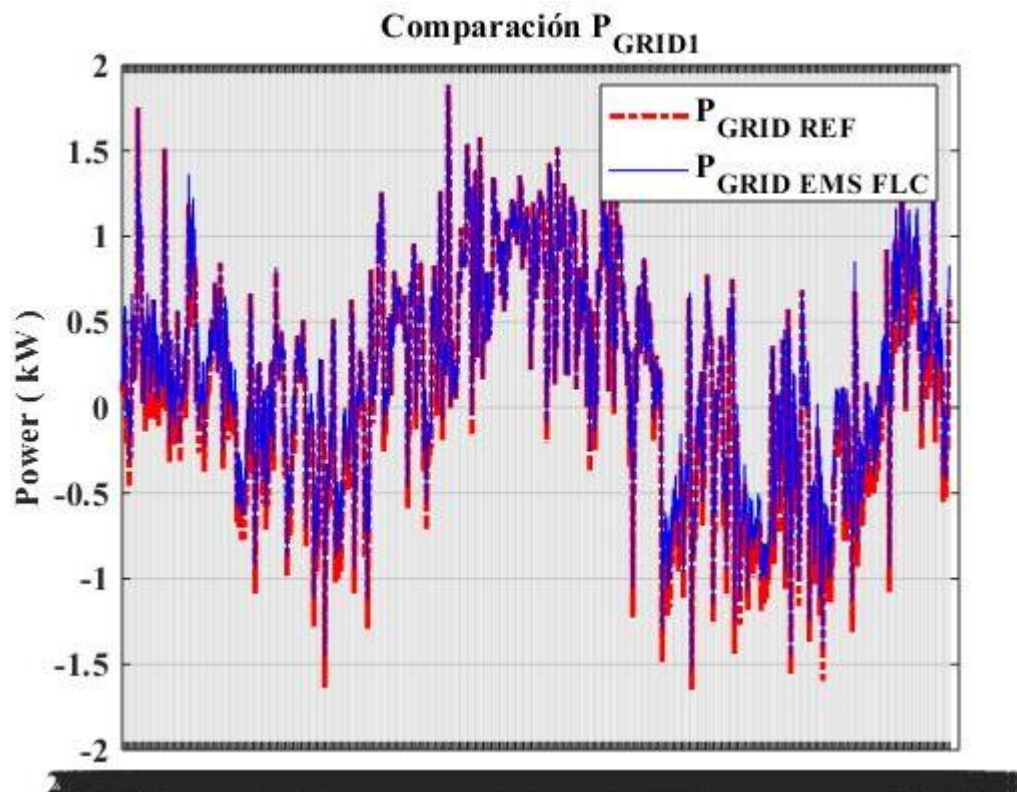


Gráfico 6-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cambio, en el Gráfico 7-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC (línea azul) referente a la MG2, en el cual se evidencia de mejor forma el intercambio de potencia notando que la línea azul es menor, teniendo una disminución promedio de 68.72 W en el perfil positivo producto del intercambio de potencia.



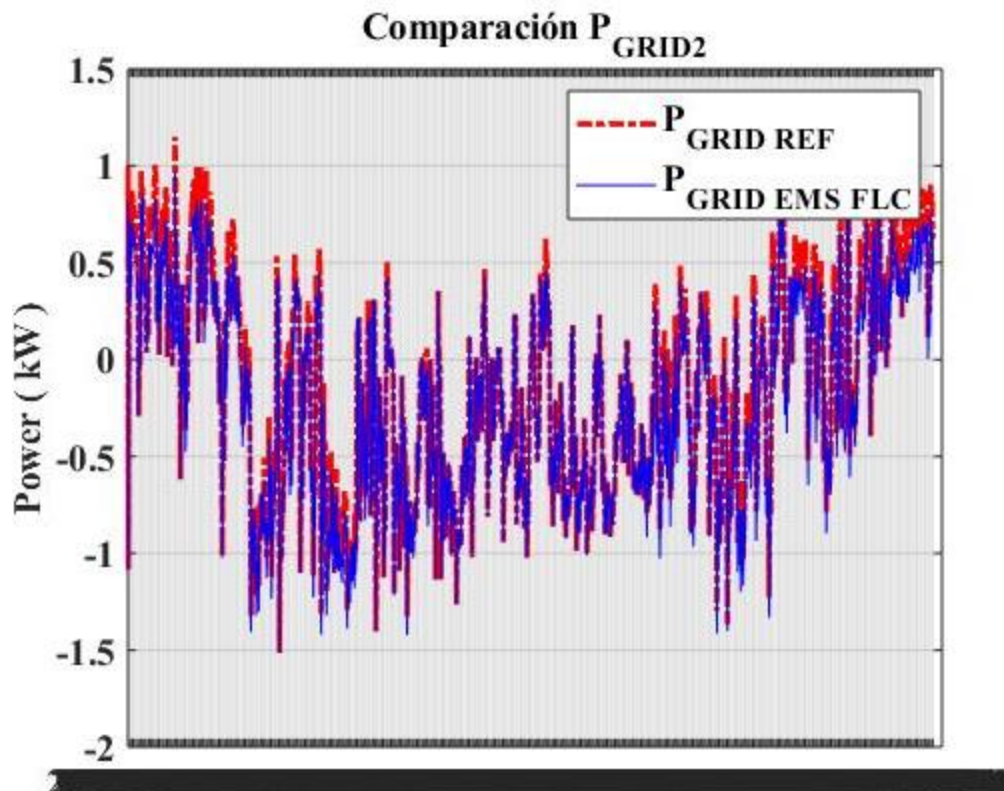


Gráfico 7-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Referente a los SOC de las baterías de las microrredes se observan (Gráficos 8-4 y 9-4) que ambas al aplicar el EMS oscilan al 75%, por tanto no existe riesgo alguno en cuanto a comprometer la vida útil de las baterías.

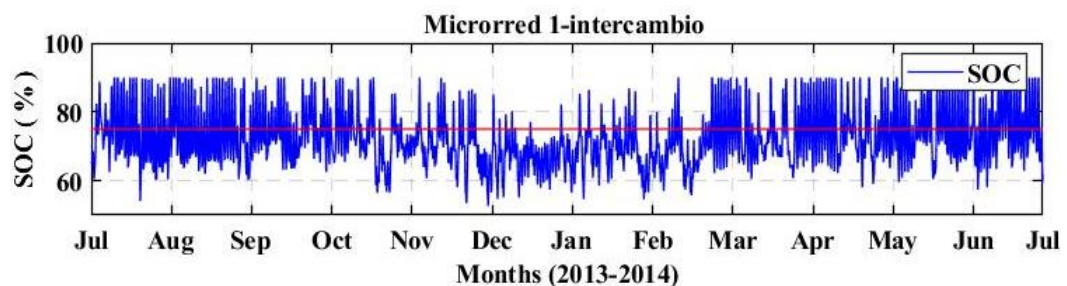


Gráfico 8-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación al MPD de la MG1 al realizar el intercambio de potencia se tiene una disminución de 727.43 (W/h) línea roja a 719.64 (W/h) línea azul como se muestra en el Gráfico 10-4.

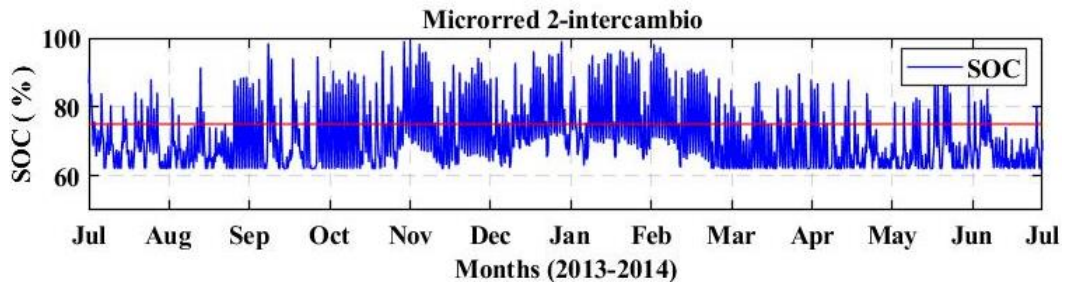


Gráfico 9-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

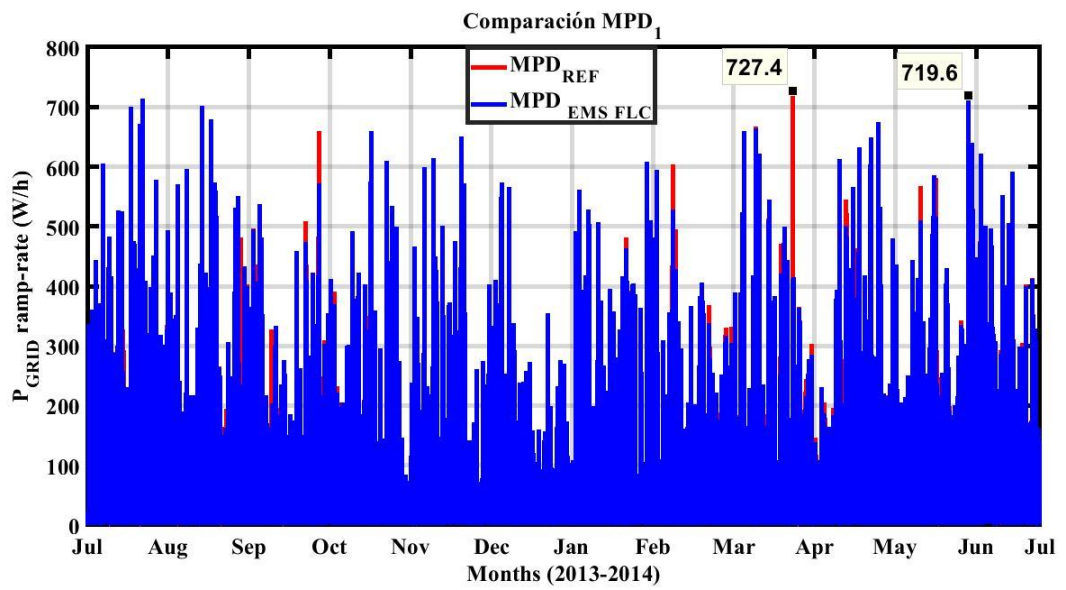


Gráfico 10-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cambio, en relación a la MG2 durante el año de estudio el MPD tuvo un incremento de 608.03(W/h) línea roja a 649,48 (W/h) línea azul, en el Gráfico 11-4 se evidencia lo dicho.

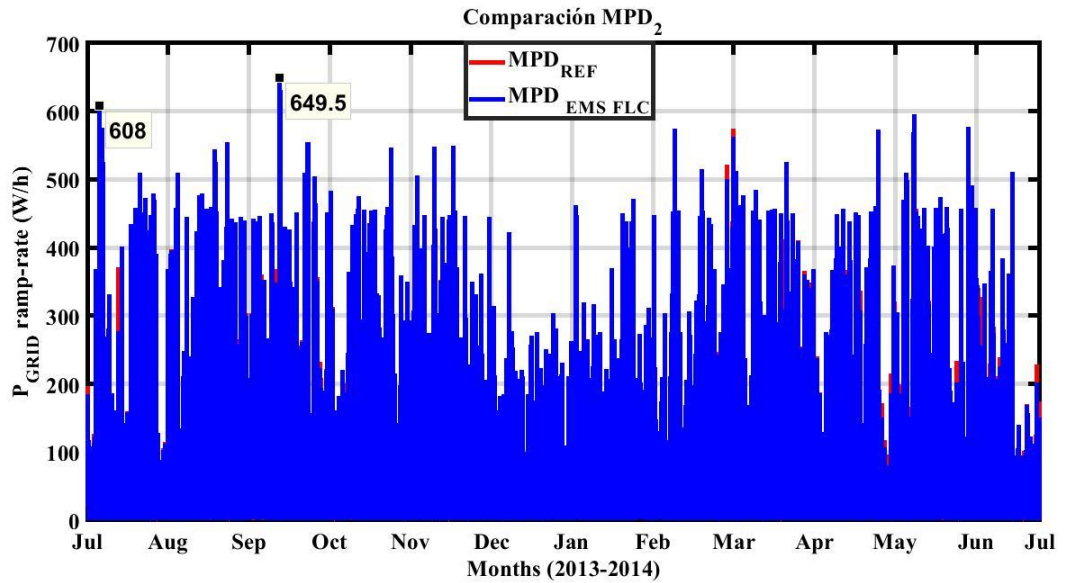


Gráfico 11-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a los índices de calidad tanto para la MG1 como para la MG2 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1-4: Índices de calidad de la Microrred 1 – Caso 1.

Descripción	PG,MAX1 (kW)	PG,MIN1 (kW)	MPD1 (W/h)	APD1 (W/h)	PPV1
MG1 ORIGINAL	1,89	-1,65	727,43	47,03	3,11
INTERCAMBIO DE MG1 A MG2	1,89	-1,54	719,64	48,97	1,96

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Como se puede observar en la Tabla 1-4 al aplicar el EMS\_FLC se tiene lo siguiente el PG, MAX se mantiene igual, el PG,MIN tiene un decremento del 6,67% (como era de esperarse por cuanto se está restando potencia del pico negativo), el MPD y el PPV también han decrecido, solamente el APD tiene un ligero incremento, por tanto estos resultados se podrían considerar aceptables.

Tabla 2-4: Índices de calidad de la Microrred 2 – Caso 1.

Descripción	PG,MAX2 (kW)	PG,MIN2 (kW)	MPD2 (W/h)	APD2 (W/h)	PPV2
MG2 ORIGINAL	1,15	-1,51	608,03	41,18	2,71
INTERCAMBIO DE MG1 A MG2	0,97	-1,51	649,48	43,93	5,48

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación a los índices de calidad de la MG2 (Tabla 2-4), el PG,MAX, según lo esperado tiene un decremento del 15,65%, por cuanto se está restando potencia de los picos positivos, PG,MIN se mantiene con el mismo valor y el resto de índices han sufrido un ligero incremento.

Para éste primer escenario en estudio, se demuestra la hipótesis planteada, la MG1 aporta potencia a la MG2, ya que se merma el perfil de potencia de red negativo de la MG1 así como también el perfil de potencia de red positivo de la MG2, lo cual se evidencia en base a los índices de calidad y las gráficas, así mismo es importante mencionar que el SOC de las baterías de las microrredes oscilan al 75%, con lo que se garantiza la vida útil de las baterías.

#### 4.2. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1.

En este punto se muestran los resultados obtenidos al realizar el intercambio de potencia entre la Microrred 2 hacia la Microrred 1 obteniendo como resultado, que se da un intercambio máximo de potencia de 125.00 W, como se muestra en el Gráfico 12-4.

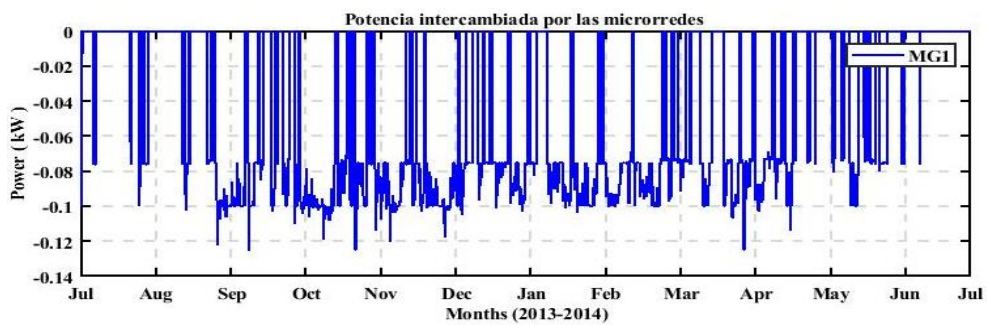


Gráfico 12-4. Potencia intercambiada por la MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En los siguientes Gráficos (13-4 y 14-4) en relación a la Microrred 1, luego que se ha realizado el intercambio de potencia se puede apreciar los perfiles de potencia de red, tanto la potencia intercambiada como el perfil original, en la cual se evidencia la disminución de los picos positivos.

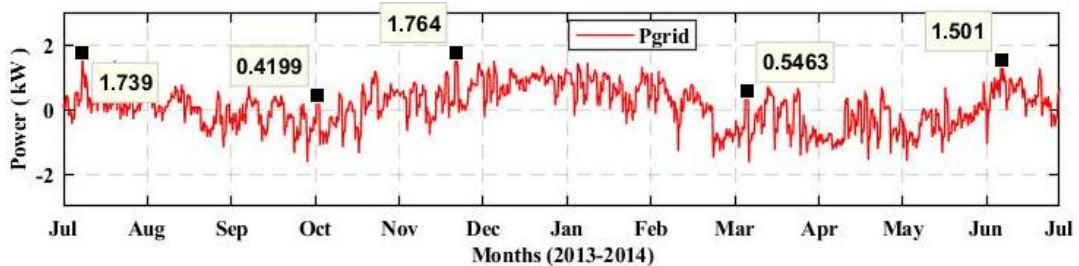


Gráfico 13-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS-FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

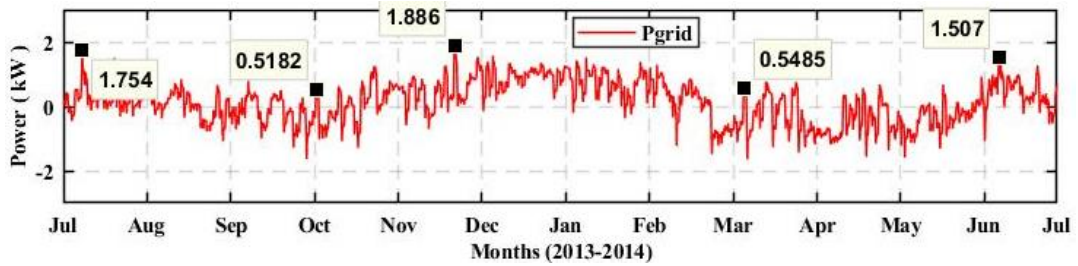


Gráfico 14-4. Perfil de Potencia original de la MG1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a la Microrred 2 se obtiene los siguientes Gráficos (15-4 y 16-4) en las cuales se verifica la disminución de los picos negativos:

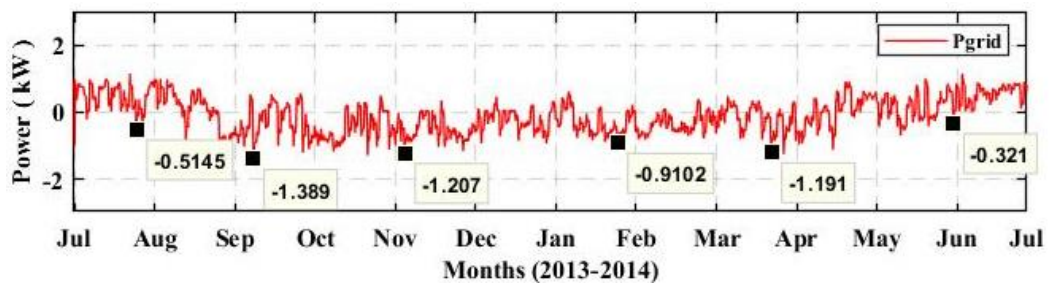


Gráfico 15-4. Perfil de potencia al aplicarse el EMS\_FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

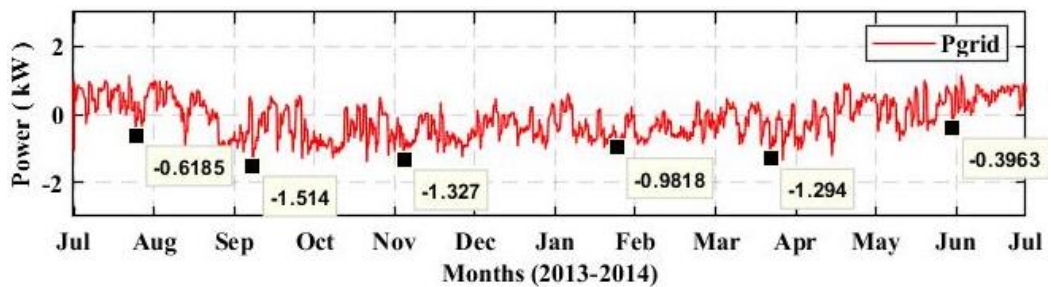


Gráfico 16-4. Perfil de Potencia original de la MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En el Gráfico 17-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC (línea azul) referente a la MG1, en el cual se evidencia claramente la disminución del perfil positivo (línea azul), teniendo una disminución promedio de 50.73W.

En cambio, en el Gráfico 18-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS\_FLC (línea azul) referente a la MG2, en el cual se evidencia, una disminución promedio de 50.70 W en el perfil negativo producto del intercambio de potencia.

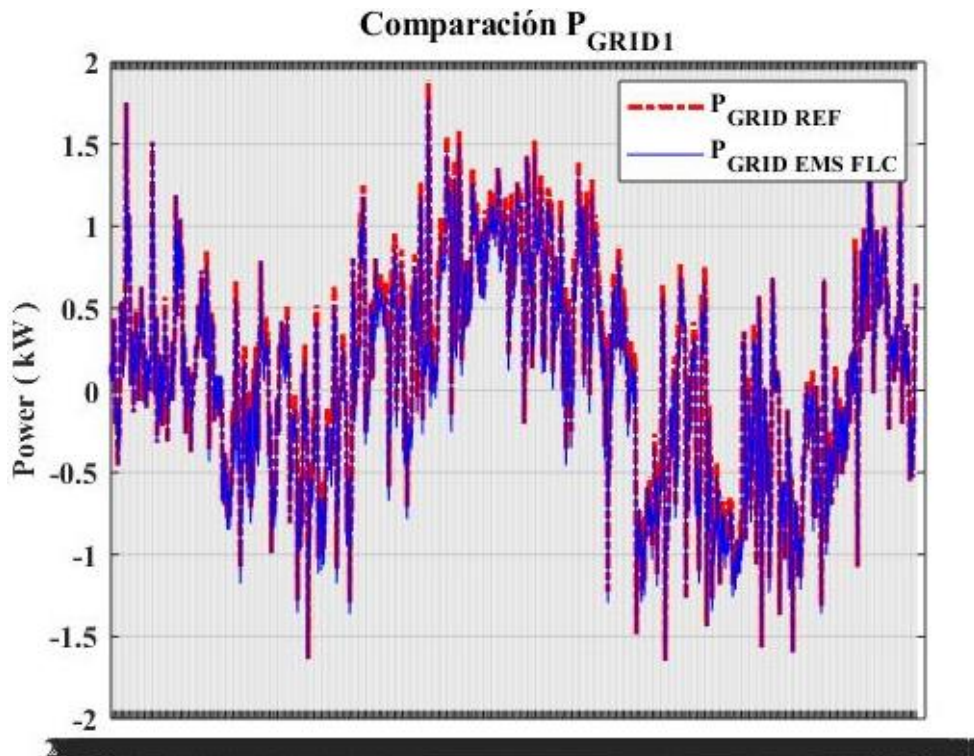


Gráfico 17-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

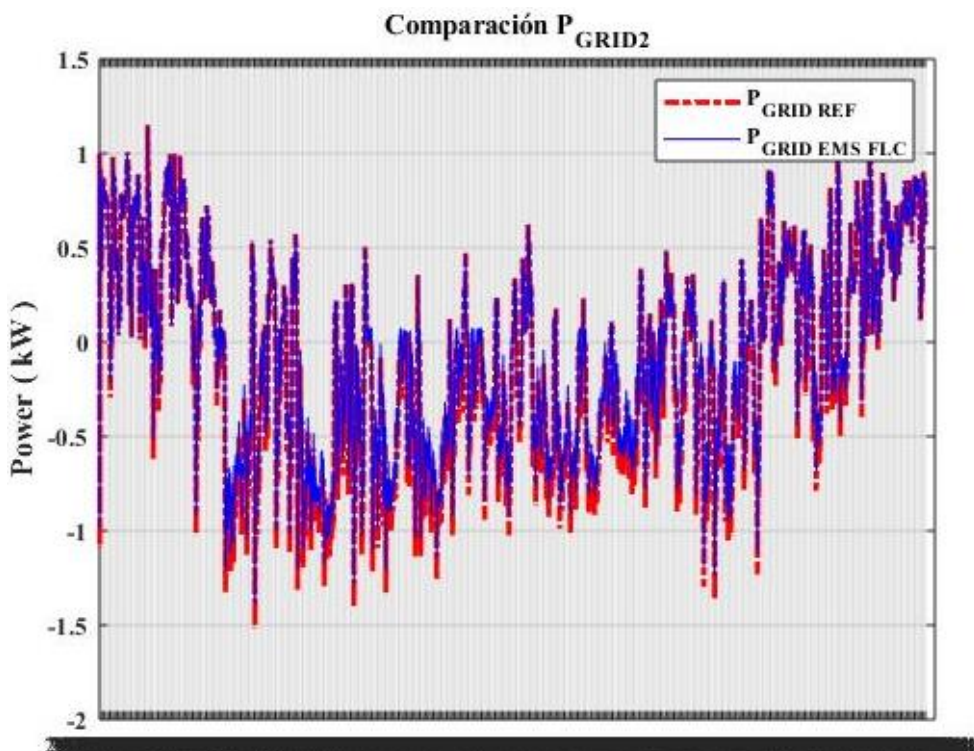


Gráfico 18-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Referente a los SOC de las baterías de las microrredes se observan (Gráficos 19-4 y 20-4) que ambas al aplicar el EMS\_FLC oscilan al 75%, por tanto no existe riesgo alguno en cuanto a comprometer la vida útil de las baterías.

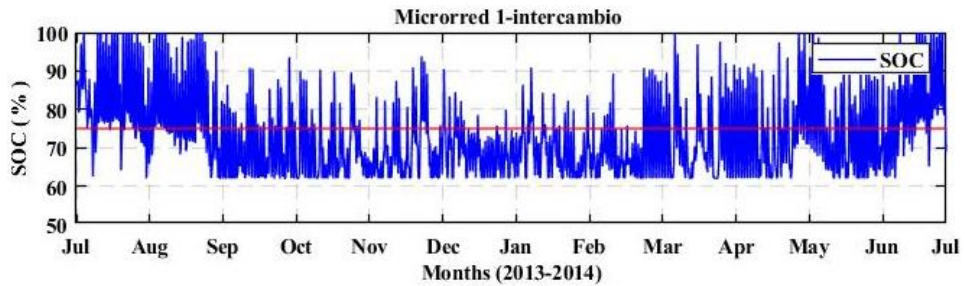


Gráfico 19-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

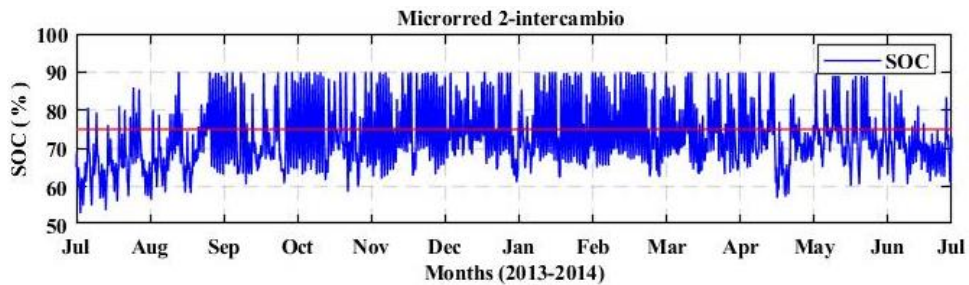


Gráfico 20-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación al MPD de la MG1 durante el año en estudio al realizar el intercambio de potencia se tiene una ligera disminución imperceptible de 727.43 (W/h) línea roja a 727.41 (W/h) línea azul como se muestra en el Gráfico 21-4.

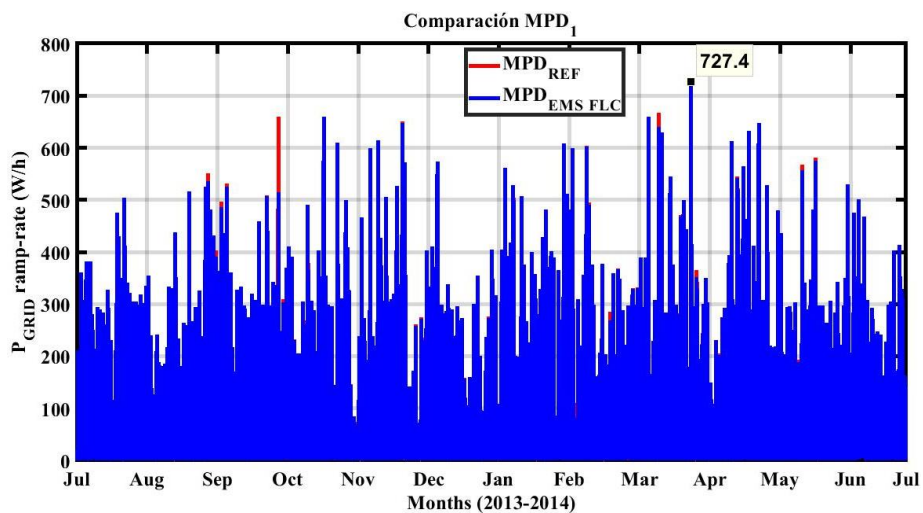


Gráfico 21-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación a la MG2 el MPD se mantiene en 608.03(W/h), Gráfico 22-4.

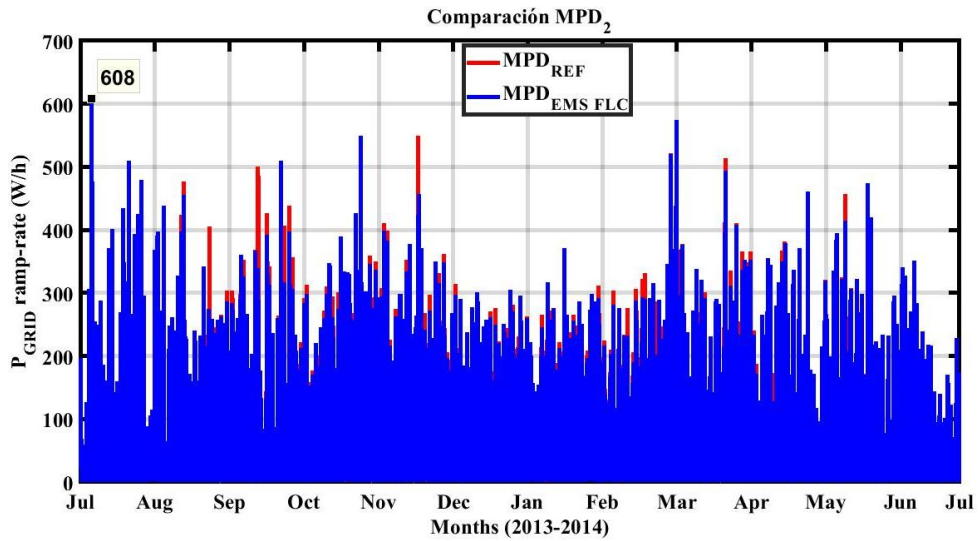


Gráfico 22-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a los índices de calidad tanto para la MG2 como para la MG1 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-4: Índices de calidad de la Microrred 2 – Caso 2.

Descripción	PG,MAX2 (kW)	PG,MIN2 (kW)	MPD2 (W/h)	APD2 (W/h)	PPV2
<b>MG2 ORIGINAL</b>	1,15	-1,51	608,03	41,18	2,71
<b>INTERCAMBIO DE MG2 A MG1</b>	1,15	-1,39	608,03	40,79	3,25

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Como se puede observar en la Tabla 3-4 al aplicar el EMS se tiene lo siguiente el PG, MAX se mantiene igual, el PG,MIN tiene un decremento del 7,95% (como era de esperarse por cuanto se está restando potencia del pico negativo), el MPD también mantiene el mismo valor que el original, el APD ha disminuido y el PPV tiene un ligero incremento, por tanto estos resultados se podrían considerar aceptables.

Tabla 4-4: Índices de calidad de la Microrred 1 – Caso 2.

Descripción	PG,MAX1 (kW)	PG,MIN1 (kW)	MPD1 (W/h)	APD1 (W/h)	PPV1
<b>MG1 ORIGINAL</b>	1,89	-1,65	727,43	47,03	3,11
<b>INTERCAMBIO DE MG2 A MG1</b>	1,79	-1,65	727,41	48,70	4,91

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación a los índices de calidad de la MG1 (Tabla 4-4), el PG,MAX, según lo esperado tiene un decremento del 5.29%, por cuanto se está restando potencia de los picos positivos, PG,MIN



se mantiene con el mismo valor, el MPD se ha reducido ligeramente y el resto de índices han sufrido un ligero incremento.

En cuanto al segundo escenario en estudio, también se demuestra la hipótesis planteada, en éste caso, a diferencia del primero, la MG2 aporta potencia a la MG1, ya que se disminuye el perfil de potencia de red negativo de la MG2 y el perfil de potencia de red positivo de la MG1, cuyo intercambio de potencia se lo demuestra en base a los criterios de calidad y las gráficas. Además, el SOC de las baterías de las dos microrredes oscilan al 75%, con lo que no se expone la vida útil de las baterías.

#### 4.3. Análisis del Intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2 y de la Microrred 2 hacia la Microrred 1.

En este punto se muestran los resultados obtenidos al realizar el intercambio de potencia entre la Microrred 1 hacia la Microrred 2 y de la Microrred 2 hacia la Microrred 1, obteniendo como resultado, que se da un intercambio máximo de potencia de la MG1 a la MG2 de 62.50W y de la MG2 a la MG1 de 62.40 W, como se muestra en el Gráfico 23-4.

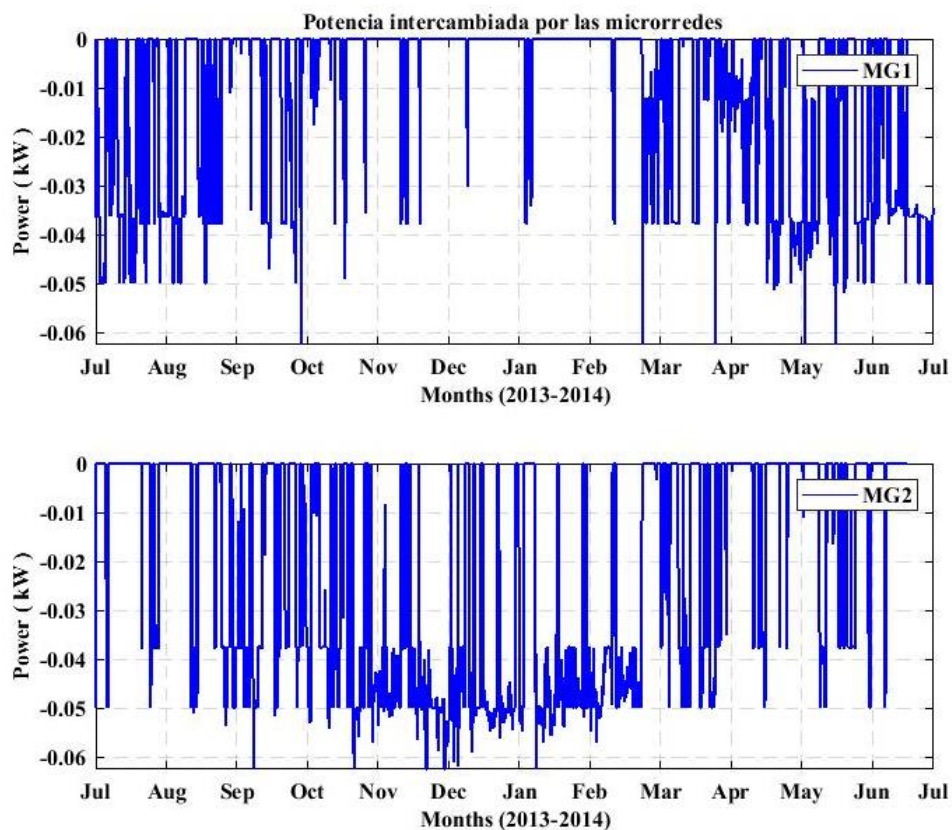


Gráfico 23-4. Potencia intercambiada por la MG1 y la MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En los siguientes Gráficos (24-4 y 25-4) en relación a la Microrred 1, luego que se ha realizado el intercambio de potencia se puede apreciar los perfiles de potencia de red, tanto la potencia intercambiada como el perfil original. Se evidencia la disminución de los picos positivos y negativos de la Microrred 1.

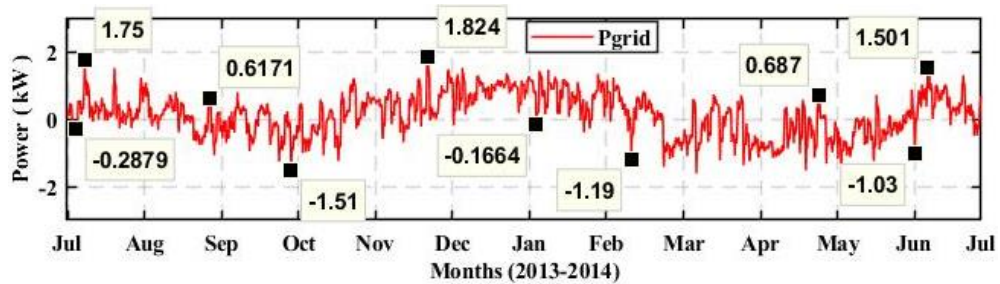


Gráfico 24-4. Perfil de potencia MG1 al aplicarse el EMS-Caso 3.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

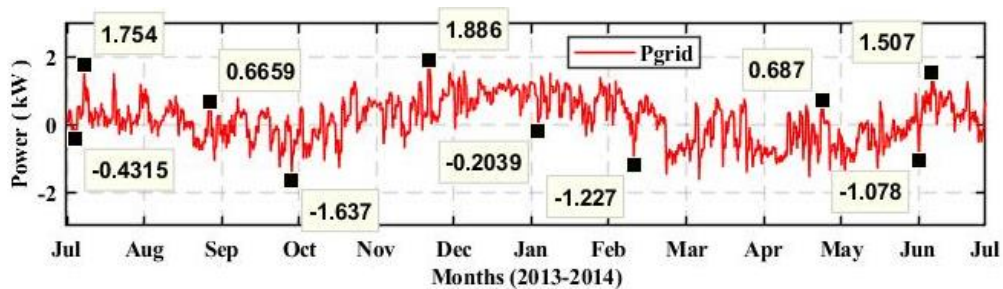


Gráfico 25-4. Perfil de Potencia original de la MG1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a la Microrred 2 se obtiene los siguientes Gráficos (26-4 y 27-4), de la misma forma, se reducen los picos positivos y negativos:

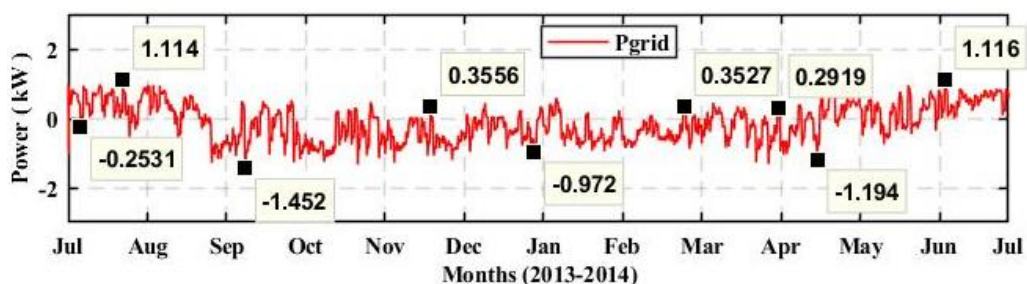


Gráfico 26-4. Perfil de potencia MG2 al aplicarse el EMS – Caso 3.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

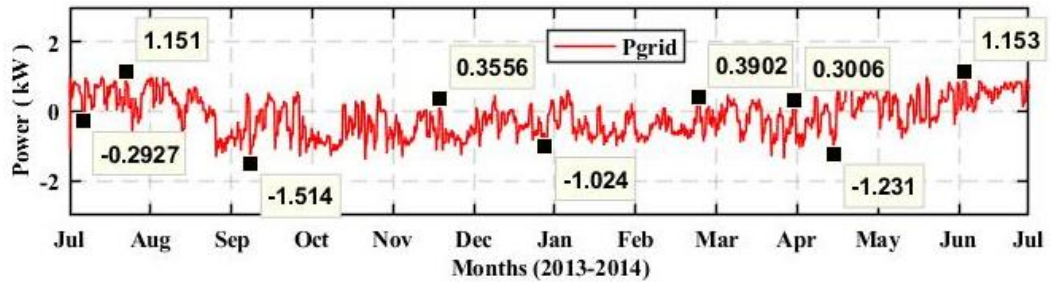


Gráfico 27-4. Perfil de Potencia original de la MG2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En el Gráfico 28-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS (línea azul) referente a la MG1 y a la MG2.

De los datos analizados se concluye que del perfil de potencia de la MG1 y de la MG2 se resta un promedio de 9.60 W.

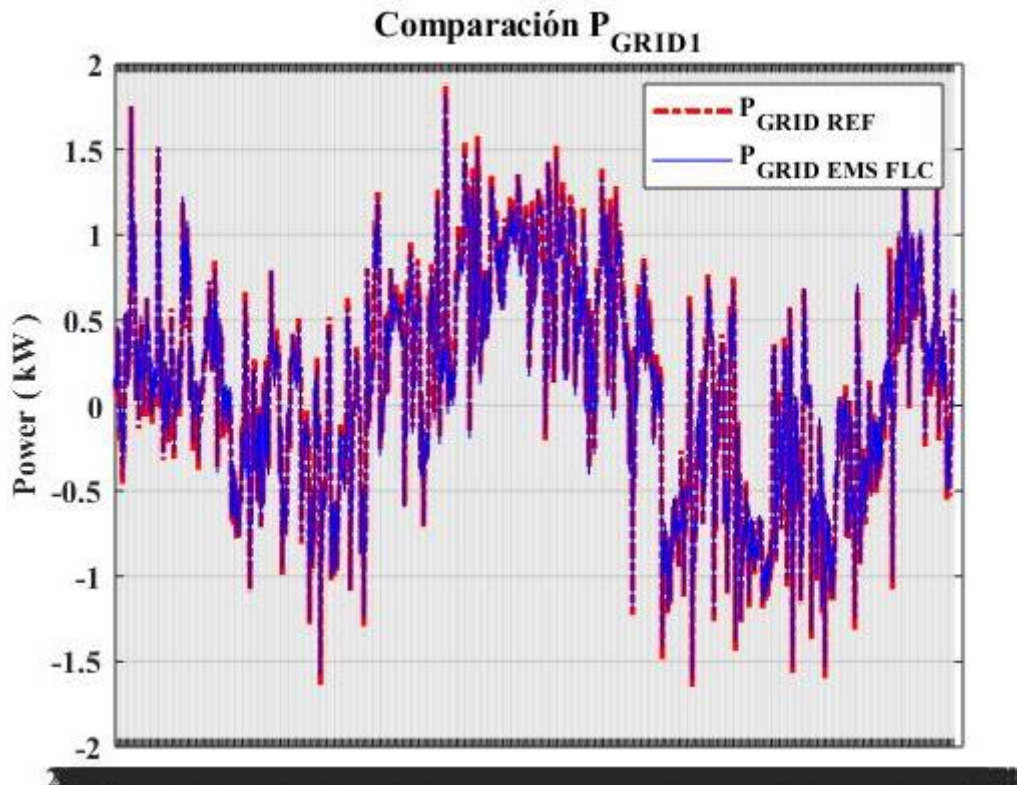


Gráfico 28-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cambio, en el Gráfico 29-4 se realiza una comparación entre los perfiles de potencia original (línea roja) y luego que se ha aplicado el EMS-FLC (línea azul) referente a la MG2, en el cual es evidente la disminución tanto de los picos positivos como negativos.

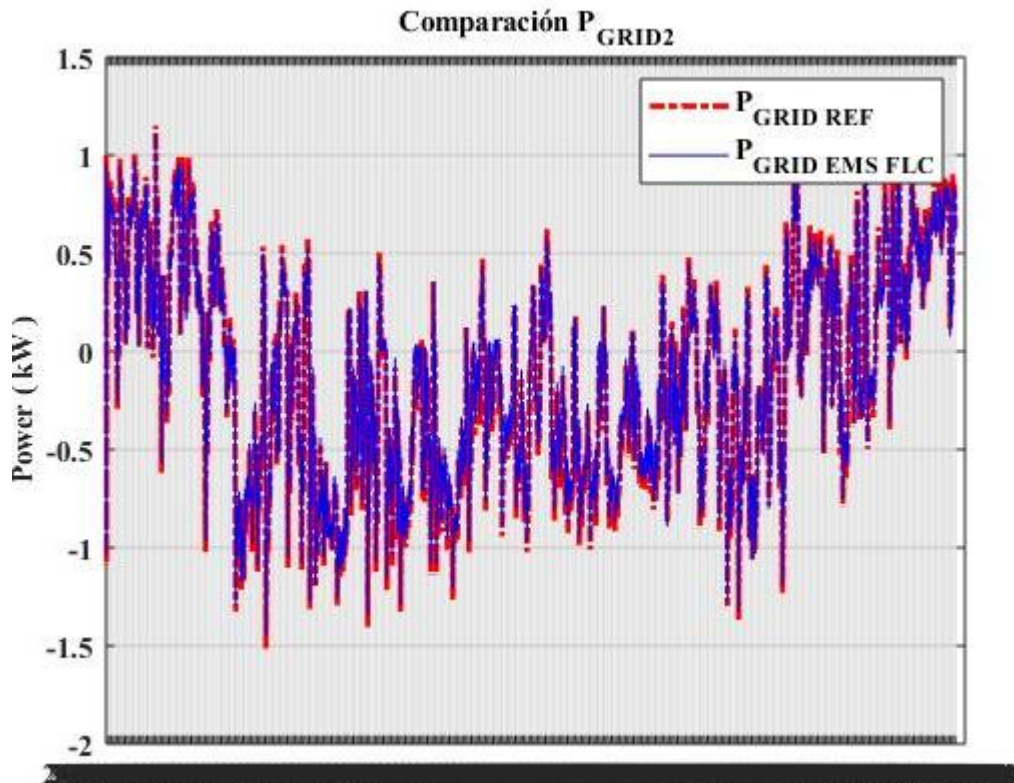


Gráfico 29-4. Comparación entre perfiles de potencia original y luego que se ha aplicado el EMS en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Referente a los SOC de las baterías de las microrredes se observan (Gráficos 30-4 y 31-4) que ambas al aplicar el EMS se alejan del 75%, no siendo el ideal, por cuanto se compromete la vida útil de las baterías, por tanto se necesita obligatoriamente incluir a la variable del SOC en el FLC para tomar acciones de control en función del estado de carga de los almacenamientos de cada microrred.

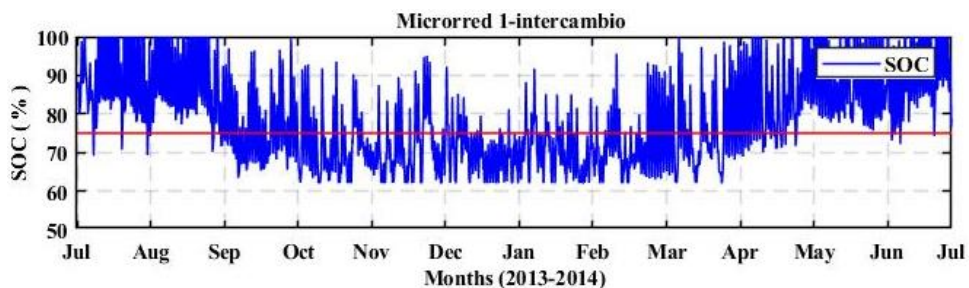


Gráfico 30-4. SOC de la MG1 al aplicar el EMS-FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

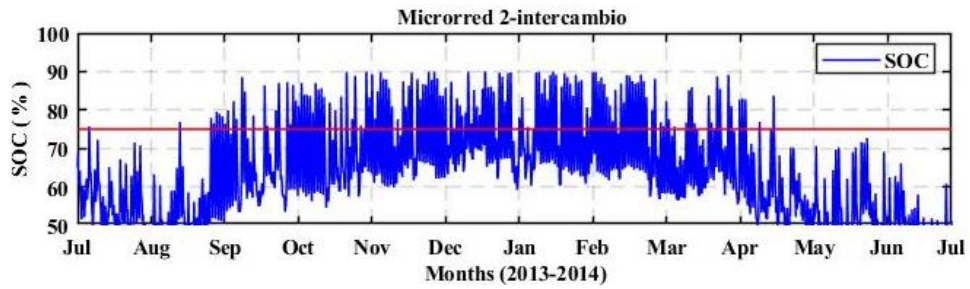


Gráfico 31-4. SOC de la MG2 al aplicar el EMS-FLC.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación al MPD de la MG1 durante el año en estudio al realizar el intercambio de potencia se tiene una ligera disminución de 727.43 (W/h) línea roja a 727.42 (W/h) como se muestra en el Gráfico 32-4.

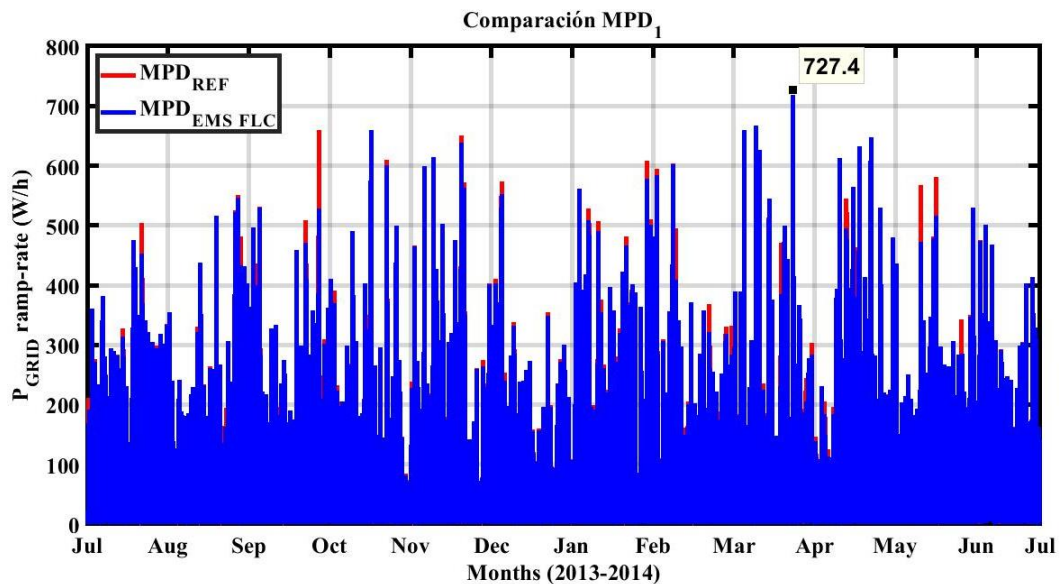


Gráfico 32-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 1.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación a la MG2, el MPD, así mismo tuvo un ligero decremento de 608.03(W/h) a 607.33 (W/h), como se puede observar en el Gráfico 33-4.

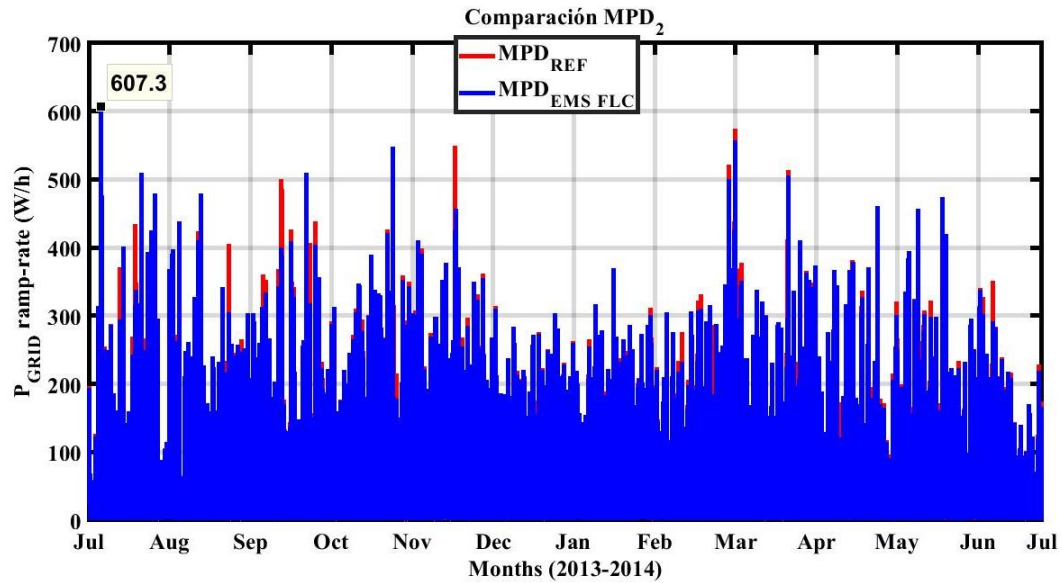


Gráfico 33-4. Comparación entre MPD original y luego que se ha aplicado el EMS-FLC en la Microrred 2.

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En cuanto a los índices de calidad tanto para la MG1 como para la MG2 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5-4: Índices de calidad de la Microrred 1 - Caso 3.

Descripción	PG,MAX1 (kW)	PG,MIN1 (kW)	MPD1 (W/h)	APD1 (W/h)	PPV1
<b>MG1 ORIGINAL</b>	1,89	-1,65	727,43	47,03	3,11
<b>INTERCAMBIO</b>	1,82	-1,61	727,42	47,12	3,26

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

Como se puede observar en la Tabla 5-4 al aplicar el EMS se tiene lo siguiente el PG, MAX se ha disminuido en 3,70%, el PG,MIN en 2,42%, el MPD también ha disminuido de forma casi imperceptible, en cambio el APD y el PPV tienen un ligero incremento, por tanto estos resultados se podrían considerar aceptables.

Tabla 6-4: Índices de calidad de la Microrred 2 - Caso 3.

Descripción	PG,MAX2 (kW)	PG,MIN2 (kW)	MPD2 (W/h)	APD2 (W/h)	PPV2
<b>MG2 ORIGINAL</b>	1,15	-1,51	608,03	41,18	2,71
<b>INTERCAMBIO</b>	1,12	-1,45	607,33	41,29	2,92

Realizado por: Ramos, Víctor, 2020.

En relación a los índices de calidad de la MG2 (Tabla 6-4), el PG,MAX se ha reducido en 2,61%, el PG,MIN en 3,97%, el MPD se ha reducido de manera imperceptible, en cambio el APD y el PPV se han incrementado ligeramente.

En relación al tercer escenario en estudio, de manera similar a los dos casos en estudio planteados, también se demuestra la hipótesis establecida: tanto la Microrred 1 como la Microrred 2 intercambian potencia entre sí, lo que implica que los perfiles de potencia negativo y positivo de las dos microrredes disminuyeran. Esta reducción se evidencia al analizar los criterios de calidad y las gráficas. La gran diferencia con los dos primeros casos en estudio es en relación al SOC de las baterías de las dos microrredes que distan del 75%, lo cual demuestra un riesgo inminente para el buen funcionamiento de las baterías reduciendo considerablemente la vida útil de las mismas.

## CONCLUSIONES

- Las microrredes eléctricas incluyen diferentes escenarios en términos de arquitectura de potencia, objetivos y métodos para el diseño de estrategias de gestión energética por ejemplo Control de Lógica Difusa (FLC), Control Predictivo del Modelo (MPC), Programación Dinámica Estocástica (SDP), etc, todas ellas persiguiendo el objetivo común como es minimizar las fluctuaciones y picos de potencia manteniendo los criterios de calidad en niveles óptimos como es el caso del presente trabajo.
- El control Fuzzy Logic es una técnica potente ampliamente utilizada capaz de enfrentar todas las imprecisiones de sistemas complejos no lineales, que permite representar, manipular, calcular e implementar el conocimiento heurístico que se tiene acerca de cómo funciona un sistema/ proceso/ planta a través de reglas If – Then. Esta técnica de control permite dejar a un lado el modelo matemático del sistema y se centra en el funcionamiento u operación del mismo. En este sentido, por ejemplo al conocer si existe mucha generación y la batería está medianamente/completamente vacía, entonces se carga la batería.
- En el presente trabajo se tomó en consideración dos microrredes eléctricas con fuentes de energía fotovoltaica y cargas residenciales, en base a las cuales se trabajó en el diseño del Controlador FLC con 16 reglas analizando los perfiles de potencia de red de dichas microrredes. Para diseñar el EMS se tomó en cuenta el excedente de potencia generada por las microrredes por lo que se planteó tres casos: en el primer caso, el perfil de potencia de la MG1 aporta una potencia máxima de 187,50 W a la MG2, en el segundo caso, la MG2 aporta a la MG1 la potencia máxima de 125,00 W y en el último caso el intercambio de potencia es bidireccional, aportando la MG1 a la MG2 una potencia máxima de 62,50 W y la MG2 a la MG1 aporta una potencia máxima de 62,40W. En los tres escenarios planteados se demostró el intercambio de potencia mediante los criterios de calidad y las gráficas, este intercambio permite garantizar el suministro de energía eléctrica por tanto no existe o se minimiza las interrupciones.
- El SOC debe estar oscilando al 75%, caso contrario se compromete la vida útil de las baterías. De los tres casos en estudio: en los dos primeros el SOC oscila al 75%, no así en el tercer escenario, por tanto se necesita obligatoriamente incluir a la variable del SOC en el FLC para tomar acciones de control en función del estado de carga de los sistemas de almacenamiento de energía de cada microrred.



- En MatLab se logró evidenciar los intercambios de potencia entre los perfiles de las microrredes, reduciendo las fluctuaciones y los picos de potencia, así como también manteniendo los índices de calidad en niveles aceptables.

## RECOMENDACIONES

- En la actualidad las fuentes de energía renovable se han convertido en una opción sumamente importante para reducir la contaminación ambiental y más aún si se toma en consideración que son fuentes que son prácticamente inagotables. Para explotar al máximo las bondades de las fuentes de energía renovable es fundamental el apoyo de los distintos gobiernos con el fin de enfocar los esfuerzos tanto económicos como intelectuales para implementar tecnologías renovables para la generación de energía limpia y desarrollar estrategias de gestión de energía. La generación distribuida, ocasionará una reducción significativa en la utilización de las redes de transmisión y de distribución. Ciertamente las energías renovables permitirán reducir la contaminación ambiental, sin embargo no hay que descuidar que en unos años también estarán generando residuos (por ejemplo los paneles solares que culmine su vida útil o por el avance de la tecnología) que de la misma forma contaminarán el ambiente y por tanto no hay que descuidar ésta particularidad.
- En el diseño de la segunda microrred en base a la MG1 se recomienda analizar los datos de los perfiles de generación y demanda con el fin de evitar que los criterios de calidad se desborden.
- Luego que se cuente con las microrredes por separado, mismas que deben tener índices de calidad aceptables, se proceda a unificar y se debe comprobar nuevamente que los índices no hayan variado, consiguientemente se proceda a diseñar la estrategia de gestión, validando y revisando los datos de los perfiles de potencia de red e ir puliendo los mismos.
- Actualmente en el Ecuador está vigente la Regulación ARCONEL Nro. 003/18 que establece que, en caso que la producción supera el consumo, el excedente se transfiere al siguiente mes en forma de crédito (Consumo Diferido – Net Metering) y en caso de que el usuario del suministro de energía eléctrica requiera energía de la EED se facturará de conformidad al Pliego Tarifario vigente. Ésta forma de crédito permite reducir o anular las facturas de consumo del suministro de energía eléctrica, con el consiguiente ahorro económico para el consumidor. Por tanto según las regulaciones vigentes no permite a los consumidores vender a la EED los excedentes de energía por cuanto no se tiene un precio establecido. Éste tratamiento comercial de la energía producida se denomina como Reconocimiento de Precio-Net Billing.
- El presente estudio está enfocado al intercambio de potencia entre microrredes eléctricas residenciales vecinas, sin embargo esto puede ser perfilado para el resto

de consumidores especialmente las de gran consumo, por ejemplo consumidores industriales, donde el ahorro económico va a ser muy significativo (a más de las ventajas que brindan las microrredes eléctricas y que fueron detallados en éste trabajo).

## BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Abella, M. (2011). Sistemas Fotovoltaicos. In *Ciemat* (Vol. 1, Issue 1).  
[http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf)
- Alvarado Rodríguez, J. A., García Rodríguez, J., Hernández Santos, W., Martínez Castillo, E. O., & Vidaurri González, J. R. (2005). *Lógica Difusa*. 1–39.
- Arango-Serna, M. D., Serna-Durán, C. A., & Pérez-Ortega, G. (2012). La Gestión de Indicadores Empresariales con Lógica Difusa para la Toma de Decisiones. *Lámpsakos*, 1(8), 47–53. <https://doi.org/10.21501/21454086.678>
- ARCONEL. (2015). *REGULACIÓN No. ARCONEL-004/15* (pp. 1–18).  
<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Regulacion-No.-ARCONEL-005-15.pdf>
- ARCONEL. (2018). *Regulacion Nro. ARCONEL-003/18* (p. 41).
- Arcos-Aviles, D., Sotomayor, D., Llanos Proaño, J., Guinjoan, F., Marietta, M. P., Pascual, J., Marroyo, L., & Sanchis, P. (2017). Fuzzy energy management strategy based on Microgrid Energy Rate-of-Change applied to an electro-thermal residential microgrid. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 99–105. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001230>
- Arcos-Aviles, Diego, Pascual, J., Guinjoan, F., Marroyo, L., Sanchis, P., & Marietta, M. P. (2017). Low complexity energy management strategy for grid profile smoothing of a residential grid-connected microgrid using generation and demand forecasting. *Applied Energy*, 205(July), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.123>
- Arcos-Aviles, Diego, Pascual, J., Marroyo, L., Sanchis, P., & Guinjoan, F. (2016). Fuzzy Logic-Based Energy Management System Design for Residential Grid-Connected Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>
- Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica, 1 (2015).
- Blancas, J., & Noel, J. (2018). Pronóstico De La Demanda Eléctrica a Corto Plazo Con Lógica Difusa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2(1), 1–23. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Blizard, C., & Rabia, Z. (n.d.). Un futuro combinado. *ABB*, 84–88.  
<http://mparalelos.com/site/un-futuro-contacto/>
- Bordons, C., García-Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. *ELSEVIER*, 12, 117–132.
- Chahuara Quispe, J. C. (2005). *Control neuro-difuso aplicado a una Grúa Torre*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- CITCEA. (2013). Smart Grids : Tecnologías prioritarias. *FUNSEAM-Fundación Para La Sostenibilidad Energética y Ambiental*, 1–30.
- D`Negri, C. E., & De Vito, E. L. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, 6(3), 126–136.
- Dimeas, A. L., & Hatziargyriou, N. D. (2005). Operation of a Multiagent System for Microgrid Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1447–1455.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852060>
- EPEC. (2018). Energía renovable : la biomasa. *División de Gestión Ambiental*.  
<https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>
- Espejo Marín, C. (2004). La energía eólica en España. *Investigaciones Geográficas*, 35(35), 45–65. <https://doi.org/10.14198/ingeo2004.35.03>
- Farhangi, H. (2010). The path of the Smart Grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. <https://doi.org/10.1109/MPE.2009.934876>
- Fossati, J. P. (2011). Literature review of microgrids. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 9, 13–20.
- Gómez Araujo, I. D., Quiroga Méndez, J. E., & Jaspón Carvajal, N. M. (2009). Calificación de estudiantes por medio de un Sistema de Lógica Difusa. *Revista Educación En Ingeniería*, 49–56.
- Gonzalez, M. A., & Ballarin, V. L. (2008). Segmentación de imágenes utilizando la transformada Watershed: Obtención de marcadores mediante lógica difusa. *IEEE Latin America Transactions*, 6(2), 223–228. <https://doi.org/10.1109/TLA.2008.4609921>

- González Morcillo, C. (2015). *Lógica Difusa, una introducción práctica*. 39(234), 1–29.
- Guzmán, D., & Castaño, V. M. (2006). La lógica difusa en ingeniería: Principios, aplicaciones y futuro. *Ciencia y Tecnología: Revista de La Universidad de Costa Rica*, 24(2), 87–107.
- Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power & Energy Magazine*, 78–94. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1082826>
- IIIE. (2010). Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid). *Instituto de Investigaciones Eléctricas*, 34(3), 92–139.
- INEEL - Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. (2018). *Microrredes eléctricas* (CEMIE-Redes (ed.); p. 15).
- Jiayi, H., Chuanwen, J., & Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2472–2483. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004>
- Lasseter, R. H., & Fellow. (2002). MicroGrids. *IEEE*, 305–308. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>
- Lidula, N. W. A., & Rajapakse, A. D. (2011). Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>
- López Vásquez, J. C. (2016). *Estudio de la situación actual de las Smart Grids*. Universidad de Cantabria.
- Low, K.-S., & Cao, R. (2008). Model Predictive Control of Parallel-Connected Inverters for Uninterruptible Power Supplies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), 2884–2893. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918474>
- Medina Hurtado, S. (2006). Estado de la Cuestión acerca del uso de la Lógica Difusa en Problemas Financieros. *Cuadernos de Administración*, 19, 195–223.
- Mondelo García, R. (2015). *Diseño de un controlador basado en lógica difusa para mejorar el comportamiento dinámico de un vehículo automóvil*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Morales-Luna, G. (2002). Introducción a la lógica difusa. *Centro de Investigación y Estudios*

- Avanzados Del IPN*, 1–12. <http://casanchi.com/mat/intrologicadifusa01.pdf>
- OLADE. (2012). Redes Inteligentes. *Organización Latinoamericana de Energía*, 1–8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/194/2/022014>
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saedifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G. A., & Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1905–1919. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Parra, H., Ríos G., L. H., & Bueno L., M. (2007). Navegación de Robots Móviles mediante comportamientos utilizando Lógica Difusa. *Scientia Et Technica*, 79–84.
- Pascual Miqueleiz, J. M. (2015). *Estrategias Avanzadas De Gestión Energética Basadas En Predicción Para Microrredes Electrotérmicas*. 1–172.
- Peralta Sevilla, A. G., & Amaya Fernández, F. (2013). Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina. *Revista Educación En Ingeniería*, 8(15), 48–61.
- Pérez Fernández, P. (2017). *Descripción e infraestructura de una microrred para un entorno residencial*. Universidad de Valladolid.
- Sanango Fernández, J. B. (2015). *Desarrollo de un algoritmo de interrelación para microrredes de distribución eléctrica*. Universidad de Cuenca.
- Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 8(4), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.016>
- Schallenberg Rodríguez, J. C., Piernavieja Izquierdo, G., Hernández Rodríguez, C., Umamunzaga Falcón, P., García Déniz, R., Díaz Torres, M., Cabrera Pérez, D., Martel Rodríguez, G., Pardilla Fariña, J., & Subiela Ortin, V. (2008). *Energías Renovables y Eficiencia Energética*.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida*. 84. [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL\\_0K.compressed1.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf)

Soria, E. (2009). Hidráulica. *Energías Renovables Para Todos*, 19.

Valenzuela Fuentes, F. (2011). Energía Geotérmica y su Implementación en Chile. *Interamerican Journal of Environment and Tourism*, 7(1), 1–9. <http://riat.utralca.cl/index.php/test/article/viewFile/115/70>

Yazdanián, M., & Mehrizi-Sani, A. (2014). Distributed control techniques in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2901–2909. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2337838>



## ANEXOS.

### ANEXO A

#### Líneas de Código.

Programación lineal realizada en MatLab y el código principal es el siguiente:

%Cargar datos referentes a la generación fotovoltaica y la potencia de carga de las microrredes.

```
load Variablesmayo2013ajulio2014
```

```
load messtr
```

```
load Cctr_u1_o;
```

```
load Ebat_por_m1_o;
```

```
load Ebat_por_m2_o;
```

```
load Pcon_total_u2_o_II;
```

```
load P_FV_II;
```

```
load Pred_m1_o;
```

```
load Pred_m2_o;
```

```
load incPred_m1_o;
```

```
load incPred_m2_o;
```

```
load r1;
```

%% Potencia de Carga - Microrred 2

```
for i=1:29664
```

```
    if Pcon_total_u2_o_II(i)<=2.5 && Pcon_total_u2_o_II(i)>1.5
```

```
        Pcon_total_u2_o_II(i)= 1.9*Pcon_total_u2_o_II(i);
```

```
    end
```

```
end
```

```
Pcon_total_u2_o_II=[0.75*Pcon_total_u2_o_II(1:798);Pcon_total_u2_o_II(799:1570);0.8*Pcon_total_u2_o_II(1571:2281);Pcon_total_u2_o_II(2282:4562);
```

```
1.2*Pcon_total_u2_o_II(4563:6843);1.2*Pcon_total_u2_o_II(6844:9124);1.2*Pcon_total_u2_o_II(9125:11405);
```

```
0.7*Pcon_total_u2_o_II(11406:13686);0.8*Pcon_total_u2_o_II(13687:15967);0.7*Pcon_total_u2_o_II(15968:18248);
```

```
1.1*Pcon_total_u2_o_II(18249:20529);1.1*Pcon_total_u2_o_II(20530:22810);1.2*Pcon_total_u2_o_II(22811:23950);
```

```
0.9*Pcon_total_u2_o_II(23951:25091);0.7*Pcon_total_u2_o_II(25092:27378);0.8*Pcon_total_u2_o_II(27379:29664)];
```

```

for i=1:29664
    if Pcon_total_u2_o_II(i)<=6 && Pcon_total_u2_o_II(i)>5
        Pcon_total_u2_o_II(i)= 0.4*Pcon_total_u2_o_II(i);
    end
    if Pcon_total_u2_o_II(i)<5 && Pcon_total_u2_o_II(i)>4
        Pcon_total_u2_o_II(i)= 0.6*Pcon_total_u2_o_II(i);
    end
    if Pcon_total_u2_o_II(i)<=4 && Pcon_total_u2_o_II(i)>0
        Pcon_total_u2_o_II(i)= 0.55*Pcon_total_u2_o_II(i);
    end
end
end
Pgen_total_u2_o_II=(P_FV_II*0.94);
Plg_u2=(Pcon_total_u2_o_II-Pgen_total_u2_o_II);
Pred_con_u2=0.9235*circshift(Pcon_total_u2_o_II,96)+0.09403;

%% Cálculo de Potencia neta media PAVG
muestras_2=96;
Pavg_2=0*ones(length(Plg_u2),1);
for i=1:length(Plg_u2)
    if i>(muestras_2-1)
        Pavg_2(i)=sum(Plg_u2((i-muestras_2+1):(i)))/muestras_2;
    else
        Pavg_2(i)=sum(Plg_u2(1:i))/i;
    end
    if i>=26508 && i<=26531
        Pavg_2(i)=Pavg_2(i)-0.24;
    end
end
end

%% Cálculo de la derivada de la Potencia neta media
d_Pavg_2=0*ones(length(Plg_u2),1);
for i=2:length(Plg_u2)
    d_Pavg_2(i)=1000*(Pavg_2(i)-Pavg_2(i-1))/900;
end
end

%% Filtro de 3H para la derivada de la Potencia neta media
dPavg_3H_2=0*ones(length(Plg_u2),1);

```

```
muestras_2_2=12;
for i=1:length(Plg_u2)
    if i>(muestras_2_2-1)
        dPavg_3H_2(i)=sum(d_Pavg_2((i-muestras_2_2+1):(i)))/muestras_2_2;
    else
        dPavg_3H_2(i)=sum(d_Pavg_2(1:i))/i;
    end
end
end
```

%% Rangos de acción variables de entrada y salida - Fuzzy Logic.

%% Universo de discurso de la entrada.

```
r_dPavg_max_2=max(dPavg_3H_2);
r_dPavg_min_2=min(dPavg_3H_2);
```

%% Universo de discurso de la salida

```
r_Pgrid_2=1;
```

%% Base de reglas

```
rule_1_2=6;
rule_2_2=6;
rule_3_2=3;
rule_4_2=4;
rule_5_2=1;
rule_6_2=6;
rule_7_2=5;
rule_8_2=4;
rule_9_2=3;
rule_10_2=2;
rule_11_2=7;
rule_12_2=6;
rule_13_2=5;
rule_14_2=4;
rule_15_2=4;
rule_16_2=8;
rule_17_2=6;
```

```
rule_18_2=6;
rule_19_2=8;
rule_20_2=4;
rule_21_2=9;
rule_22_2=8;
rule_23_2=7;
rule_24_2=6;
rule_25_2=4;
```

#### %% Definición de Funciones de Pertenencia

```
Control_var_2=newfis('Barrido');
Control_var_2.input(1).name='dP_a_v_g/dt';
Control_var_2.input(1).range=[r_dPavg_min_2 r_dPavg_max_2];
Control_var_2.input(1).mf(1).name='NB';
Control_var_2.input(1).mf(1).type='trimf';
Control_var_2.input(1).mf(1).params=[r_dPavg_min_2 r_dPavg_min_2 r_dPavg_min_2/2];
Control_var_2.input(1).mf(2).name='NS';
Control_var_2.input(1).mf(2).type='trimf';
Control_var_2.input(1).mf(2).params=[r_dPavg_min_2 r_dPavg_min_2/2 0];
Control_var_2.input(1).mf(3).name='ZE';
Control_var_2.input(1).mf(3).type='trimf';
Control_var_2.input(1).mf(3).params=[r_dPavg_min_2/2 0 r_dPavg_max_2/2];
Control_var_2.input(1).mf(4).name='PS';
Control_var_2.input(1).mf(4).type='trimf';
Control_var_2.input(1).mf(4).params=[0 r_dPavg_max_2/2 r_dPavg_max_2];
Control_var_2.input(1).mf(5).name='PB';
Control_var_2.input(1).mf(5).type='trimf';
Control_var_2.input(1).mf(5).params=[r_dPavg_max_2/2 r_dPavg_max_2 r_dPavg_max_2];
Control_var_2.input(2).name='SOC';
Control_var_2.input(2).range=[0 Cbat_max_u2];
Control_var_2.input(2).mf(1).name='NB';
Control_var_2.input(2).mf(1).type='trimf';
Control_var_2.input(2).mf(1).params=[0 0 Cbat_max_u2/4];
Control_var_2.input(2).mf(2).name='NS';
Control_var_2.input(2).mf(2).type='trimf';
Control_var_2.input(2).mf(2).params=[(1/14)*Cbat_max_u2 Cbat_max_u2/4 Cbat_max_u2/2];
```

```

Control_var_2.input(2).mf(3).name='ZE';
Control_var_2.input(2).mf(3).type='trimf';
Control_var_2.input(2).mf(3).params=[(1/14)*Cbat_max_u2          Cbat_max_u2/2
(13/14)*Cbat_max_u2];
Control_var_2.input(2).mf(4).name='PS';
Control_var_2.input(2).mf(4).type='trimf';
Control_var_2.input(2).mf(4).params=[Cbat_max_u2/2          (3/4)*Cbat_max_u2
(13/14)*Cbat_max_u2];
Control_var_2.input(2).mf(5).name='PB';
Control_var_2.input(2).mf(5).type='trimf';
Control_var_2.input(2).mf(5).params=[(3/4)*Cbat_max_u2 Cbat_max_u2 Cbat_max_u2];
Control_var_2.output(1).name='P_g_r_i_d';
Control_var_2.output(1).range=[-r_Pgrid_2 r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(1).name='NB';
Control_var_2.output(1).mf(1).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(1).params=[-r_Pgrid_2 -r_Pgrid_2 -(3/4)*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(2).name='NM';
Control_var_2.output(1).mf(2).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(2).params=[-r_Pgrid_2 -(3/4)*r_Pgrid_2 -(1/2)*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(3).name='NS';
Control_var_2.output(1).mf(3).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(3).params=[-(3/4)*r_Pgrid_2 -(1/2)*r_Pgrid_2 -(1/2)*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(4).name='NSS';
Control_var_2.output(1).mf(4).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(4).params=[-(1/2)*r_Pgrid_2 -(1/8)*r_Pgrid_2 0];
Control_var_2.output(1).mf(5).name='ZE';
Control_var_2.output(1).mf(5).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(5).params=[-(1/2)*r_Pgrid_2 0 (1/2)*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(6).name='PSS';
Control_var_2.output(1).mf(6).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(6).params=[0 0.125*r_Pgrid_2 0.5*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(7).name='PS';
Control_var_2.output(1).mf(7).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(7).params=[0.5*r_Pgrid_2 0.5*r_Pgrid_2 0.75*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(8).name='PM';
Control_var_2.output(1).mf(8).type='trimf';

```

```
Control_var_2.output(1).mf(8).params=[0.5*r_Pgrid_2 0.75*r_Pgrid_2 1*r_Pgrid_2];
Control_var_2.output(1).mf(9).name='PB';
Control_var_2.output(1).mf(9).type='trimf';
Control_var_2.output(1).mf(9).params=[0.75*r_Pgrid_2 1*r_Pgrid_2 1*r_Pgrid_2];
```

%% Asignación de reglas

```
Control_var_2.rule(1).antecedent=[1 1];
Control_var_2.rule(1).consequent=[rule_1_2];
Control_var_2.rule(1).weight=1;
Control_var_2.rule(1).connection=1;
Control_var_2.rule(2).antecedent=[1 2];
Control_var_2.rule(2).consequent=[rule_2_2];
Control_var_2.rule(2).weight=1;
Control_var_2.rule(2).connection=1;
Control_var_2.rule(3).antecedent=[1 3];
Control_var_2.rule(3).consequent=[rule_3_2];
Control_var_2.rule(3).weight=1;
Control_var_2.rule(3).connection=1;
Control_var_2.rule(4).antecedent=[1 4];
Control_var_2.rule(4).consequent=[rule_4_2];
Control_var_2.rule(4).weight=1;
Control_var_2.rule(4).connection=1;
Control_var_2.rule(5).antecedent=[1 5];
Control_var_2.rule(5).consequent=[rule_5_2];
Control_var_2.rule(5).weight=1;
Control_var_2.rule(5).connection=1;
Control_var_2.rule(6).antecedent=[2 1];
Control_var_2.rule(6).consequent=[rule_6_2];
Control_var_2.rule(6).weight=1;
Control_var_2.rule(6).connection=1;
Control_var_2.rule(7).antecedent=[2 2];
Control_var_2.rule(7).consequent=[rule_7_2];
Control_var_2.rule(7).weight=1;
Control_var_2.rule(7).connection=1;
Control_var_2.rule(8).antecedent=[2 3];
Control_var_2.rule(8).consequent=[rule_8_2];
```

Control\_var\_2.rule(8).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(8).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(9).antecedent=[2 4];  
Control\_var\_2.rule(9).consequent=[rule\_9\_2];  
Control\_var\_2.rule(9).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(9).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(10).antecedent=[2 5];  
Control\_var\_2.rule(10).consequent=[rule\_10\_2];  
Control\_var\_2.rule(10).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(10).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(11).antecedent=[3 1];  
Control\_var\_2.rule(11).consequent=[rule\_11\_2];  
Control\_var\_2.rule(11).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(11).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(12).antecedent=[3 2];  
Control\_var\_2.rule(12).consequent=[rule\_12\_2];  
Control\_var\_2.rule(12).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(12).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(13).antecedent=[3 3];  
Control\_var\_2.rule(13).consequent=[rule\_13\_2];  
Control\_var\_2.rule(13).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(13).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(14).antecedent=[3 4];  
Control\_var\_2.rule(14).consequent=[rule\_14\_2];  
Control\_var\_2.rule(14).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(14).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(15).antecedent=[3 5];  
Control\_var\_2.rule(15).consequent=[rule\_15\_2];  
Control\_var\_2.rule(15).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(15).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(16).antecedent=[4 1];  
Control\_var\_2.rule(16).consequent=[rule\_16\_2];  
Control\_var\_2.rule(16).weight=1;  
Control\_var\_2.rule(16).connection=1;  
Control\_var\_2.rule(17).antecedent=[4 2];  
Control\_var\_2.rule(17).consequent=[rule\_17\_2];

```
Control_var_2.rule(17).weight=1;
Control_var_2.rule(17).connection=1;
Control_var_2.rule(18).antecedent=[4 3];
Control_var_2.rule(18).consequent=[rule_18_2];
Control_var_2.rule(18).weight=1;
Control_var_2.rule(18).connection=1;
Control_var_2.rule(19).antecedent=[4 4];
Control_var_2.rule(19).consequent=[rule_19_2];
Control_var_2.rule(19).weight=1;
Control_var_2.rule(19).connection=1;
Control_var_2.rule(20).antecedent=[4 5];
Control_var_2.rule(20).consequent=[rule_20_2];
Control_var_2.rule(20).weight=1;
Control_var_2.rule(20).connection=1;
Control_var_2.rule(21).antecedent=[5 1];
Control_var_2.rule(21).consequent=[rule_21_2];
Control_var_2.rule(21).weight=1;
Control_var_2.rule(21).connection=1;
Control_var_2.rule(22).antecedent=[5 2];
Control_var_2.rule(22).consequent=[rule_22_2];
Control_var_2.rule(22).weight=1;
Control_var_2.rule(22).connection=1;
Control_var_2.rule(23).antecedent=[5 3];
Control_var_2.rule(23).consequent=[rule_23_2];
Control_var_2.rule(23).weight=1;
Control_var_2.rule(23).connection=1;
Control_var_2.rule(24).antecedent=[5 4];
Control_var_2.rule(24).consequent=[rule_24_2];
Control_var_2.rule(24).weight=1;
Control_var_2.rule(24).connection=1;
Control_var_2.rule(25).antecedent=[5 5];
Control_var_2.rule(25).consequent=[rule_25_2];
Control_var_2.rule(25).weight=1;
Control_var_2.rule(25).connection=1;
writefis(Control_var_2,'Control_var_2');
```



%% Controlador Fuzzy intercambio de potencia entre las microrredes

Vbat=240;

SOCmin=0.4;

Pe\_u2=6;

%% Reglas Pgrids

rule\_1\_x=4;

rule\_2\_x=5;

rule\_3\_x=4;

rule\_4\_x=5;

rule\_5\_x=3;

rule\_6\_x=4;

rule\_7\_x=4;

rule\_8\_x=5;

rule\_9\_x=3;

rule\_10\_x=3;

rule\_11\_x=3;

rule\_12\_x=5;

rule\_13\_x=3;

rule\_14\_x=3;

rule\_15\_x=3;

rule\_16\_x=3;

%% Definición de Funciones de Pertenencia

Pgrid\_u1\_max=1.9;

Pgrid\_u1\_min=-1.75;

Pgrid\_u2\_max=1.7;

Pgrid\_u2\_min=-1.8;

Control\_intercambio\_GRIDS=newfis('Exchange');

%% Entradas Controlador

Control\_intercambio\_GRIDS.input(1).name='PGrid\_u1';

Control\_intercambio\_GRIDS.input(1).range=[Pgrid\_u1\_min Pgrid\_u1\_max];

Control\_intercambio\_GRIDS.input(1).mf(1).name='NB';

Control\_intercambio\_GRIDS.input(1).mf(1).type='trimf';

```

Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(1).params=[Pgrid_u1_min-0.1 (5/8)*Pgrid_u1_min
(1/4)*Pgrid_u1_min];
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(2).name='NS';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(2).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(2).params=[(3/4)*Pgrid_u1_min (3/8)*Pgrid_u1_min
0];
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(3).name='PS';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(3).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(3).params=[0 (3/8)*Pgrid_u1_max
(3/4)*Pgrid_u1_max];
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(4).name='PB';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(4).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(1).mf(4).params=[(1/4)*Pgrid_u1_max
(5/8)*Pgrid_u1_max Pgrid_u1_max+0.1];
Control_intercambio_GRIDS.input(2).name='PGrid_u2';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).range=[Pgrid_u2_min Pgrid_u2_max];
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(1).name='NB';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(1).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(1).params=[Pgrid_u2_min-0.1 (5/8)*Pgrid_u2_min
(1/4)*Pgrid_u2_min];
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(2).name='NS';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(2).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(2).params=[(3/4)*Pgrid_u2_min (3/8)*Pgrid_u2_min
0];
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(3).name='PS';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(3).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(3).params=[0 (3/8)*Pgrid_u2_max
(3/4)*Pgrid_u2_max];
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(4).name='PB';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(4).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.input(2).mf(4).params=[(1/4)*Pgrid_u2_max
(5/8)*Pgrid_u2_max Pgrid_u2_max+0.1];

```

%% Salidas Controlador

```
Pig1_n=-0.3;
```

```
Pig2_p=0.3;
```

```

Control_intercambio_GRIDS.output(1).name='Pxi';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).range=[Pig1_n Pig2_p];
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(1).name='NB';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(1).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(1).params=[Pig1_n (5/8)*Pig1_n (1/4)*Pig1_n];
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(2).name='NS';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(2).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(2).params=[(3/4)*Pig1_n (3/8)*Pig1_n 0];
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(3).name='ZE';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(3).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(3).params=[0 0 0];
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(4).name='PS';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(4).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(4).params=[0 (3/8)*Pig2_p (3/4)*Pig2_p];
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(5).name='PB';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(5).type='trimf';
Control_intercambio_GRIDS.output(1).mf(5).params=[(1/4)*Pig2_p (5/8)*Pig2_p Pig2_p];

```

%% Asignación de reglas Potencia de red.

```

Control_intercambio_GRIDS.rule(1).antecedent=[1 1];
Control_intercambio_GRIDS.rule(1).consequent=[rule_1_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(1).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(1).connection=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(2).antecedent=[1 2];
Control_intercambio_GRIDS.rule(2).consequent=[rule_2_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(2).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(2).connection=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(3).antecedent=[1 3];
Control_intercambio_GRIDS.rule(3).consequent=[rule_3_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(3).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(3).connection=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(4).antecedent=[1 4];
Control_intercambio_GRIDS.rule(4).consequent=[rule_4_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(4).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(4).connection=1;

```

Control\_intercambio\_GRIDS.rule(5).antecedent=[2 1];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(5).consequent=[rule\_5\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(5).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(5).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(6).antecedent=[2 2];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(6).consequent=[rule\_6\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(6).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(6).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(7).antecedent=[2 3];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(7).consequent=[rule\_7\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(7).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(7).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(8).antecedent=[2 4];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(8).consequent=[rule\_8\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(8).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(8).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(9).antecedent=[3 1];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(9).consequent=[rule\_9\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(9).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(9).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(10).antecedent=[3 2];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(10).consequent=[rule\_10\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(10).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(10).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(11).antecedent=[3 3];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(11).consequent=[rule\_11\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(11).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(11).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(12).antecedent=[3 4];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(12).consequent=[rule\_12\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(12).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(12).connection=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(13).antecedent=[4 1];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(13).consequent=[rule\_13\_x];  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(13).weight=1;  
Control\_intercambio\_GRIDS.rule(13).connection=1;

```

Control_intercambio_GRIDS.rule(14).antecedent=[4 2];
Control_intercambio_GRIDS.rule(14).consequent=[rule_14_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(14).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(14).connection=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(15).antecedent=[4 3];
Control_intercambio_GRIDS.rule(15).consequent=[rule_15_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(15).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(15).connection=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(16).antecedent=[4 4];
Control_intercambio_GRIDS.rule(16).consequent=[rule_16_x];
Control_intercambio_GRIDS.rule(16).weight=1;
Control_intercambio_GRIDS.rule(16).connection=1;
writefis(Control_intercambio_GRIDS,'Control_intercambio_GRIDS');

```

%% Estrategia energética Microrred 1 - Aplicación controlador fuzzy

```

Pred_fuz(1)=a*evalfis([dPavg_3H(1) Ebat(1)], Control_var);
Pred_x(1)=Pavg(1)+Pred_fuz(1)+Pp(1)+P24(1);
Pred_x(1)= Pred_micro1_o(1);

```

%% Estrategia energética Microrred 2 - Aplicación controlador fuzzy

```

Pred_fuz_u2(1)=a_u2*evalfis([dPavg_3H_2(1) Ebat_u2(1)], Control_var_2);
Pred_u2_x(1)=Pavg_2(1)+Pred_fuz_u2(1)+Pp_u2(1)+P24_u2(1);
Pred_u2_x(1)=Pred_micro2_o(1);

```

%% Cantidad de potencia a intercambiar

```

Pxi(1)=evalfis([Pred_x(1) Pred_u2_x(1)], Control_intercambio_GRIDS);

```

%% Potencia de red y Potencia de la batería después de compartir potencia entre las microrredes.

```

Pred(1)=Pred_x(1)+Pxi(1);
Pred_u2(1)=Pred_u2_x(1)-Pxi(1);
Pbat1(1)=Plg(1)-Pred(1);
Pbat2(1)=Plg_u2(1)-Pred_u2(1);

```

**for i=2:length(Plg)**

%% Estrategia energética Microrred 1 - Aplicación controlador fuzzy

Pred\_fuz(i)=a\*evalfis([dPavg\_3H(i) Ebat(i)], Control\_var);

Pred\_x(i)=Pavg(i)+Pred\_fuz(i)+Pp(i)+P24(i);

Pred\_x(i)= Pred\_micro1\_o(i);

%% Estrategia energética Microrred 1 - Aplicación controlador fuzzy

Pred\_fuz\_u2(i)=a\_u2\*evalfis([dPavg\_3H\_2(i) Ebat\_u2(i)], Control\_var\_2);

Pred\_u2\_x(i)=Pavg\_2(i)+Pred\_fuz\_u2(i)+Pp\_u2(i)+P24\_u2(i);

Pred\_u2\_x(i)=Pred\_micro2\_o(i);

%% Cantidad de potencia a intercambiar

Pxi(i)=evalfis([Pred\_x(i) Pred\_u2\_x(i)], Control\_intercambio\_GRIDS);

%% Potencia de red y Potencia de la batería después de compartir potencia entre las microrredes.

Pred(i)=Pred\_x(i)+Pxi(i);

Pred\_u2(i)=Pred\_u2\_x(i)-Pxi(i);

Pbat1(i)=Plg(i)-Pred(i);

Pbat2(i)=Plg\_u2(i)-Pred\_u2(i);

Pbat1 = Pbat1';

Pbat2 = Pbat2';

**end**

%% Criterios de Calidad: Microrred 1

Pred\_max=max(Pred(inicio:fin));

Pred\_min=min(Pred(inicio:fin));

BDR=max(Ebat(inicio:fin))-min(Ebat(inicio:fin));

MPD=max(incPred);

APD=mean(incPred);

PVR=(max(Pred)-min(Pred))/(max(Plg)-min(Plg));

[spec,freq,PPV,num\_PPV,den\_PPV]=fourier4(Pred,900);

PPV\_1=PPV;

RESULTADOS(cont,:)= [Pred\_max Pred\_min MPD APD PPV]

%% Criterios de Calidad: Microrred 2

Pred\_max\_u2=max(Pred\_u2(inicio\_u2:fin\_u2));

Pred\_min\_u2=min(Pred\_u2(inicio\_u2:fin\_u2));

BDR\_u2=max(Ebat\_u2(inicio\_u2:fin\_u2))-min(Ebat\_u2(inicio\_u2:fin\_u2));

MPD\_u2=max(incPred\_u2);

APD\_u2=mean(incPred\_u2);

PVR\_u2=(max(Pred\_u2)-min(Pred\_u2))/(max(Plg\_u2)-min(Plg\_u2));

[spec\_u2,freq\_u2,PPV\_u2,num\_PPV\_u2,den\_PPV\_u2]=fourier4(Pred\_u2\_x,900);

PPV\_1\_u2=PPV\_u2;

RESULTADOS\_u2(cont\_u2,:)= [Pred\_max\_u2 Pred\_min\_u2 MPD\_u2 APD\_u2 PPV\_u2]