



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIEROS EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL

TEMA: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN
ENERGÉTICA PARA MICRORREDES ELÉCTRICAS
INTERCONECTADAS.

AUTORES: BERMEO RAMÓN, MICHAEL ALONSO
BRAVO QUINGA, BRYAN DARWIN

DIRECTOR: DR. ARCOS AVILÉS, DIEGO GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA MICRORREDES ELÉCTRICAS INTERCONECTADAS**” fue realizado por los señores **Bermeo Ramón, Michael Alonso y Bravo Quinga, Bryan Darwin**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de Junio de 2019

Firma:

.....
Dr. Diego Arcos Avilés

C.C: 1710879444



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Bermeo Ramón, Michael Alonso y Bravo Quinga, Bryan Darwin** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA MICRORREDES ELÉCTRICAS INTERCONECTADAS** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 12 de Junio de 2019

Firma:

Sr. Bryan Darwin Bravo Quinga

C.C:1724158934

Sr. Michael Alonso Bermeo Ramón

C.C: 1718080474



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Bravo Quinga, Bryan Darwin y Bermeo Ramón, Michael Alonso** autorizamos a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA PARA MICRORREDES ELÉCTRICAS** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 12 de Junio de 2019

Firma:

Sr. Bryan Darwin Bravo Quinga

C.C:1724158934

Sr. Michael Alonso Bermeo Ramón

C.C: 1718080474

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a Dios, por haberme dado la fuerza y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser el pilar más importante de mi vida y por el infinito amor y apoyo incondicional que me ha demostrado siempre. A mi padre, por sus sabias palabras y el empuje que me ha sabido dar, en los momentos más difíciles que me ha tocado vivir. Ambos me han ayudado a convertirme en la persona que soy ahora y sin ustedes no habría podido llegar hasta aquí.

Finalmente quiero agradecer a todos mis amigos, por apoyarme cuando más los necesité, por extenderme su mano en los momentos difíciles y por las buenas experiencias brindadas.

Michael Alonso Bermeo Ramón

El presente trabajo de investigación lo dedico a mi madre, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ella he logrado llegar hasta aquí y convertirme en la persona que soy.

A mis hermanas por estar siempre presentes, acompañándome y apoyándome a lo largo de mi etapa estudiantil.

A todos mis amigos y personas que me han apoyado y han hecho que el presente trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Bryan Darwin Bravo Quinga

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades hayan surgido en el transcurso de mi etapa estudiantil.

Agradezco a mi tutor de tesis, quien con su experiencia y conocimiento me orientó en la elaboración del presente trabajo de investigación.

A todos los docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Michael Alonso Bermeo Ramón

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mi director de tesis, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de investigación y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

Bryan Darwin Bravo Quinga

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e Importancia.....	3
1.3 Alcance del Proyecto.....	6
1.4 Objetivos	9
1.4.1 Objetivo General	9
1.4.2 Objetivos Específicos.....	9

CAPÍTULO II.....	10
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Definición de microrred	10
2.2 Arquitectura de la microrred	11
2.2.1 Generación Distribuida	12
2.2.2 Sistema de interconexión	15
2.3 Caracterización de las fuentes renovables.....	17
2.3.1 Solar Fotovoltaica	17
2.3.2 Eólica.....	17
2.4 Balance de potencia y energía.....	18
2.4.1 Balance de potencia en el nodo eléctrico	19
2.5. Control por lógica difusa (FLC).....	20
2.5.1 Definiciones básicas.....	20
2.5.2 Inferencia Difusa	23
CAPÍTULO III	26
3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA.....	26
3.1 Estado del arte	26
3.2 Objetivos y evaluación de las estrategias	30
3.3 Predicción de la generación de fuentes renovables	32

3.3.1 Predicción de la generación fotovoltaica	33
3.3.2 Predicción de la generación eólica	35
CAPÍTULO IV	37
4. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA ENERGÉTICA.	37
4.1 Introducción	37
4.2 Descripción de los sistemas.....	37
4.2.1 Microrred 1.....	37
4.2.2 Microrred 2.....	40
4.3 Diseño del EMS basado en controlador FLC.....	42
4.3.1 Política de Control.....	42
4.3.2 Diagrama de bloques de control.....	45
4.3.3 Diseño del controlador FLC.....	54
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	66
5.1 Introducción	66
5.2 Pruebas y Resultados.....	66
CAPÍTULO VI	89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.1 Trabajos Futuros.....	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Definición de los cuatro métodos de inferencia más populares</i>	25
Tabla 2 <i>Índices de calidad MG original</i>	32
Tabla 3 <i>Índices de calidad para la MG1</i>	40
Tabla 4 <i>Índices de calidad para la MG2</i>	42
Tabla 5 <i>Valores máximo y mínimo del perfil de red de cada microrred</i>	55
Tabla 6 <i>Valores máximo y mínimo de la P_{CTR} y SOC de la microrredes</i>	55
Tabla 7 <i>Número de funciones de pertenencia del controlador FLC</i>	58
Tabla 8 <i>Base de reglas para el controlador FLC para el intercambio de energía.</i>	59
Tabla 9 <i>Ejemplo de control de acuerdo a la base de reglas de FLC</i>	62
Tabla 10 <i>Valores alcanzados por los antecedentes del FLC en $P_{GRID2, MIN}$.</i>	64
Tabla 11 <i>Ajuste de la base de reglas correspondiente al FLC de la EMS propuesta</i>	65
Tabla 12 <i>Comparación de los índices de calidad de EMS-FC vs EMS-EXG.</i>	72
Tabla 13 <i>Beneficio de potencia alcanzada por las MGs a partir de sus perfiles de red.</i>	73
Tabla 14 <i>Comparación de los índices de calidad de la estrategia EMS-FC vs EMS-EXG.</i>	79
Tabla 15 <i>Beneficio de potencia total alcanzada por las MGs del EMS-EXG propuesto.</i>	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Arquitectura para dos microrredes eléctricas interconectada basado en EMS-EXG...	8
Figura 2 Esquema general de una microrred	12
Figura 3 Sistemas de Generación Distribuida	13
Figura 4 Tecnologías de Generación Distribuida	14
Figura 5 Características y aplicaciones de los diferentes sistemas de almacenamiento	16
Figura 6 Potencias de la microrred en estudio	19
Figura 7 Variables de la lógica difusa	21
Figura 8 Funciones de pertenencias típicas para FLC.....	22
Figura 9 Operaciones básicas difusas.....	23
Figura 10 Sistema de inferencia difusa	23
Figura 11 Diagrama de bloques del EMS propuesto basado en la predicción	27
Figura 12 Topología del sistema PV con HES	29
Figura 13 Estrategia de intercambio de energía entre el SOC y las baterías.....	30
Figura 14 Esquema del proceso de predicción de la potencia fotovoltaica generada	34
Figura 15 Proceso de predicción de la potencia generada.....	36
Figura 16 Perfil de potencia generada por el sistema de MG1: (a) Fotovoltaico, (b) Eólico...38	
Figura 17 Perfil de potencia de la carga residencial para MG1.	39
Figura 18 Perfiles de potencia de MG1: (a) SOC de la batería, (b) perfil de potencia de red..39	
Figura 19 Perfil de potencia generada por el sistema de MG2: (a) Fotovoltaico, (b) Eólico...41	
Figura 20 Perfil de potencia de la carga residencial para MG2.	41
Figura 21 Perfiles de potencia de MG2: (a) SOC de la batería, (b) perfil de potencia de red..42	
Figura 22 Diagrama de bloques del EMS-EXG de intercambio de potencia propuesto.	47

Figura 23 Diagrama de flujo del EMS-EXG de intercambio de potencia entre perfiles.....	52
Figura 24 Diagrama de flujo del EMS-EXG de intercambio de potencia entre baterías.	53
Figura 25 Funciones de pertenencia de las entradas del controlador.	57
Figura 26 Funciones de pertenencia de la salida del controlador (P_{XC}).....	58
Figura 27 Perfil de potencia de intercambio con la red obtenida con el EMS-EXG.....	64
Figura 28 Potencia intercambiada por los perfiles de red.	67
Figura 29 Comparación del perfil de potencia de red de MG1, con el intercambio.	67
Figura 30 Comparación del perfil de potencia de red de MG2, con el intercambio.	68
Figura 31 Comparación del SOC_{AVG} MG1, al intercambiar potencia entre perfiles de red.	69
Figura 32 Comparación del SOC_{AVG} MG2, al intercambiar potencia entre perfiles de red.	70
Figura 33 Comparación del MPD máxima entre las MGs, con el EMS-EXG.....	71
Figura 34 Potencia intercambiada por el P_{RED} , SOC de las baterías y la P_{CTR} de las MGs.....	74
Figura 35 Comparación del perfil de potencia de red de MG1, con el intercambio.	75
Figura 36 Comparación del perfil de potencia de red de MG2, con el intercambio.	75
Figura 37 Comparación del SOC_{AVG} de MG1, al aplicar la estrategia EMS-EXG.	76
Figura 38 Comparación del SOC_{AVG} de MG1, al aplicar la estrategia EMS-EXG.	77
Figura 39 Comparación del MPD máxima entre las MGs, con el EMS-EXG.....	78
Figura 40 Comparación del perfil de potencia original y después del EMS-EXG.	81
Figura 41 Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto A.	82
Figura 42 Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto B.	83
Figura 43 Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto C.	85
Figura 44 Comparación del SOC y la P_{CTR} original vs EMS-EXG en el punto C.	86
Figura 45 Comparación del perfil de red original, después del EMS-EXG del punto D.	87

Figura 46 Comparación del SOC y la P_{CTR} original vs EMS-EXG en el punto D.....	88
--	----

RESUMEN

En los últimos años el desarrollo de fuentes de generación de energía eléctrica renovable se ha convertido en una prioridad a escala mundial, esto debido al incremento de gases de efecto invernadero producido por el uso de combustibles fósiles lo que ha provocado el cambio climático. Por lo mencionado las microrredes (MG) se han convertido en una alternativa para la generación eléctrica sustentable ya que integran sistemas de generación distribuida (DG), sistemas de almacenamiento de energía (ESS) y sistemas de gestión energética (EMS); lo que promueve el ahorro de energía, reducción de costos de operación, fiabilidad e independencia energética. Por este motivo el presente trabajo muestra el diseño y simulación de un EMS basado en un controlador de lógica difusa (FLC) que permita el intercambio de energía eléctrica entre microrredes residenciales interconectadas. El principal objetivo del diseño es mejorar el perfil de potencia intercambiada con la red eléctrica y optimizar los índices de calidad para cada MG, al trabajar de forma conjunta. Para ello, la estrategia de gestión energética propuesta analiza tres componentes de cada microrred: el perfil de potencia intercambiada con la red eléctrica, el estado de carga de la batería (SOC) y la potencia neta promedio para conocer el comportamiento futuro de la microrred.

PALABRAS CLAVE:

- **CONTROL FUZZY**
- **INTERCAMBIO DE ENERGÍA**
- **PERFIL DE POTENCIA**
- **MICRORRED**

ABSTRACT

In recent years, the development of renewable sources related to electric power generation has become a priority on a global scale, this due to the increase of greenhouse gases produced by the combustion of fossil fuels, which is one of the main reasons of the climate change. For this reason, microgrids (MG) have become an alternative solution for sustainable electric generation since they integrate Distributed Generation (DG) systems, Energy Storage Systems (ESS), and Energy Management System (EMS), which promotes the energy saving, operating cost reduction, reliability, and energy independence from the grid. In this regard, this work presents the design and simulation of an EMS based on a Fuzzy Logic Control (FLC) for sharing power between residential microgrids. The main objective of this work is smoothing the power profile exchange with the grid of each MG while improving their quality criteria when working together. To achieve this goal, the proposed EMS analyzes three variables of each microgrid: the grid power profile, the battery State-of-Charge (SOC) and the MG net power average to anticipate the future MG behavior.

KEYWORDS:

- **FUZZY CONTROL**
- **POWER SHARING**
- **POWER PROFILE**
- **MICROGRID**

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La generación de energía eléctrica se ha convertido en una de las prioridades en el desarrollo de los países a nivel mundial, esto debido al crecimiento del consumo energético y con ello la dificultad de satisfacer la demanda. Es así, que se han buscado fuentes alternas de generación eléctrica que se enfocan en aprovechar las fuentes de energía renovable (Renewable Energy Sources, RES), de esta manera se busca reducir la dependencia de combustibles fósiles que han provocado cambios ambientales a nivel mundial (Guamán, 2016).

Por un lado, el principal efecto del incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Greenhouse Gas, GHG) es el aumento de la temperatura terrestre y junto con ello, lo que se denomina como calentamiento global, para intentar reducir estos efectos negativos se propone el uso de energías alternativas o renovables que permitan cubrir parte de la demanda energética requerida y de esta manera disminuir la emisión de GHG (Quintia Medioambiente, 2017). Las dos RES con mayor crecimiento en los últimos años son la solar fotovoltaica (Photovoltaic, PV) y la eólica, principalmente dentro del marco urbano. Este tipo de energías se obtienen a partir de fuentes naturales y son virtualmente inagotables, además produce una baja contaminación ambiental (Erenovable, 2015), (Dr. Figueredo, 2016).

En este sentido, las microrredes (Microgrid, MG) son consideradas como los pilares de las redes inteligentes y han despertado gran atención en la última década debido a la inclusión de las RES y el impacto que pueden tener en el futuro próximo. Se entiende como MG, "al conjunto de elementos de generación distribuida (Distributed Generation, DG), sistemas de almacenamiento de energía

(Energy Storage System, ESS) y cargas, que constan de un sistema de gestión energética (Energy Management System, EMS) y que están conectadas a la red eléctrica en un punto común denominado PCC (Point of Common Coupling)” (Diego Arcos-Aviles, Pascual, Marroyo, Sanchis, & Guinjoan, 2016).

Las microrredes pueden trabajar en dos modos de operación aisladas (i.e., stand-alone o islanded) y conectadas a la red eléctrica (i.e., grid-connected), para el primer caso los generadores deben responder de manera eficiente a los cambios de consumo, aquí el EMS mantiene un suministro energético estable para cubrir la demanda de energía de la carga (Bernadó, Enrique Alcor, Miguel Asensio, 2014), sin embargo no son capaces de asumir desequilibrios entre la generación y consumo de energía. De este modo es necesario un ESS que permita absorber las fluctuaciones de los recursos renovables y las cargas, además de almacenar la energía para ser utilizada a futuro cuando no exista disponibilidad de las RES (sol y viento) (Centro Nacional de Energías Renovables, 2018). La microrred al trabajar de manera conjunta con la red eléctrica, se asegura la fiabilidad de la fuente de alimentación y logra minimizar el perfil de red por medio de estrategias de gestión energética. Por otro lado, al considerar la naturaleza estocástica de las fuentes renovables y de la energía consumida por la carga, la inclusión de un ESS es altamente recomendable con el fin de mejorar el rendimiento y estabilidad del sistema (Diego Arcos-Aviles et al., 2016).

En este sentido, en (Diego Arcos-Aviles et al., 2016) se propone un EMS basado en un controlador de lógica difusa (Fuzzy Logic Control, FLC) para una microrred residencial conformada por fuentes de energía renovable y un ESS, el resultado del estudio fue la reducción de las fluctuaciones del perfil de potencia de la red y la conservación del estado de carga (State of

Charge, *SOC*) de la batería en límites seguros. Además, como extensión al trabajo mencionado, en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017) se incluye el pronóstico de la generación y demanda de energía para predecir el comportamiento de la microrred, de esta forma se hace correcciones en la potencia intercambiada con la red eléctrica a través del error de predicción de potencia y el *SOC* de la batería, de esta manera se mejora las fluctuaciones del perfil de potencia intercambiado con la red.

Por último, en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017) se realiza la validación experimental de la estrategia mencionada en (D. Arcos-Aviles et al., 2016) y se confirma la solidez y efectividad de la gestión energética propuesta (Energy Management System Forecasting - EMS-FC), la cual se tomará como referencia para la presente investigación.

Las estrategias presentadas en (Diego Arcos-Aviles et al., 2016) y (Diego Arcos-Aviles et al., 2017) fueron validadas en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Pública de Navarra (UPNa), que cuenta con una microrred eléctrica plenamente operativa y sobre la cual se trabaja en diversos proyectos experimentales para el estudio del comportamiento de una microrred en entornos urbanos y Smart Cities (Universidad Publica de Navarra, 2015).

1.2 Justificación e Importancia.

La demanda energética a nivel mundial cada vez tiene un mayor aumento, por lo que los recursos energéticos más comunes como: petróleo, gas natural y carbón son cada vez más escasos (L. Berrío y C. Zuluaga, 2014). Es por ello que en el contexto actual y futuro se ha procurado la entrada masiva de fuentes de energía renovable, que permita desarrollar a nivel mundial proyectos de energía renovable conectados a la red, que son de gran escala y permiten satisfacer las necesidades de clientes comerciales, industriales y de servicios públicos. Dentro de las principales fuentes de

generación energética están los sectores eólicos (en tierra y mar) y de energía solar, las cuales se centran cada vez más en la transición a una economía de bajo consumo de combustibles fósiles, para lo cual se requiere el desarrollo de conocimientos y estrategias sobre transmisión, almacenamiento de energía y gestión de la demanda (Demand Side Management – DSM) (Heating, Associations, & Conditioning, 2015).

La implementación de una MG favorece la integración de las RES y permite mejorar la calidad del suministro, reducir la dependencia de la red de distribución y el consumo promedio de kW/h, mediante estrategias de gestión energética que pretenden suavizar el perfil de potencia intercambiado con la red, para eliminar posibles picos y fluctuaciones de consumo y generación, además de satisfacer en cualquier momento la demanda energética de las cargas (A. E. Fernández, 2009) (Diego Arcos-Aviles et al., 2016).

En este sentido, en el Ecuador existen dos tipos de centrales para la producción de energía eléctrica: los que aprovechan los recursos renovables, y aquellos que emplean recursos no renovables. La producción de energía ha evolucionado en el país durante la última década, y se ha enfocado en la disminución de la contaminación ambiental mediante la aplicación de políticas de gobierno enmarcadas en el concepto de seguridad y soberanía energética, que promueve la producción de energía con recursos naturales propios. Esto ha permitido disminuir la importación de diésel y ha impulsado un desarrollo sostenible en el país (Renovable, 2016).

Debido al aumento del consumo energético a nivel mundial, muchos gobiernos han desarrollado diversas estrategias para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, por lo que han

desarrollado regulaciones y políticas para incentivar la conciencia social respecto al efecto que producen los gases de efecto invernadero (Hernández, 2011), (Agency, 2015).

En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas, se establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros (Naciones Unidas/CEPAL, 2016), mediante la creación de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), dicha agenda menciona en su Objetivo 7 *“Garantizar el acceso de todas las personas a fuentes de energía asequibles, confiables, sostenibles y renovables”*. En su meta 7. 3. a. *“De aquí a 2030, aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia, incluidas las fuentes renovables, la eficiencia energética y las tecnologías avanzadas y menos contaminantes de combustibles fósiles”, “De aquí a 2030, promover la inversión en infraestructura energética y tecnologías limpias en particular los países menos adelantados”*.

En el Ecuador sucede algo similar con el “Plan Nacional de Desarrollo, Toda una Vida” (Senplades, 2017) en el eje 2: *“Economía al Servicio de la Sociedad”*. En su Objetivo 5 que trata sobre *“Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria”*, menciona como una de sus metas *“Incrementar de 68,8% al 90% la generación eléctrica a través de fuentes de energías renovables a 2021.”*, además de *“Incrementar el ahorro de combustible por la optimización en generación eléctrica y eficiencia energética en el sector hidrocarburos”*.

Por lo antes mencionado, el presente trabajo de investigación busca dar una alternativa eficiente en la generación y sostenibilidad energética mediante el uso de microrredes eléctricas, lo cual

contribuye a los objetivos enmarcados en el Plan Nacional de Desarrollo y la agenda 2030. De esta manera se aspira a la inclusión de fuentes de generación de energía limpia que reduzcan las emisiones de GHG y logren disminuir la dependencia de la red de distribución. Además al estar ubicadas cerca de las fuentes de generación, aumentan de manera considerable la eficiencia energética del sistema. Otro beneficio es la posibilidad de suministrar energía a la red en caso de fallos de operación de la misma.

Por otra parte, dentro del entorno de microrredes eléctricas, el uso de un FLC brinda beneficios tales como el intercambio de excedentes de energía eléctrica, la mejora del perfil de potencia intercambiado con la red y la sostenibilidad y disminución de costos, que son precisamente los objetivos que persigue una estrategia de control dentro de las MGs (Diego Arcos-Aviles et al., 2016).

El aporte que se busca con esta investigación es el de plantear una estrategia de gestión energética basada en un control Fuzzy Logic para la interconexión de MGs, que permita el intercambio de energía entre ellas para cubrir la demanda de sus cargas eléctricas; con ello se comprobará si la prestación global del sistema (MGs interconectadas) incrementa, comparado con el comportamiento individual de cada MG.

1.3 Alcance del Proyecto.

Mediante el presente proyecto de investigación, se plantea desarrollar una estrategia de gestión energética, basada en un controlador FLC, para dos microrredes eléctricas interconectadas, con el propósito de mejorar el rendimiento total del sistema. Es decir, se comprobará si las prestaciones de cada microrred mejoran cuando trabajan en modo interconectado en relación a cuando trabajan

de forma individual. La estrategia de gestión hará uso de la potencia neta promedio (Net Power Average, P_{CTR}), de la potencia suministrada a la red (P_{GRID}) y el SOC de la batería actual, como resultado se obtendrá una potencia final que permitirá determinar si el intercambio de energía entre las microrredes es factible o no (Figura 1).

Para lo cual se deberá diseñar la estrategia de gestión energética junto con el FLC, se definirán las entradas y salidas del controlador, se realizará el ajuste, presentación y comparación de resultados de los índices de calidad propuestos en la estrategia EMS-FC (D. Arcos-Aviles et al., 2016) (Diego Arcos-Aviles et al., 2017).

Como se ha mencionado anteriormente, el propósito de implementar un sistema de control basado en FLC para dos MGs interconectadas, es el de minimizar el valor los índices de calidad, los cuales se muestran en las ecuaciones (1.1), (1.2), (1.3), (1.4) y (1.5) (Pascual Miqueleiz, 2015).

$$P_{G,MAX} = \text{máx}(P_{GRID}) \quad (1.1)$$

$$P_{G,MAX} = \text{min}(P_{GRID}) \quad (1.2)$$

$$MPD = \text{máx}(|\dot{P}_{GRID}|) \quad (1.3)$$

$$APD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\dot{P}_{GRID}(n)| ; \text{donde: } \dot{P}_{GRID}(n) = \frac{[P_{GRID}(n) - P_{GRID}(n-1)]}{T_s} \quad (1.4)$$

$$PPV = \sqrt{\sum_{f=f_i}^{f_f} P_{GRID,f}^2} / P_{DC} \quad (1.5)$$

Donde $P_{G,MAX}$ es la potencia máxima inyectada por la red en un año, $P_{G,MIN}$ es la potencia máxima absorbida por a la red en un año, MPD es la máxima rampa de perfil de potencia de la red, APD es el valor promedio de las rampas de potencia del perfil de red en un año y PPV es la variabilidad del perfil de potencia.

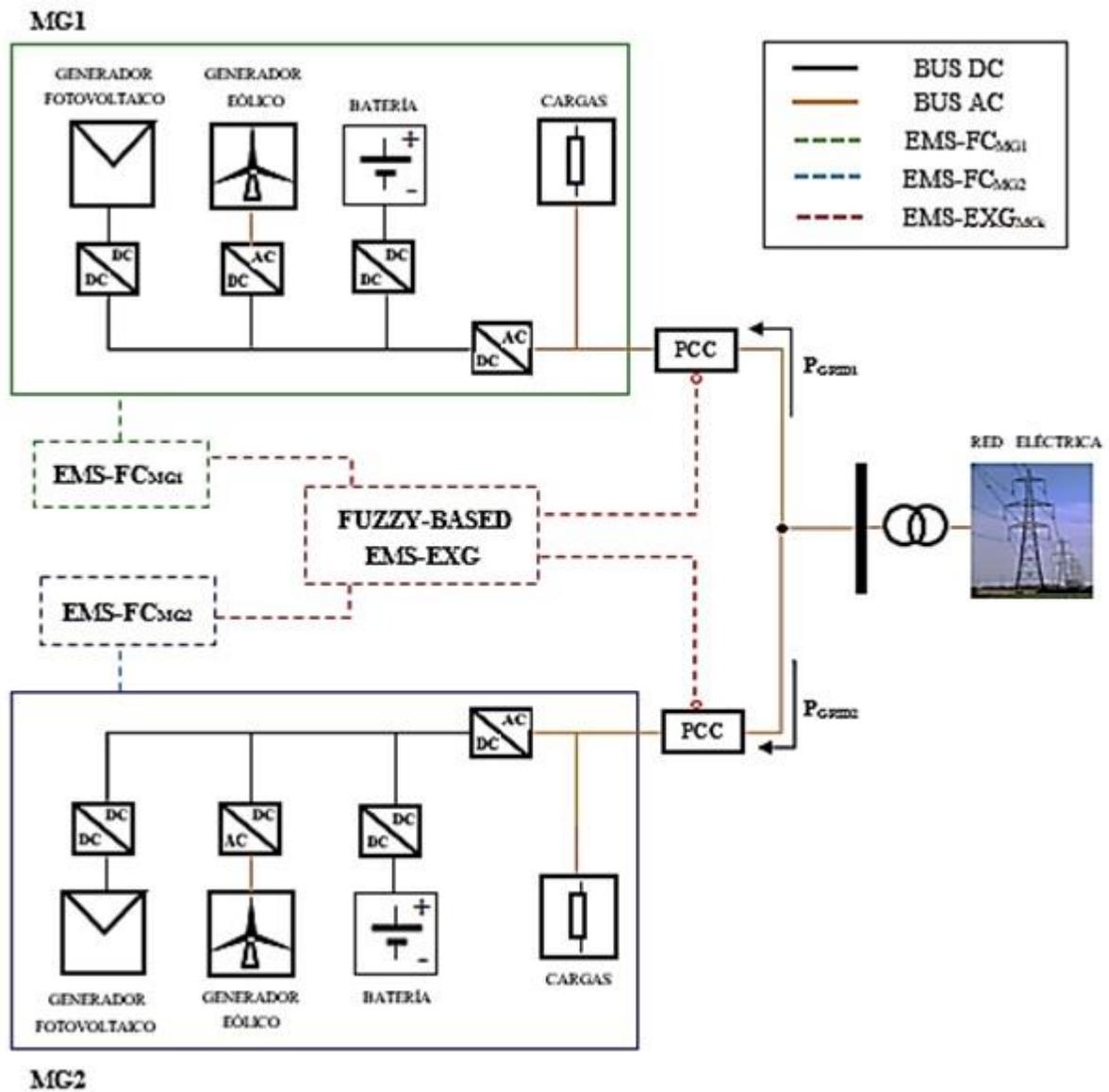


Figura 1. Arquitectura para dos microrredes eléctricas interconectada basado en EMS-EXG.

La etapa final del proyecto consiste en la realización de pruebas de funcionamiento, con datos de generación y consumo de energía reales obtenidos durante los años 2013 y 2014, adquiridos con un tiempo de muestro de 15 minutos ($T_s = 900s$). Donde se buscará obtener el correcto balance de las potencias que intervienen dentro de las MGs para que estas no alteren el comportamiento de la red eléctrica (picos, sobretensiones, fluctuaciones).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar una estrategia de gestión energética para dos microrredes eléctricas interconectadas que permita el intercambio de potencia entre ellas y mejore las prestaciones de cada una al trabajar de manera conjunta.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Implementar un controlador FLC que permita el intercambio de potencia entre dos microrredes de acuerdo con el *SOC* actual de la batería y la predicción de la potencia neta generada en las microrredes.
- Ajustar los parámetros del controlador FLC de tal forma que se logre la optimización de los criterios de calidad propuestos en la estrategia EMS-FC.
- Suavizar los perfiles de potencia intercambiada con la red para cada MG, a través de la reducción de las fluctuaciones y picos de potencia para la optimización de los índices de calidad.
- Realizar una simulación donde se compruebe que los resultados obtenidos cumplan con el correcto balance de las potencias que intervienen en las microrredes.
- Comparar los resultados de los índices de calidad de las microrredes interconectadas, respecto a las prestaciones individuales de cada una de ellas.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de microrred

Se entiende por microrred a un conjunto de cargas y microfuentes que operan como un solo sistema controlable que proporciona energía y calor en su área local. La microrred puede considerarse como una celda controlada del sistema de energía. Por ejemplo, esta celda podría controlarse como una sola carga despachable, que puede responder en segundos para satisfacer las necesidades del sistema de transmisión. Para el cliente, una microrred puede diseñarse para satisfacer sus necesidades especiales; como, mejorar la confiabilidad local, reducir las pérdidas del alimentador, soportar voltajes locales, proporcionar mayor eficiencia mediante el uso del calor residual, corrección de caídas de voltaje o proporcionar fuentes de alimentación ininterrumpida, por nombrar algunas (R.H.Lasseter, 2002).

Una microrred también puede ser pensada como “el conjunto de cargas, elementos de generación distribuida (Distributed Generation - DG) (eólica, fotovoltaica, pila de combustible, microturbina, etc.) y sistemas de almacenamiento de energía (Energy Storage System - ESS) (baterías, hidrógeno, aire comprimido, supercondensadores, etc.), conectados a la red eléctrica en un punto común denominado PCC (Point of Common Coupling), la cual lleva asociada una estrategia de gestión energética” (Reza, Sudarmadi, Viawan, Kling, & Van Der Sluis, 2006)

Es así que las microrredes podrían estar integradas en pequeñas industrias, edificios, zonas urbanas o viviendas unifamiliares. Con la ayuda de sistemas de almacenamiento, son capaces de regular la potencia intercambiada con la red, y participar en el control de la misma como unidades fundamentales de las nuevas redes eléctricas, las smart grids. (Hatziargyriou, 2014)

Las microrredes abarcan una gran variedad de aplicaciones y escenarios. Se encuentran microrredes tanto en instalaciones militares como civiles, ya sean éstas rurales, industriales, comerciales o residenciales tanto en países en vías de desarrollo como en países de primer mundo. Estados Unidos es el país que más megavatios [MW] tiene instalados en microrredes; no obstante, las microrredes instaladas en zonas rurales en países en vías de desarrollo suponen un porcentaje más significativo según (Asmus & Lawrence, 2016) y (Daniel Schnitzer, Deepa Shinde Lounsbury, Juan Pablo Carvallo et al., 2014). Pero más importante que el número de MW instalados, es que la tendencia es creciente en todos estos campos.

Es por ello que todos estos escenarios supone una gran variedad de configuraciones y arquitecturas de red, que van a determinar la estrategia de gestión que gobierne a cada microrred. La estrategia de gestión es la responsable de determinar el funcionamiento de los elementos que comprenden una microrred como por ejemplo, la potencia entregada por las baterías, la potencia consumida por las cargas gestionables o el intercambio de potencia con la red eléctrica. Es fundamental diseñar la estrategia adecuada que consiga los objetivos fijados de la forma más eficiente, esta estrategia debe diseñarse de tal manera que el conjunto de la microrred intercambie potencia con la red eléctrica con una evolución temporal que respete las restricciones en cuanto a derivadas de potencia, valores máximos, etc., marcadas por el operador de la red eléctrica (Pascual Miqueleiz, 2015). Este análisis sobre el estudio de las Estrategias de Gestión Energética se lo desarrolla en el Capítulo 3.

2.2 Arquitectura de la microrred

La estructura del sistema eléctrico tradicional está pensada para arquitecturas de generación grandes, lo cual supone un obstáculo para el uso de fuentes y elementos de generación distribuida.

El uso de las microrredes facilita el acoplamiento de estas fuentes con el sistema eléctrico. Además ésta puede ser instalada en un área geográfica local para utilizar su propia electricidad cuando sea posible. Tal es el caso de las microrredes clasificadas como microrredes comunitarias, las cuales representan un nuevo enfoque para diseñar y operar la red eléctrica, al confiar fuertemente en las fuentes de generación distribuida para lograr un sistema de energía más sostenible, seguro y rentable, mientras que generalmente proporciona respaldo de energía impulsada por las RES para cargas prioritizadas durante períodos indefinidos. Una forma genérica de representar la arquitectura de una microrred podría ser la que se muestra en la Figura 2.

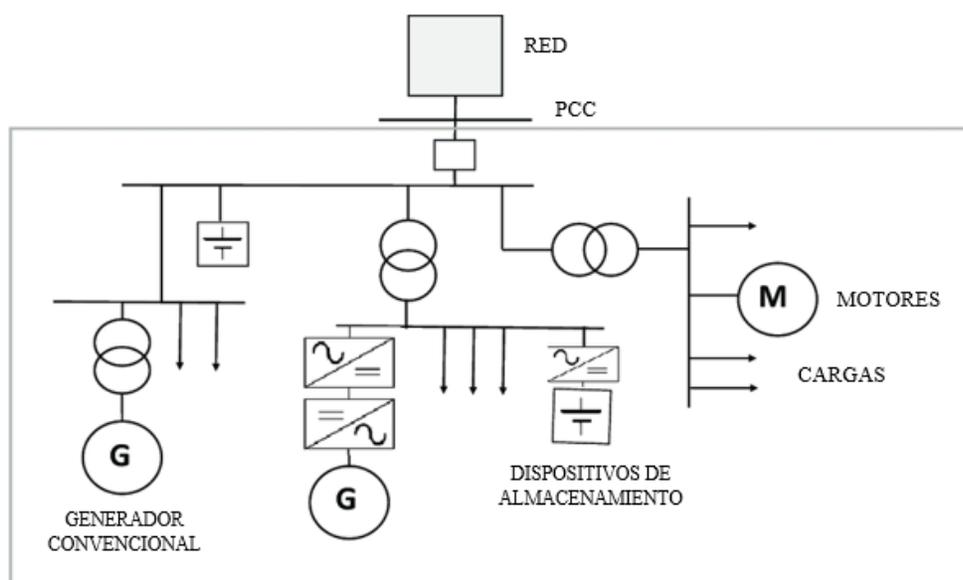


Figura 2. Esquema general de una microrred
Fuente: (J. M. Fernández, 2015)

2.2.1 Generación Distribuida

Se denomina generación distribuida aquellos sistemas cuya capacidad de generación es de pequeña escala y que proporcionan energía eléctrica al consumidor o la red de distribución. Y que

está asociada al uso de tecnologías como la energía solar fotovoltaica, energía eólica, motores, mini y microturbinas, y pilas de combustible (Tecnalia, 2007).

De acuerdo al rango de potencia generada se considera como microgeneración a las instalaciones cuya capacidad de generación de potencia es inferior a 5 kW, minigeneración a las estaciones que generan entre 5 kW a 5 MW de potencia, generación de media escala aquellas entre 5 a 50 MW y gran escala para sistemas de generación de potencia entre 50 a 100MW. Las aplicaciones de la DG van desde la generación en base, cogeneración, mejora de la calidad de suministro, hasta el respaldo y soporte a la red de transporte y distribución.

TECNOLOGÍAS DE GD	Maduras	Motor alternativo Turbina de gas Minihidráulica Eólica Solar térmica Fotovoltaica Residuos
	Semi-maduras	Biomasa Microturbina Pila de combustible
	Emergentes	Marina Geotérmica
SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	Maduras	Bombeo Batería
	Semi-maduras	Térmico Volante Aire a presión
	Emergentes	Hidrógeno SMES Ultracapacidades
SISTEMAS DE INTERCONEXIÓN		

Figura 3. Sistemas de Generación Distribuida

Fuente: (Tecnalia, 2007)

Se presenta a continuación una descripción de las tecnologías de generación existentes en la actualidad, ordenadas de mayor a menor de acuerdo a su madurez y grado de penetración en el

mercado. En función de la energía que utilicen, estas tecnologías se clasifican en dos categorías: DGs no renovables y renovables, donde el primer grupo se refiere aquellos sistemas que usan combustibles fósiles como fuente primaria de energía: motores alternativos, turbinas de gas, pilas de combustible y micro turbinas. La Figura 4, muestra un resumen de las características más importantes de las tecnologías de generación consideradas maduras y semi-maduras (Elfvengren, 2015).

Tecnologías	Energía primaria	Potencia (MW)	Rendimiento eléctrico ¹ (%)	Coste inversión ² (€/kW)	Disponibilidad comercial
Motor alternativo	Gas natural, diesel, biogás, propano	0,08-20	28-42 % (gas natural) 30-50 % (diesel) 80-85 % (cogeneración)	500-900	Actual
Turbina de gas	Gas natural, biogás, propano	0,25-500	25-60 % 70-90 % (cogeneración)	600-1400 (CHP)	Actual
Minihidráulica	Agua	0,01-10	80-90 %	1000-1800	Actual
Eólica	Viento	0,005-5	43 %	1100-1700	Actual
Solar térmica³	Sol	0,0002-200	13-21 %	3500-8000	Actual
Fotovoltaica	Sol	< 0,001-0,1	14 %	5000-7000	Actual
Biomasa	Biomasa		32 %	1500-2500	Actual
Microturbina	Gas natural, hidrógeno, propano, diesel, biogás	0,025-0,4	25-30 % Hasta 85 % (cogeneración)	900-2000	Actual (limitada)

Figura 4. Tecnologías de Generación Distribuida
Fuente: (Elfvengren, Karvonen, Klemola, & Lehtovaara, 2014)

De todas las tecnologías mencionadas, la eólica y la fotovoltaica son las que guardan relación con el presente trabajo de investigación, las cuales se encuentran dentro de las fuentes de DG de tipo renovable, que se explicaran a detalle en la sección 2.3.

2.2.2 Sistema de interconexión

La mayoría de tecnologías DG operan en paralelo con la red eléctrica, por tal razón necesitan estar conectados de forma adecuada al generador distribuido, las unidades de almacenamiento de energía y las cargas locales. Es así que deben proporcionar la protección, el monitoreo, el acondicionamiento y conversión de energía, y despacho de la unidad de DG cuya complejidad de conexión depende de los elementos que interactúan con la red de suministro eléctrico.

Por otro lado el PCC del sistema de interconexión es definido como un punto de conexión individual ubicado entre el usuario final (punto de medida de energía) y el sistema que lo alimenta, sea el sistema de distribución local o el sistema de transmisión regional y en el cual puede ser realizada la evaluación de la distorsión armónica (Committee, Power, & Society, 2014).

2.2.3 Sistema de almacenamiento de energía

Ya que la generación eléctrica producida por las fuentes de energía renovable es variable se ve la necesidad de usar sistemas de almacenamiento que permitan la disponibilidad de energía eléctrica de forma continua. Es por ello que su principal objetivo es cubrir la demanda de las cargas cuando existen irregularidades en el suministro eléctrico, además que sirven de apoyo para optimizar la planificación de los sistemas de generación. Es por ello que al momento de elegir un sistema de almacenamiento, se deben tomar en cuenta sus características y aplicaciones (Figura 5):

- Capacidad de almacenamiento.
- Potencia aportada.
- Respuesta rápida, modulada y controlada.
- Vida útil.

- Coste compatible y de mantenimiento.
- Bajo impacto ambiental.

Tecnología	Tiempo de descarga	Banda de potencia	Eficiencia	Disponibilidad comercial	Aplicación
Térmico			65 % (en promedio)		Solar térmica, biomasa, geotérmica y electricidad de red con muchas renovables.
Bombeo	Horas-días	100 – 1.000 MW	66 % (en promedio)	Disponible.	Hidráulica y electricidad de red con muchas renovables.
Volante	Segundos-minutos	10 – 100 kW	78 % (en promedio)	Disponible.	Electricidad de red con muchas renovables.
Aire a presión	Horas-días	100 – 1.000 MW	69 % (en promedio)	Disponible.	Electricidad de red con muchas renovables.
Batería Plomo ácido	Minutos-horas	1 kW – 40 MW	60,7-67,7 %	Disponible.	Hidráulica, fotovoltaica, eólica, maremotriz y undimotriz.
Batería Níquel-Cadmio	Segundos-horas	1 kW – 40 MW		Disponible.	
Batería Sodio-Azufre	Horas-días	50 kW – 10 MW	56,7-72,2 %		
Hidrógeno			24-58 %		Hidráulica, fotovoltaica, eólica, maremotriz y undimotriz.
SMES	Segundos	1 – 100 MW		Prototipos.	Fotovoltaica y electricidad de red con muchas renovables.
Ultra-capacidad	Segundos	10 kW – 1 MW	90 % (en promedio)	Prototipos.	Fotovoltaica y electricidad de red con muchas renovables.

Figura 5. Características y aplicaciones de los diferentes sistemas de almacenamiento

Fuente: (Tecnalia, 2007)

2.3 Caracterización de las fuentes renovables

2.3.1 Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es aquella que produce energía eléctrica a través de la absorción de radiación solar cuyo desplazamiento de carga en el interior de materiales semiconductores (células fotovoltaicas), originan la generación de corriente continua.

Este tipo energía renovable contribuye a la generación de electricidad para suministrarla a la red eléctrica, de esta manera se la aprovecha en varias aplicaciones y electrodomésticos. Es por ello, que en los últimos años existe una creciente demanda en la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas (MIT Technology Review, 2006). Una instalación fotovoltaica se compone básicamente de:

- Sistema de generación: Compuestos por células fotovoltaicas conectadas entre sí.
- Sistema de regulación de carga: Se encarga de regular el proceso de carga/descarga de las baterías, además de protegerla frente a sobrecargas/sobredescargas ya que trabaja conjuntamente con el sistema de acumulación.
- Sistema de acumulación: Almacena la energía excedente de la generación, así se proporciona energía en horas de baja o nula radiación solar.
- Sistema de interconexión: Compuesta de inversores, protecciones y contadores.

2.3.2 Eólica

La energía eólica es la forma de energía renovable que se obtiene al explotar la fuerza del viento, por el movimiento continuo de las masas de aire. Se puede transformar directamente en energía mecánica e indirectamente en electricidad. En la actualidad, la energía eólica es utilizada

principalmente para producir electricidad mediante aerogeneradores conectados a grandes redes de distribución de energía eléctrica. Los pequeños sistemas de generación eólica se los puede considerar como DGs ya que se encuentran cerca del consumidor y pueden suministrar energía eléctrica a lugares aislados de las redes eléctricas o pequeños edificios (WWEA, 2016).

2.4 Balance de potencia y energía

Como se describió previamente las MGs tienen la capacidad de actuar de manera conjunta o aislada a la red eléctrica. En modo conjunto, la red eléctrica se encarga de mantener el balance de potencia entre la generación y el consumo. Sin embargo al operar de forma aislada los ESS deben ser los responsables de mantener el balance de potencia y energía de acuerdo a la demanda de sus cargas, con ello se evita desequilibrios de potencia repentinos, así como desviaciones de frecuencias y voltajes fuera de rangos apropiados de operación, con ello se garantiza confiabilidad y seguridad a los usuarios conectados (Cañizares, 2014).

De acuerdo a lo expuesto es necesario estrategias de control que se encarguen de la demanda de las cargas, la potencia disponible de los RES y la capacidad de almacenamiento de los ESS, este último es importante debido a que su *SOC* es la variable más importante para realizar arquitecturas de control entre las fuentes de energía distribuida (DERs), con esto se alarga la vida útil del ESS y se previenen descargas y sobrecargas profundas (Torres Pinzón, 2017).

De acuerdo a la microrred en estudio (Figura 6) las potencias involucradas en el balance energético son: las potencias entrantes correspondientes a las generadas por las fuentes fotovoltaica y eólica, la potencia de la batería y la potencia intercambiada con la red eléctrica. Estas potencias

concurren hacia un punto común o nodo eléctrico cuya salida pertenece a la demanda de potencia ejercida por las cargas eléctricas de la microrred.

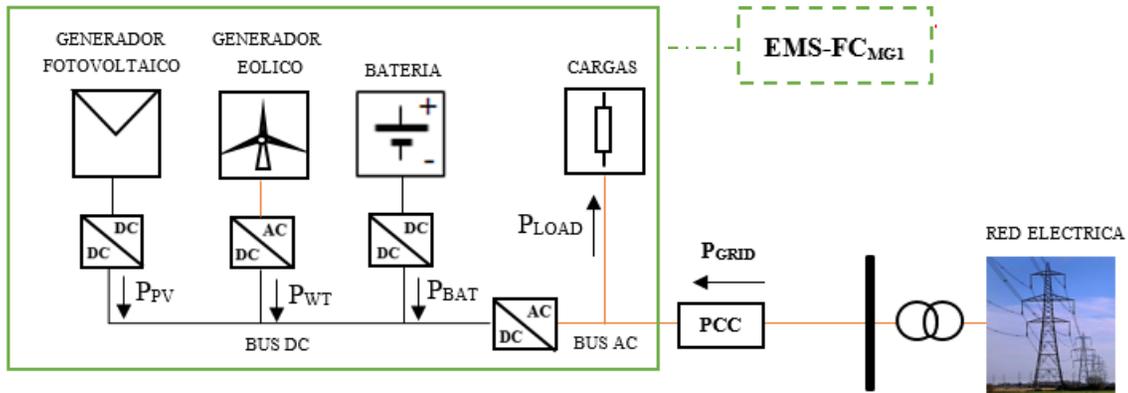


Figura 6. Potencias de la microrred en estudio

2.4.1 Balance de potencia en el nodo eléctrico

De acuerdo al número de potencias entrantes y salientes conectadas al BUS DC y BUS AC, el balance energético global de la microrred debe ser cero, esto permite conocer las aportaciones de energía otorgadas al *SOC*. De la Figura 6 el balance energético viene dada por la expresión:

$$P_{PV} + P_{WT} + P_{GRID} + P_{BAT} = P_{LOAD} \quad (2.1)$$

Donde, P_{PV} corresponde a la potencia eléctrica generada por los paneles solares, P_{WT} es la potencia eléctrica generada por la turbina eólica, P_{GRID} es el perfil de potencia intercambiada con la red eléctrica, P_{BAT} es la potencia de la batería de la microrred y P_{LOAD} es la demanda de potencia de la microrred.

De (2.1) se concluye que el consumo total de la microrred debe ser suministrado por las potencias producidas por los generadores de energía renovable fotovoltaica y eólica, la potencia suministrada por la red eléctrica y la potencia de la batería.

2.5. Control por lógica difusa (FLC)

La lógica difusa se asocia como un sistema interpretativo de acuerdo a la percepción de las personas en el entorno que los rodea, por ejemplo la temperatura de un ambiente, la velocidad a la que circula un automóvil, etc. Estos elementos son relacionados mediante conjuntos difusos que definen su grado de verdad relativo, es decir se otorga al elemento un valor de pertenencia dentro de un conjunto determinado. A partir de estos conjuntos se procede a la inferencia donde por medio de sentencias lógicas “IF-THEN”, se construye un controlador que interpreta intuitivamente el estado de las variables, por lo que se define un estado de actuación y se lleva la variable al valor deseado sin la necesidad de conocer el modelo matemático del proceso y sin complicaciones matemáticas (De los Ríos, 2004).

2.5.1 Definiciones básicas

- **Conjuntos difusos:** Son conjuntos cuyos elementos se definen mediante un grado de pertenencia que toman valores en el intervalo de $[0, 1]$, asociándole un valor lingüístico, donde 0 indica la exclusión del elemento y 1 la inclusión del mismo dentro de un conjunto determinado. A cada conjunto se lo nombra mediante una etiqueta, y se define una función de pertenencia que determina un valor lingüístico a la variable (Figura 7) (Kouro R & Musalem M, 2005).

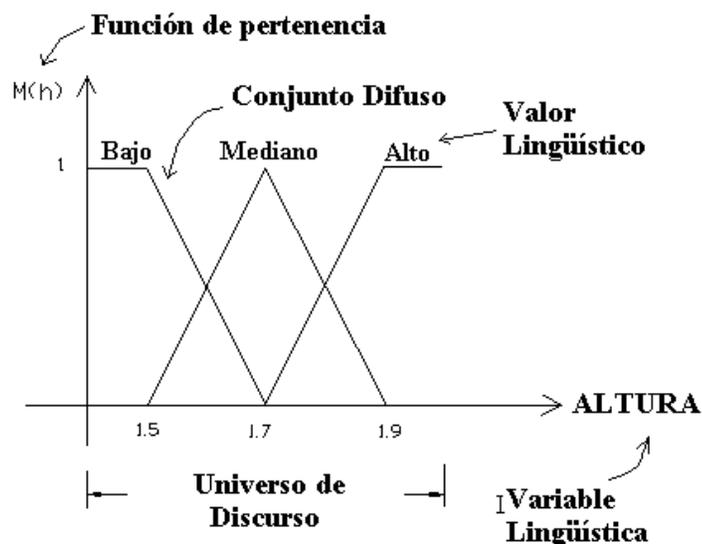


Figura 7. Variables de la lógica difusa

Fuente: (Línea, 2015)

- Variable lingüística: Es el concepto al cual se califica de forma difusa mediante lenguaje hablado por ejemplo la temperatura, la edad, el error.
- Universo de discurso: Se refiere al rango de valores que pueden tomar los elementos de acuerdo a la variable lingüística definida, por ejemplo “temperatura ambiente” comprende el rango entre [20°C -22°C].
- Valor lingüístico: Se refiere al tipo de clasificación que un individuo le otorga a la variable lingüística, por ejemplo “bajo, medio, alto”.
- Funciones de pertenencia: Indica el grado de pertenencia de un elemento del universo de discurso dentro de un conjunto difuso. Entre las funciones de pertenencia más comunes se tiene la triangular, trapezoidal, sigmoidea, gaussiana y se definen como:
 1. Función triangular: Se define por los límites: a “inferior”, b “superior” y m “modal”; De tal forma que $a < m < b$.

2. Función Trapezoidal: Se usa para definir valores intermedios donde el valor de tolerancia reside alrededor del valor lingüístico del conjunto difuso.
3. Función Gaussiana: Se define por la expresión (2.2), donde a, b y c son reales ($c > 0$)

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (2.2)$$

4. Función sigmoidea: Consiste en una función no lineal comprendida en el rango de 0 y 1, y describe una progresión temporal desde niveles bajos hasta llegar a su límite debido al crecimiento acelerado en su parte intermedia. Su expresión se define por (2.3):

$$\frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (2.3)$$

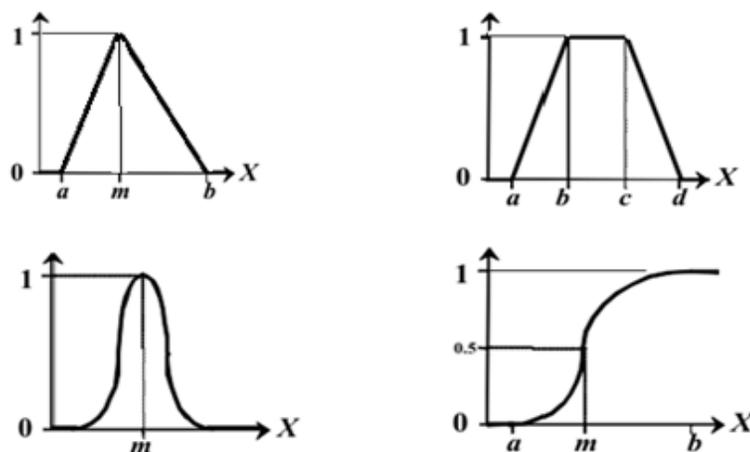


Figura 8. Funciones de pertenencias típicas para FLC.

Fuente: (Línea, 2015)

- Operaciones difusas: Permiten realizar operaciones entre conjuntos difusos de tal manera que se obtiene otro conjunto. Estos operadores son útiles en controladores y modelos difusos ya que permiten evaluar los antecedentes de las reglas en sistemas de inferencia difusa. Así se definen tres operaciones básicas, complemento, unión e intersección y se definen como:

Complemento

$$u_{\bar{A}}(x) = 1 - u_A(x)$$

Unión. Operador lógico OR de Zadeh (max)

$$u_{A \cup B}(x) = \max[u_A(x), u_B(x)]$$

Intersección. Operador lógico AND de Zadeh (min)

$$u_{A \cap B}(x) = \min[u_A(x), u_B(x)]$$

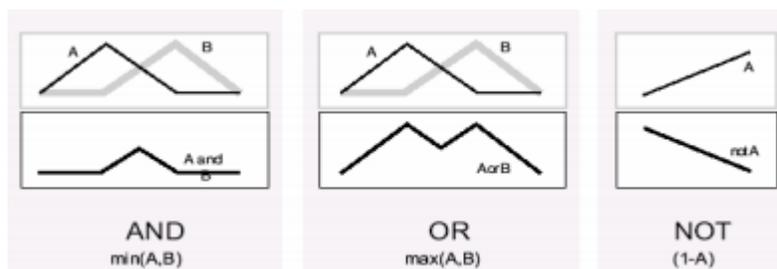


Figura 9. Operaciones básicas difusas

Fuente: (De los Ríos, 2004)

2.5.2 Inferencia Difusa

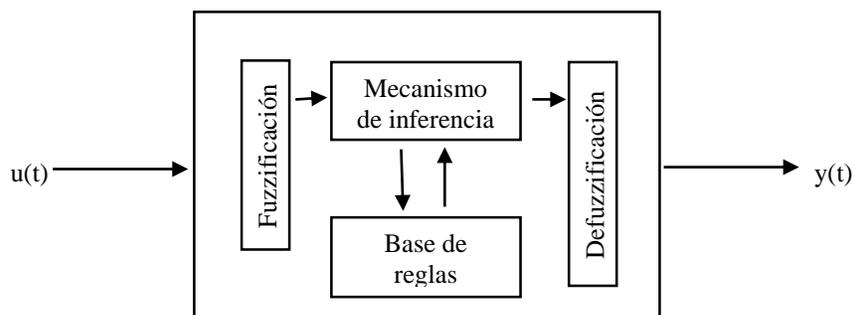


Figura 10. Sistema de inferencia difusa

Fuente: (Kevin M & Stephen Yurkovich, 1998)

La Figura 10 muestra el esquema del sistema de inferencia difusa que tiene por objetivo conseguir una acción de control $y(t)$ de acuerdo al estado que presentan sus entradas $u(t)$, a partir de una base de reglas que constituye el conocimiento del experto. El proceso de inferencia se divide en cuatro etapas: fuzzificación, base de reglas, mecanismo de inferencia y defuzzificación.

2.5.2.1 Fuzzificación

Este proceso otorga un grado de pertenencia a los datos numéricos de entrada por medio de la correspondencia del estado de las variables y las funciones de pertenencia en un conjunto difuso (Kouro R & Musalem M, 2005).

2.5.2.2 Base de reglas

Es la combinación de conjuntos difusos de entrada (antecedentes) asociados a un conjunto difuso de salida (consecuente). La base de reglas son proposiciones de tipo “IF-THEN” que expresan el conocimiento del experto y determinan la forma de actuar del controlador hacia la planta, a través de operaciones difusas (OR, AND, NOT) entre los conjuntos difusos (De los Ríos, 2004).

$$IF x_1 \text{ is } A \text{ AND } x_2 \text{ is } B \text{ THEN } u_1 \text{ is } C \quad (2.4)$$

De la ecuación (2.4), x_1 y x_2 son variables de entrada, A y B son funciones de pertenencia de entrada, u_1 es la acción de control, C es función de pertenencia de salida.

Es común representar la base de reglas mediante tablas, mientras más variables de entrada tenga el controlador, más difícil es la formulación de la misma.

2.5.2.3 Mecanismo de inferencia

Determina conclusiones o la acción de control, en función de las reglas activas y su grado de verdad (Theler, 2007). Existen varios mecanismos de inferencia, pero los más usados son la inferencia por mínimos cuadrados de Mamdani, producto de Larsen, drástico y limitado (Tabla 1).

Tabla 1*Definición de los cuatro métodos de inferencia más populares*

Método de inferencia	Definición
Mamdani minimum inference, R_M	$\min(\mu, \mu_w(z)), \forall z$
Larsen product inference, R_L	$(\mu \times \mu_w(z)), \forall z$
Drastic product inference, R_{DP}	$\begin{cases} \mu & \text{para } \mu_w(z) = 1 \\ \mu_w(z) & \text{para } \mu = 1 \\ 0 & \text{para } \mu < 1 \text{ y } \mu_w < 1 \end{cases}$
Bounded product inference, R_{BP}	$\max(\mu + \mu_w(z) - 1, 0)$

Fuente: (De los Ríos, 2004)

2.5.2.4 Defuzzificación

Una vez que se tienen las relaciones lógicas entre las variables de entrada y salida, estas deben ser traducidas a un número real del conjunto difuso de salida (Kouro R & Musalem M, 2005). El método más usado en la defuzzificación es del centroide definida por (2.5), donde se transforma la salida difusa en un número real que constituye el centro de gravedad del conjunto difuso de salida.

$$y_d = \frac{\sum_i b_i \int_S \mu(i)}{\sum_i \int_S \mu(i)} \quad (2.5)$$

Donde $\int_S \mu(i)$ es el área de la función de pertenencia $\mu(i)$, b_i es el valor de salida de la función de pertenencia de la regla (i) y S es el dominio o rango de integración.

CAPÍTULO III

3. ESTRATEGIAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA

3.1 Estado del arte

La gestión energética se puede definir como el conjunto de medidas cuyo objetivo es utilizar la menor cantidad de energía para satisfacer la demanda energética (en hogares, edificios) y niveles de producción (en industrias), por lo que se la considera como un medio de previsión y control del consumo de energía (Henares, 2011). Por lo expuesto, es necesario desarrollar sistemas de gestión energética que permitan mejorar la estabilidad y rendimiento de un sistema de energía, de esta manera se mejora la eficiencia energética y se opera al menor costo (Martínez et al., 2015).

Dentro de las microrredes una EMS es de suma importancia ya que se encarga de la gestión de los elementos de control y así lograr objetivos como: el control del flujo de potencia de los elementos de una microrred (como minimizar costos de operación de la MG o maximizar ingresos tras vender electricidad por medio del intercambio de energía con la red eléctrica) (Diego Arcos-Aviles et al., 2016), gestión de la potencia de carga y descarga en los ESS, mejora del perfil de potencia intercambiada con la red eléctrica, confiabilidad del suministro eléctrico, eficiencia energética, fiabilidad y seguridad del sistema (Tolón, 2013).

Por ejemplo en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017) se menciona un EMS para suavizar el perfil de potencia intercambiada con la red eléctrica a través de un controlador de lógica difusa, mediante el análisis del error de predicción de la demanda y generación de potencia, y el estado de carga de la batería (Figura 11). Los resultados de la estrategia muestra la disminución de fluctuaciones y

picos de potencia intercambiados con la red mientras se mantiene la energía almacenada de la batería en límites seguros.

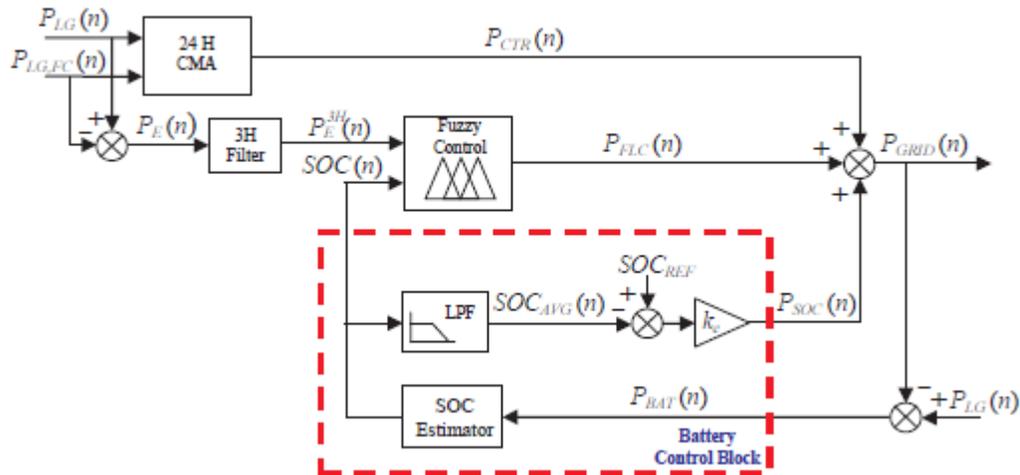


Figura 11. Diagrama de bloques del EMS propuesto basado en la predicción¹

Fuente: (Diego Arcos-Aviles et al., 2017)

Otro objetivo de las EMS radica en el intercambio de energía entre microrredes. Este campo se ha vuelto de gran interés ya al intercambiar potencia se proporciona soporte de voltaje, potencia, eliminación de armónicos, gestión de potencia en la carga de las baterías de las MGs conectadas, venta de excedentes de potencia generada (Nair, Devi, Nair, & Ilango, 2016), entre otras. De este modo existen varios trabajos de investigación enfocados al intercambio de potencia, entre ellos:

(Nair et al., 2016) diseña un controlador de lógica difusa para el intercambio de potencia entre microrredes, de modo que la microrred con tarifa más baja se integra a la red y comparte potencia. Este controlador proporciona un factor de ganancia de acuerdo a la variación del SOC, la corriente,

¹ ©2016 IEEE, Reprinted, with permission, from D. Arcos-Aviles, F. Guinjoan, M. P. Marietta, J. Pascual, L. Marroyo and P. Sanchis, "Energy management strategy for a grid-tied residential microgrid based on Fuzzy Logic and power forecasting," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016, pp. 4103-4108.

la carga y la tarifa de la red, de esta forma se emiten pulsos de conmutación en cada microrred, los resultados obtenidos muestran: reducción de armónicos, variación de la corriente de compensación de cada microrred, y reducción de THD (Total Harmonic Distortion) al 3.64%.

(Hashmi, Khan, Habib, & Tang, 2017) propone una estrategia de control para asegurar una distribución de potencia proporcional activa y reactiva en microrredes AC aisladas, además de restaurar el voltaje y la frecuencia a valores nominales. La estrategia consiste en dos bucles que trabajan de forma descentralizada en cada nodo convertidor, así el primer bucle controla el intercambio de potencia reactiva y de voltaje, y el segundo bucle controla el reparto de potencia activa y la restauración de frecuencia.

(Hosseinimehr, Shahnia, & Ghosh, 2015) presenta un enfoque de intercambio de potencia entre sistemas de almacenamiento de baterías en paralelo dentro de una microrred autónoma, esta estrategia considera el estado de carga de la batería y con ello se determina la relación de potencia de salida de las baterías que permitirá modificar la descarga de manera dinámica, con esto las baterías de diferentes capacidades suministran potencia a la red.

(Nian Liu, Jie Wang, 2018) propone una estrategia de intercambio de potencia entre microrredes por medio de un modelo de distribución de energía eléctrica y térmica, donde se consideran el costo de generación de energía y calor, costo de operación con la red eléctrica, costo de energía eléctrica y térmica con la de otras microrredes, características de carga, etc. Además el algoritmo permite obtener el costo de energía eléctrica y térmica por lo que brinda flexibilidad al sistema.

(Jing, Lai, Dennis Wong, & Wong, 2015), muestra una topología de almacenamiento energético (Figura 12) y una estrategia de intercambio energético (Figura 13) entre un sistema de

almacenamiento híbrido, "Hybrid Energy Storage, HES", compuesto por un supercondensador y dos baterías, el objetivo es administrar la energía de forma eficiente para regular las fluctuaciones del suministro y la carga, y con ello prolongar la vida útil de la batería. De esta forma la primera batería cubre la demanda mínima de carga y la segunda se encarga de cubrir la mayor parte de la misma.

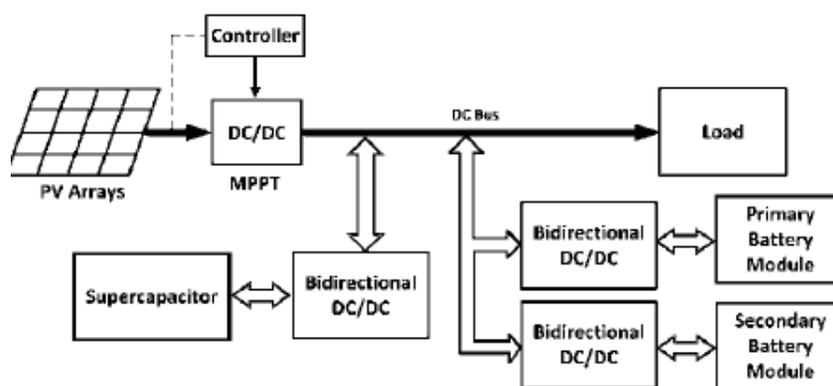


Figura 12. Topología del sistema PV con HES

Fuente:(Jing et al., 2015)

El EMS distribuye la potencia entre el supercondensador y las baterías al comparar el HES con la demanda de carga como se muestra en la Figura 13.

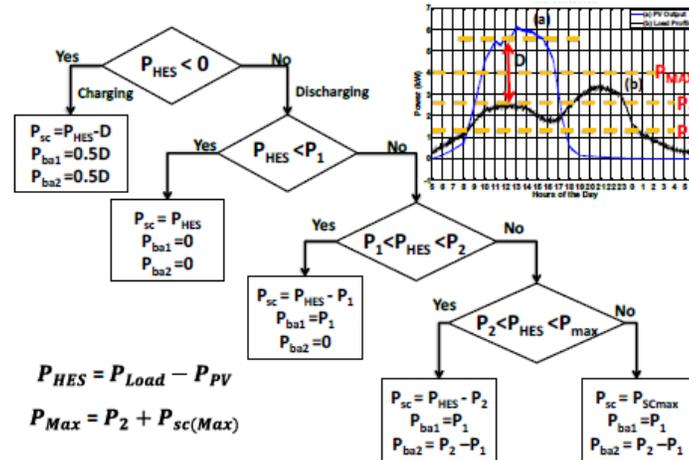


Figura 13. Estrategia de intercambio de energía entre el SOC y las baterías
Fuente:(Jing et al., 2015)

Las investigaciones mencionadas consideran que el intercambio de potencia debe realizarse de forma controlada, ya que se logra mejorar la calidad de potencia entregada a la red y se reducen costos de operación. Además dichas estrategias sugieren el estado de la batería, el perfil de potencia de red y la predicción de generación y consumo de energía como variables de análisis para realizar el intercambio energético entre microrredes.

3.2 Objetivos y evaluación de las estrategias

Dado que existe una gran variabilidad tanto en la generación como en la demanda esto conlleva a que haya un desequilibrio de energía en el sistema, con variaciones bruscas de potencia las cuales son absorbidas por la red eléctrica. El objetivo de las estrategias de gestión es el de suavizar la potencia intercambiada con la red, al eliminar posibles picos y fluctuaciones de consumo y generación. Es ahí, donde el sistema de almacenamiento de energía toma gran importancia, debido a que es el responsable de realizar un equilibrio energético eficiente en la microrred y de atenuar su interacción con la red eléctrica.

Las características básicas que debe seguir el sistema de almacenamiento para poder cumplir con los objetivos mencionados, tanto para el equilibrio energético como la atenuación del perfil intercambiado con la red, son:

- El sistema de almacenamiento debe suministrar energía al sistema, cuando el consumo sea mayor que la generación.
- El sistema de almacenamiento debe absorber energía del sistema, cuando el consumo sea menor que la generación.
- El sistema de almacenamiento debe neutralizar los picos grandes de potencia que estén fuera del rango de la restricción impuesta por la red en el sistema.
- El sistema de almacenamiento debe ser capaz de suministrar o absorber los cambios rápidos de potencia (rampas tanto de subida como de bajada).

Para poder evaluar y comparar los perfiles de potencia de red obtenidos de las diferentes estrategias, se debe definir ciertos criterios de calidad o indicadores de rendimiento que permitirán comprobar si existe una mejora en las prestaciones de cada MG, las cuales se explican a continuación (Pascual Miqueleiz, 2015):

- **Pico de potencia de red positivo ($P_{G,MAX}$) [kW]:** Potencia máxima entregada por la red eléctrica durante un año.
- **Pico de potencia de red negativo ($P_{G,MIN}$) [kW]:** Potencia máxima alimentada a la red durante un año.
- **Derivada de la potencia máxima (MPD) [W/h]:** Tasa de cambio máxima, en valor absoluto, del perfil de potencia de la red en un año de estudio ($T_s = 900s$).

- **Derivada de la potencia promedio (APD) [W/h]:** Valor promedio anual de las tasas de rampa del perfil de potencia de la red.
- **Variabilidad del perfil de potencia (PPV):** Mide la estabilidad del perfil de potencia de la red.

En la Tabla 2 se muestra los índices de calidad para el perfil de red propuesto en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017), la estrategia de gestión energética del presente proyecto de investigación debe conseguir perfiles de potencia de red con valores inferiores a los evaluados en la Tabla 2, tanto para la MG1 como para la MG2, para poder comprobar que existe una mejora en las prestaciones de cada microrred. En el Capítulo 5 se presenta los resultados obtenidos de los índices de calidad para las dos microrredes en estudio.

Tabla 2

Índices de calidad MG original

$P_{G,MAX}$ (kW)	$P_{G,MIN}$ (kW)	MPD (W/h)	APD (W/h)	PPV
1.89	-1.48	480	51.79	2.76

Fuente: (Diego Arcos-Aviles et al., 2017)

3.3 Predicción de la generación de fuentes renovables

En una microrred se pueden diferenciar dos clases de variables a predecir, por una parte las relativas a la demanda, la cual depende del usuario, y por otro lado las potencias de las fuentes renovables, que dependen de las variables meteorológicas y de las características de los generadores. Debido a la dificultad de almacenar una gran cantidad de energía eléctrica, a causa de las limitaciones físicas del sistema de almacenamiento, es importante conocer la demanda futura para ser capaces de suministrar la energía requerida por el usuario, lo cual permitirá minimizar las pérdidas de energía inutilizada. Una producción de energía mayor o menor de la requerida genera

un alto impacto económico y medioambiental, por ello es importante hacer una buena predicción de la energía requerida y por consiguiente, un uso más eficiente de la misma.

Para la predicción de la generación renovable se utiliza la predicción por modelos matemáticos, al combinar los datos de predicción obtenidos de un servidor público con los modelos paramétricos clásicos de los generadores, los cuales se ajustan con las medidas obtenidas del sistema fotovoltaico, el aerogenerador y de la estación meteorológica de la microrred en estudio. En el caso de la predicción de la demanda se considera la predicción por persistencia y se asume un patrón diario y sin diferenciación de días (sin diferenciación de días festivos con laborables) (Pascual Miqueleiz, 2015).

Una vez analizados los datos provenientes de la predicción de la generación renovable y de la demanda mediante los datos de predicción meteorológica, se consideran posibles márgenes de error provenientes de las fuentes de medida y de la predicción de la potencia generada. Finalmente, se elige la técnica utilizada para la predicción de la demanda y se analiza la predicción de la potencia global, la cual viene a ser la suma de todas las potencias involucradas en el sistema.

3.3.1 Predicción de la generación fotovoltaica

La obtención de electricidad a partir de la radiación solar se conoce como generación fotovoltaica, para ello se requiere un material que absorba la luz del sol y la transforme en energía eléctrica gracias al efecto fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos presentan una importante simplificación respecto a los procesos energéticos convencionales, debido a que transforman una energía primaria como la energía solar, en electricidad de un modo directo, es decir, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía.

La conversión de los datos atmosféricos en producción fotovoltaica, se lo lleva a cabo mediante la técnica usada en (Pascual Miqueleiz, 2015) y de acuerdo el modelo físico del panel fotovoltaico, para lo cual se realiza en primer lugar, la estimación de la temperatura de célula a partir de la temperatura ambiente y de la irradiancia, luego se obtiene la potencia generada a partir de la temperatura de la célula y de la irradiancia. Esto datos requieren la caracterización de los paneles, es decir la obtención de la potencia CEM (Condiciones Estándar de Medida), P_{CEM} , y el factor de variación de potencia con la temperatura, γ . El proceso completo para la predicción de la potencia fotovoltaica se muestra en la Figura 14.

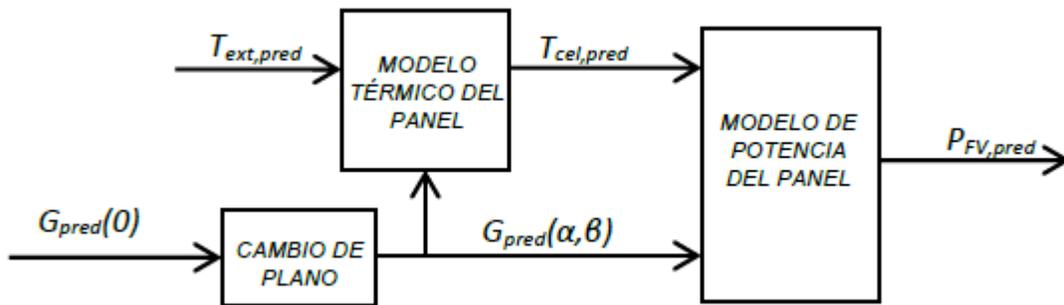


Figura 14. Esquema del proceso de predicción de la potencia fotovoltaica generada
Fuente: (Pascual Miqueleiz, 2015)

Una vez conocidas las condiciones ambientales y el modelo del panel (P_{CEM} y γ), la potencia generada por el panel solar fotovoltaico puede ser estimada mediante la ecuación (3.1) (Lorenzo, 2011), como se muestra a continuación:

$$P_{FV} = P_{CEM} \frac{G}{1000} [1 + \gamma \cdot (T_{cel} - 25)] \quad (3.1)$$

Donde P_{CEM} es la potencia en condiciones estándar de medida (CEM, $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, panel a 25°C y masa de aire 1.5), G es la irradiancia en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, γ (*gamma*) representa la variación de la potencia producida por efecto de la temperatura en $\% \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, T_{cel} es la temperatura de célula en $^\circ\text{C}$.

3.3.2 Predicción de la generación eólica

La energía eólica ha presentado un marcado crecimiento convirtiéndose en una de las tecnologías más usadas para la generación de energía eléctrica renovable, y es una alternativa para sectores rurales. Sin embargo este tipo de generación presenta variabilidad e imprevisiones, por lo que es una fuente de energía no programable que no se ajusta de manera exitosa a la demanda energética de un sistema eléctrico, pero esto no implica que no se pueda predecir (Matos Felipe, Batista Luis, 2009).

La importancia de la predicción permite planificar las necesidades de energía que afectan a un sistema en un periodo determinado, y ayuda a la gestión de recursos como por ejemplo la puesta en marcha de las unidades de producción, la programación de mantenimiento de los elementos que componen el sistema eléctrico, o sirven como herramienta para maximizar la rentabilidad de una actividad, así el problema de predicción energética se basa por su escala de tiempo (Borja, 2007).

- Corto plazo: De milisegundos a minutos, usada para control activo del autogenerador.
- Mediano plazo: De 48 a 72 horas o una semana, permite realizar ofertas al mercado diario y con ello reducir costos de generación.
- Largo plazo: Desde semanas a un año, permite la toma de decisiones de inversión y análisis de costos.

La predicción de generación eléctrica eólica para el presente proyecto se realiza de acuerdo al modelo usado en (Pascual Miqueleiz, 2015), mostrado en la Figura 15. Donde el primer paso es la estimación de la densidad del aire suponiéndolo como un gas ideal, luego se corrige la presión a nivel del mar a presión en altitud, la velocidad del viento predicha en condiciones locales y por último se obtiene la potencia generada por medio de la densidad del aire y su velocidad a través del modelo del aerogenerador, para ello se caracteriza el aerogenerador a través del área de barrido de las palas y el coeficiente de potencia C_p .

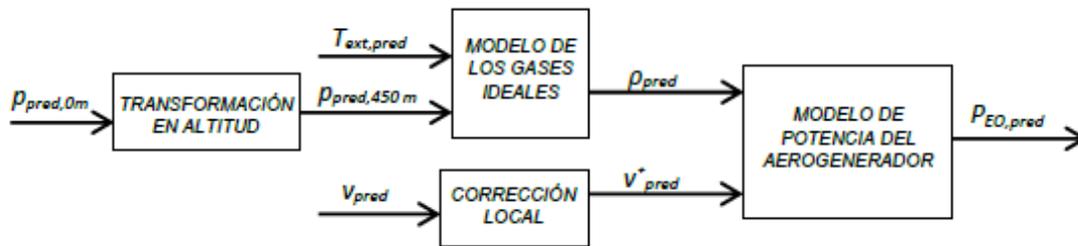


Figura 15. Proceso de predicción de la potencia generada

Fuente: (Pascual Miqueleiz, 2015)

De acuerdo a lo mencionado, la ecuación (3.2) representa la forma de obtención de la potencia obtenida por la turbina eólica (P_{EO}), esta es generada por aerogeneradores que transforman la energía cinética del viento en eléctrica, de tal forma que a medida que aumenta la velocidad del viento la potencia eólica generada crece al cubo de la misma.

$$P_{EO} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (3.2)$$

Donde P_{EO} representa la potencia teórica que se puede extraer del flujo de aire, ρ_{aire} es la densidad del aire, A es el área barrida por las palas del aerogenerador, v es la velocidad del viento y C_p (coeficiente de potencia) es el factor que relaciona la potencia del viento que llega a las palas del generador con la potencia eléctrica generada por el mismo en función de su velocidad.

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA ENERGÉTICA.

4.1 Introducción

Este capítulo se enfoca en el diseño del controlador de lógica difusa para el sistema de gestión energética de intercambio de potencia entre dos microrredes. Para ello se establecen el número de entradas y salidas que intervendrán en la estrategia de gestión, y a partir de estas se realiza la base de reglas que rige el funcionamiento del FLC. Por último se realiza el diagrama de interconexión de las microrredes para el EMS propuesto y el ajuste de la base de reglas del FLC.

4.2 Descripción de los sistemas

Las microrredes utilizadas para el presente proyecto se componen de un sistema de energía renovable (RES), un sistema de almacenamiento de energía (ESS) y de cargas domésticas.

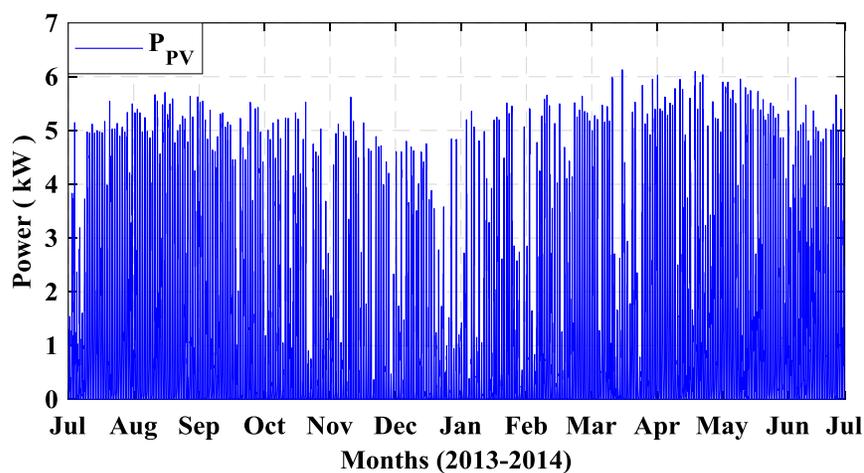
4.2.1 Microrred 1

La primera microrred (MG1) presenta las siguientes características: un perfil de potencia fotovoltaica generada con pico máximo de 6 kW (Figura 16a) y un perfil de potencia eólica generada con pico máximo de 4 kW (Figura 16b), además un ESS compuesto por un banco de baterías de plomo-ácido cuya capacidad es de 72kWh, un *SOC* de la batería comprendida entre su límites máximo y mínimo, SOC_{MIN} y SOC_{MAX} respectivamente, para preservar la vida útil de la batería:

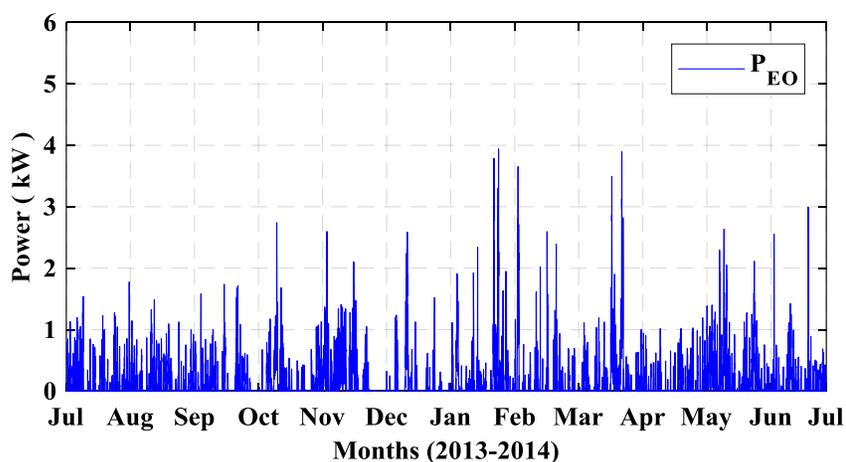
$$SOC_{MIN} \leq SOC(n) \leq SOC_{MAX} \quad (4.1)$$

$$SOC_{MIN} = (1 - DOD) \cdot SOC_{MAX} \quad (4.2)$$

Donde DOD es la profundidad de descarga de la batería, y se considera para este estudio un DOD máximo del 50% ya que la vida útil para este tipo de baterías se reduce cuando funciona a niveles altos de DOD (Diego Arcos-Aviles et al., 2016). Por último la MG1 presenta una potencia de demanda de carga residencial con un pico máximo de consumo de 6kW (Figura 17).



(a)



(b)

Figura 16. Perfil de potencia generada por el sistema de MG1: (a) Fotovoltaico, (b) Eólico.

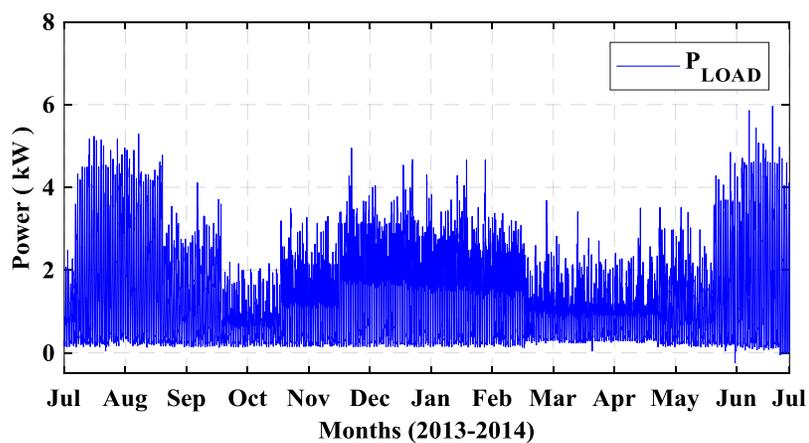


Figura 17. Perfil de potencia de la carga residencial para MG1.

En la Figura 18 se muestra el *SOC* de la batería y el perfil de potencia intercambiada con la red para la MG1, donde el *SOC* oscila al 75% de su capacidad de almacenamiento y el perfil de potencia intercambiada con la red, presenta los índices de calidad de la Tabla 3.

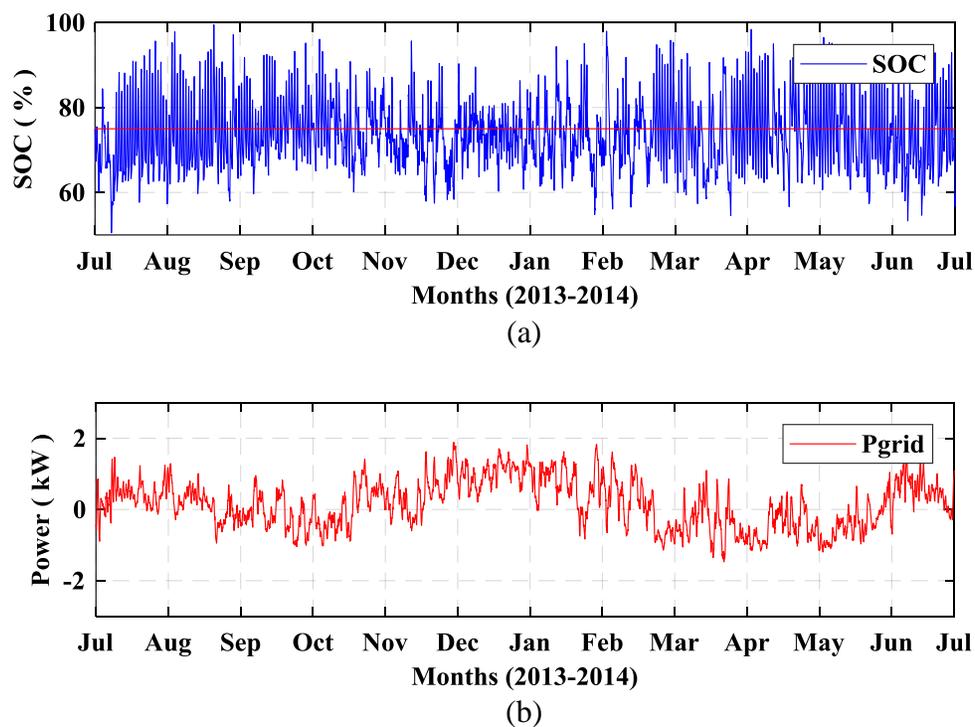


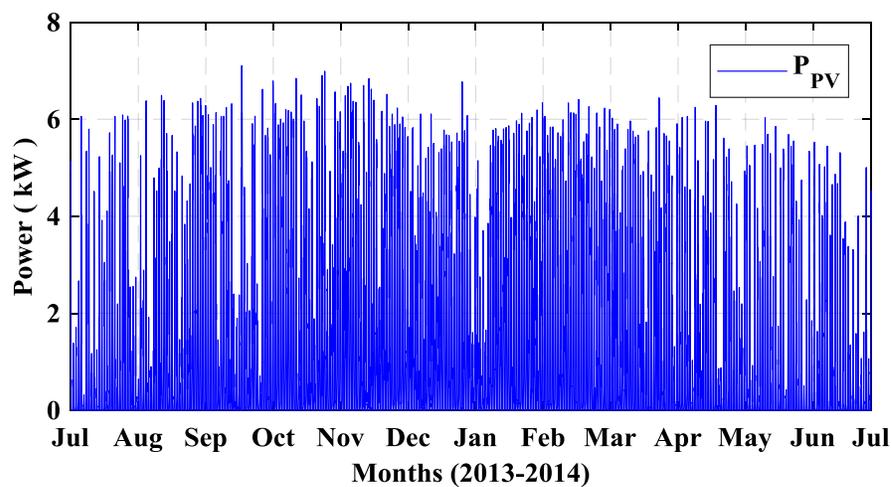
Figura 18. Perfiles de potencia de MG1: (a) *SOC* de la batería, (b) perfil de potencia de red.

Tabla 3*Índices de calidad para la MG1*

$P_{GL,MAX}$ (kW)	$P_{GL,MIN}$ (kW)	MPD (W/h)	APD (W/h)	PPV
1.89	-1.48	480.5	51.79	2.76

4.2.2 Microrred 2

La MG2 toma de referencia la EMS y los perfiles de potencia de generación y consumo de la MG1, sin embargo estos perfiles han sido modificados con la finalidad de obtener un perfil de red distinta a la MG1, y así poder visualizar de mejor manera el intercambio de potencia entre las MGs. Es así que la MG2 presenta una potencia fotovoltaica generada con pico máximo de 7.1kW (Figura 19a), una potencia eólica generada con pico máximo de 4.6kW (Figura 19b), y una carga residencial con un pico máximo de consumo de 2.8kW (Figura 20).



(a)

CONTINÚA →

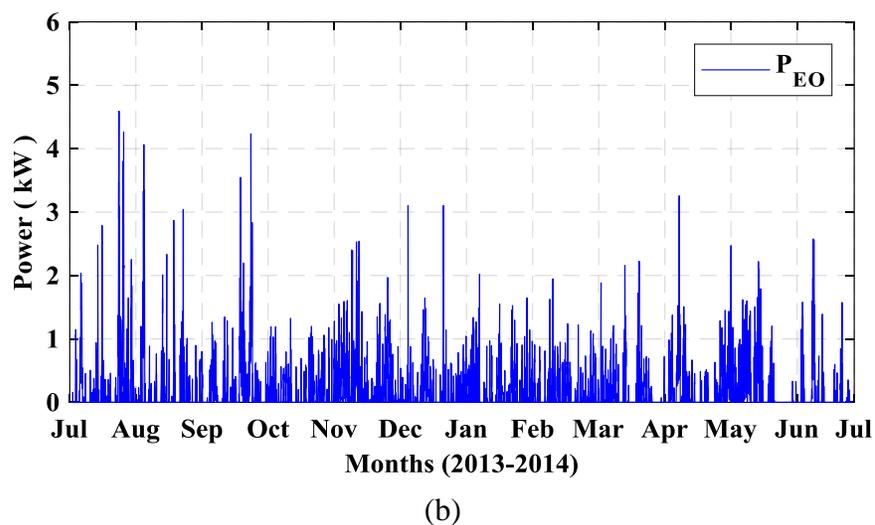


Figura 19. Perfil de potencia generada por el sistema de MG2: (a) Fotovoltaico, (b) Eólico.

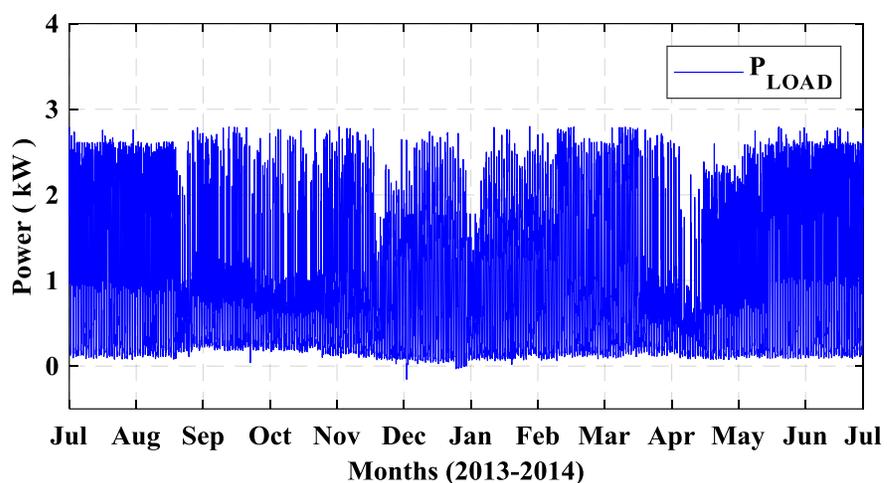


Figura 20. Perfil de potencia de la carga residencial para MG2.

Para finalizar la Figura 21 muestra el comportamiento del *SOC* de la batería y el perfil de red para la MG2, donde al igual que en la MG1, el *SOC* oscila alrededor del 75% de su capacidad de almacenamiento, y el perfil de potencia de red presenta los índices de calidad de la Tabla 4.

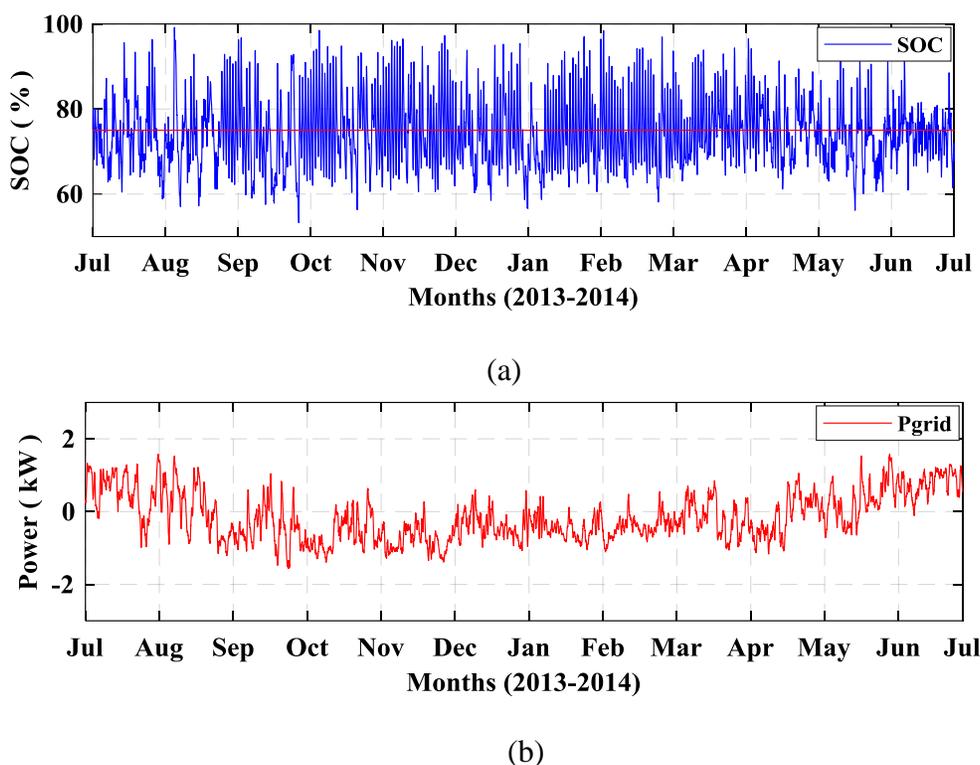


Figura 21. Perfiles de potencia de MG2: (a) SOC de la batería, (b) perfil de potencia de red.

Tabla 4

Índices de calidad para la MG2

$P_{G2,MAX}$ (kW)	$P_{G2,MIN}$ (kW)	MPD (W/h)	APD (W/h)	PPV
1.58	-1.67	503.97	52.50	3.19

4.3 Diseño del EMS basado en controlador FLC

4.3.1 Política de Control

La estrategia de gestión energética para el intercambio de potencia basado en FLC (EMS-EXG) pretende intercambiar potencia entre las MGs y con ello mejorar sus prestaciones individuales al trabajar de manera conjunta. Esto se evidencia al suavizar el perfil de potencia de red y al reducir el valor de los índices de calidad en las MGs. Para lograr estos objetivos el EMS- EXG propuesto

analiza las variables P_{GRID} , SOC y P_{CTR} de las dos MGs y aplica los siguientes casos de intercambio de potencia:

1. El primer caso de intercambio de potencia se produce de la MG1 a la MG2, cuando el perfil de red de la MG1 es negativo y el perfil de red de la MG2 es positivo. Es así que el perfil de red negativo de MG1 indicaría que existe excedente de potencia generada y el perfil positivo de MG2 indicaría el déficit de potencia generada. Por lo tanto, se sustraerá una cantidad de potencia del perfil de red de la MG1 y se la sumará al perfil de red de la MG2, con esto se reduce el perfil de red negativo de la MG1 y el perfil de red positivo de la MG2.
2. El segundo caso de intercambio de potencia se produce de la MG2 a la MG1, cuando el perfil de red de la MG2 es negativo y el perfil de red de la MG1 es positivo. De esta manera el perfil de negativo de MG2 indicaría que existe excedente en la generación de potencia y el perfil positivo de MG1 indicaría el déficit en la generación de potencia. Por lo tanto, se sustraerá una cantidad de potencia del perfil de red de la MG2 y se la sumará al perfil de red de la MG1, es así como se logra reducir el perfil de red negativo de la MG2 y el perfil de red positivo de la MG1.

Ahora si el perfil de red de la MG1 y de la MG2 son negativos, indicarían que existe excedente en la generación de potencia de cada MG, por tal motivo se incorpora al análisis el estado de carga de la batería (SOC), para conocer el estado actual de carga/descarga de la batería, y la potencia neta promedio (P_{CTR}) para predecir el comportamiento futuro de las MGs. De acuerdo a lo mencionado se tiene el tercer, cuarto, quinto y sexto caso de intercambio de potencia:

3. Para el tercer caso la MG1 inyectará parte de su potencia a la MG2 cuando: el SOC de la batería de MG1 se encuentre con una capacidad de carga alta (87.5% a 100%), el SOC de la batería de MG2 presente una capacidad de carga baja (50% al 62.5%), la P_{CTR} de la MG1 presente un perfil

de potencia negativo, por lo que indicaría la posibilidad de generación de potencia y la P_{CTR} de MG2 presente un perfil de potencia positivo, que indicaría la posibilidad de demandar potencia de la red eléctrica.

4. Para el cuarto caso la MG1 aportará parte de su potencia a la MG2 cuando: el SOC de la batería de MG1 se encuentre con una capacidad de carga alta (87.5% a 100%), el SOC de la batería de MG2 presente una capacidad de carga baja (50% al 62.5%), la P_{CTR} de la MG1 y MG2 presenten un perfil de potencia negativo.
5. Para el quinto caso la MG2 inyectará parte de su potencia a la MG1 cuando: el SOC de la batería de MG2 se encuentre con una capacidad de carga alta (87.5% a 100%), el SOC de la batería de MG1 presente una capacidad de carga baja (50% al 62.5%), la P_{CTR} de la MG2 presente un perfil de potencia negativo y la P_{CTR} de MG1 presente un perfil de potencia positivo.
6. Para el sexto caso la MG2 aportará parte de su potencia a la MG1 cuando: el SOC de la batería de MG2 se encuentre con una capacidad de carga alta (87.5% a 100%), el SOC de la batería de MG1 presente una capacidad de carga baja (50% al 62.5%), la P_{CTR} de la MG2 y MG1 presenten un perfil de potencia negativo.

Para el tercer y cuarto caso, el intercambio de potencia se produce de la MG1 a la MG2 al sustraer parte del excedente de potencia presente en el perfil de red de la MG1 e inyectarla a la batería de la MG2, con ello se reduce el perfil de red negativo de la MG1 y se aporta a la carga del SOC de la batería de la MG2. Para el quinto y sexto caso, el intercambio de potencia se produce de la MG2 a la MG1 al sustraer parte del excedente de potencia del perfil de red de la MG2 e inyectarla a la batería de la MG1, con ello se reduce el perfil de red negativo de la MG2 y se aporta a la carga del SOC de la batería de la MG1.

4.3.2 Diagrama de bloques de control

El diagrama de bloques del EMS- EXG propuesto se muestra en la

Figura 22, donde se identifican los siguientes bloques:

BLK1 y BLK2 son los bloques correspondientes a las microrredes MG1 y MG2 respectivamente, donde se encuentran P_{GRID1_X} (4.3) y P_{GRID2_X} (4.4) que son las potencias de los perfiles de red antes de efectuar el intercambio energético, SOC_1 y SOC_2 es el estado de carga de las baterías, P_{CTR1} (4.5) y P_{CTR2} (4.6) es la potencia neta promedio.

$$P_{GRID1_X}(n) = P_{CTR1}(n) + P_{SOC1}(n) + P_{FLC1}(n) \quad (4.3)$$

$$P_{GRID2_X}(n) = P_{CTR2}(n) + P_{SOC2}(n) + P_{FLC2}(n) \quad (4.4)$$

$$P_{CTR1}(n) = [P_{LG1}^{12H}(n) + P_{LG,FC1}^{12H}(n)] / 2 \quad (4.5)$$

$$P_{CTR2}(n) = [P_{LG2}^{12H}(n) + P_{LG,FC2}^{12H}(n)] / 2 \quad (4.6)$$

$$P_{LG1}^{12H}(n) = \frac{1}{M_{12}} \sum_{k=1}^{M_{12}} P_{LG1}(n-k) \quad (4.7)$$

$$P_{LG2}^{12H}(n) = \frac{1}{M_{12}} \sum_{k=1}^{M_{12}} P_{LG2}(n-k) \quad (4.8)$$

$$P_{LG,FC1}^{12H}(n) = \frac{1}{M_{12}} \sum_{k=1}^{M_{12}} P_{LG,FC1}(n+k) \quad (4.9)$$

$$P_{LG,FC2}^{12H}(n) = \frac{1}{M_{12}} \sum_{k=1}^{M_{12}} P_{LG,FC2}(n+k) \quad (4.10)$$

Donde P_{SOC1} y P_{SOC2} es la potencia del lazo de control de la batería correspondiente a MG1 y MG2, P_{FLC1} y P_{FLC2} es la potencia obtenida por la estrategia EMS-FC, P_{LG1}^{12H} (4.7) y P_{LG2}^{12H} (4.8) es la potencia neta promedio de las 12 horas anteriores de la MG1 y MG2, $P_{LG,FC1}^{12H}$ (4.9) y $P_{LG,FC2}^{12H}$ (4.10) es el valor de la predicción de la potencia neta promedio de las siguientes 12 horas de la MG1 y MG2, M_{12} es el número de muestras en 12 horas, P_{LG1} y P_{LG2} es la potencia neta de MG1 y MG2, $P_{LG,FC1}$ y $P_{LG,FC2}$ es la predicción de potencia neta de la MG1 y MG2, las variables mencionadas se describen en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017).

Luego, P_{BAT1} y P_{BAT2} , es la potencia de la batería obtenida después del intercambio de potencia de MG1 y MG2 y se define por las ecuaciones (4.11) y (4.12) respectivamente.

$$P_{BAT1}(n) = P_{BAT1_X}(n) + P_{XIB2}(n) \quad (4.11)$$

$$P_{BAT2}(n) = P_{BAT2_X}(n) + P_{XIB1}(n) \quad (4.12)$$

$$P_{BAT1_X}(n) = P_{LG1}(n) - P_{GRID1}(n) \quad (4.13)$$

$$P_{BAT2_X}(n) = P_{LG2}(n) - P_{GRID2}(n) \quad (4.14)$$

Donde P_{BAT1_X} (4.13) y P_{BAT2_X} (4.14) es la potencia de las baterías antes del intercambio energético de MG1 y MG2 respectivamente, P_{XIB1} (4.24) y P_{XIB2} (4.25) es la cantidad de potencia sustraída del perfil de red negativo de P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} , para ser intercambiada hacia la potencia de la batería P_{BAT2_X} y P_{BAT1_X} , por último P_{GRID1} (4.26) y P_{GRID2} (4.27), es el perfil de potencia de red después del intercambio energético para MG1 y MG2.

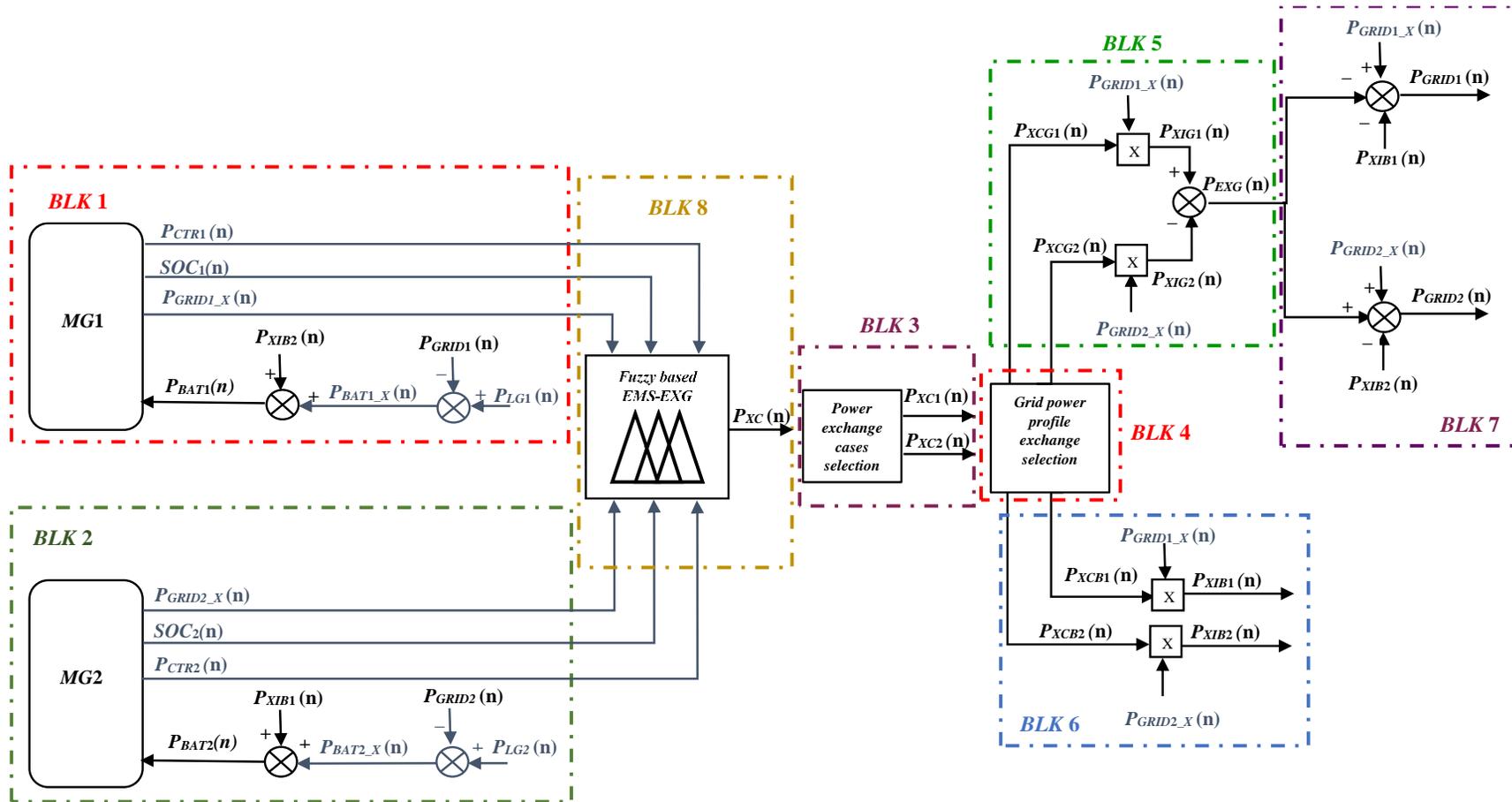


Figura 22. Diagrama de bloques del EMS-EXG de intercambio de potencia propuesto.

EL bloque BLK3 (*Power exchange cases selection*), define las variables P_{XC1} (4.15) y P_{XC2} (4.16) que toman el valor de P_{XC} de acuerdo a los casos de intercambio de potencia.

$$P_{XC1} = \begin{cases} P_{XC} & , P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} > 0 \\ & P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } P_{GRID1_X} > 0 \\ 0 & , \text{otros} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$P_{XC2} = \begin{cases} P_{XC} & , P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_1 > 87.5\% \text{ y } SOC_2 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR1} < 0 \text{ y } P_{CTR2} > 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_1 > 87.5\% \text{ y } SOC_2 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR1} < 0 \text{ y } P_{CTR2} < 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_2 > 87.5\% \text{ y } SOC_1 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR2} < 0 \text{ y } P_{CTR1} > 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_2 > 87.5\% \text{ y } SOC_1 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR2} < 0 \text{ y } P_{CTR1} < 0 \\ 0 & , \text{otros} \end{cases} \quad (4.16)$$

Donde P_{XC} es el porcentaje de potencia dado por el controlador FLC y que será extraído del perfil de red negativo del P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} , y cuyo valor será otorgado a P_{XC1} y P_{XC2} al cumplirse cualquiera de los casos de intercambio de potencia. Ahora si P_{GRID1_X} o P_{GRID2_X} no cumplen los casos de intercambio de potencia las variables P_{XC1} y P_{XC2} toman el valor de cero y no se realiza el proceso de intercambio.

El bloque BLK4 (*Grid power profile exchange selection*), define cuál perfil de red, (P_{GRID1_X} o P_{GRID2_X}) efectuará el intercambio de potencia de acuerdo al signo de P_{XC1} y P_{XC2} . De este modo, si P_{XC1} y P_{XC2} son negativos indicaría que el perfil de red P_{GRID1_X} , aportará parte de su potencia a la MG2, por lo que P_{XCG1} (4.17) y P_{XCB1} (4.19) tomarían el valor de P_{XC1} y P_{XC2} respectivamente.

Ahora, si P_{XC1} y P_{XC2} son positivos indicaría que el perfil de red P_{GRID2_X} , aportará parte de su potencia a la MG1, por lo que P_{XCG2} (4.18) y P_{XCB2} (4.20) tomarían el valor de $-P_{XC1}$ y $-P_{XC2}$ respectivamente de acuerdo a los casos de intercambio de potencia. Por último si las variables P_{XC1} y P_{XC2} toman el valor de cero indicaría que ninguna MG realizará intercambio de potencia.

$$P_{XCG1} = \begin{cases} P_{XC1} & , P_{XC1} < 0 \\ 0 & , P_{XC1} \geq 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$P_{XCG2} = \begin{cases} -P_{XC1} & , P_{XC1} > 0 \\ 0 & , P_{XC1} \leq 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$P_{XCB1} = \begin{cases} P_{XC2} & , P_{XC2} < 0 \\ 0 & , P_{XC2} \geq 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

$$P_{XCB2} = \begin{cases} -P_{XC2} & , P_{XC2} > 0 \\ 0 & , P_{XC2} \leq 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

Donde P_{XCG1} y P_{XCB1} , es el porcentaje de potencia que será sustraído del P_{GRID1_X} de acuerdo al valor de P_{XC1} y P_{XC2} . P_{XCG2} y P_{XCB2} , es el porcentaje de potencia que será sustraído del P_{GRID2_X} de acuerdo al valor de P_{XC1} y P_{XC2} .

El bloque BLK5 define el valor de P_{EXG} (4.21), correspondiente a la cantidad de potencia a ser intercambiada entre P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} .

$$P_{EXG}(n) = P_{XIG1}(n) - P_{XIG2}(n) \quad (4.21)$$

$$P_{XIG1}(n) = P_{XCG1}(n) \cdot P_{GRID1_X}(n) \quad (4.22)$$

$$P_{XIG2}(n) = P_{XCG2}(n) \cdot P_{GRID2_X}(n) \quad (4.23)$$

Donde P_{XIG1} , es la cantidad de potencia sustraída del P_{GRID1_X} de acuerdo al porcentaje dado en P_{XCG1} y que será inyectada al P_{GRID2_X} de la MG2. P_{XIG2} , es la cantidad de potencia sustraída del P_{GRID2_X} de acuerdo al porcentaje dado en P_{XCG2} y que será inyectada al P_{GRID1_X} de la MG1.

En el bloque BLK6, se calculan las variables P_{XIB1} (4.24) y P_{XIB2} (4.25):

$$P_{XIB1}(n) = P_{XCB1}(n) \cdot P_{GRID1_X}(n) \quad (4.24)$$

$$P_{XIB2}(n) = P_{XCB2}(n) \cdot P_{GRID2_X}(n) \quad (4.25)$$

Donde P_{XIB1} , es la cantidad de potencia sustraída del P_{GRID1_X} de acuerdo al porcentaje dado por P_{XCB1} y que será inyectada al P_{BAT2_X} de la MG2. P_{XIB2} , es la cantidad de potencia sustraída del P_{GRID2_X} de acuerdo al porcentaje dado en P_{XCB2} y que será inyectada al P_{BAT1_X} de la MG1.

El bloque BLK7, corresponde a la obtención de los perfiles de potencia de red P_{GRID1} (4.26) y P_{GRID2} (4.27), después de realizar el intercambio de potencia.

$$P_{GRID1} = P_{GRID1_X} - P_{EXG}(n) - P_{XIB1}(n) \quad (4.26)$$

$$P_{GRID2} = P_{GRID2_X} + P_{EXG}(n) - P_{XIB2}(n) \quad (4.27)$$

El intercambio de potencia de P_{GRID1} a P_{GRID2} (o viceversa), se producirá a través de P_{EXG} cuando se cumpla el primer y segundo caso de intercambio, por lo que P_{XIB1} y P_{XIB2} tomarán un valor nulo y no serán tomados en cuenta en el proceso de intercambio. Si el intercambio de potencia se produce de la MG1 a la MG2, P_{EXG} sustrae parte de la potencia de P_{GRID1_X} y la entrega a P_{GRID2_X} por lo que reducirá las fluctuaciones negativas y positivas presentes en P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} respectivamente; el mismo criterio se aplica cuando la MG2 intercambia potencia a la MG1.

Por otro lado, si se cumple del tercero al sexto caso de intercambio de potencia la variable P_{EXG} se vuelve nula y no intervendrá en el proceso de intercambio, de este modo las variables P_{XIB1} y P_{XIB2} sustraerán parte de la potencia excedente en P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} , y con ello se reducirán las fluctuaciones negativas presentes en P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} . Si no se cumple ninguno de los casos descritos las MGs no intercambiarán potencia, por lo que las variables P_{EXG} , P_{XIB1} y P_{XIB2} toman un valor nulo.

El último bloque BLK8, es el controlador FLC usado para el intercambio de potencia a través del análisis de P_{GRID1_X} , P_{GRID2_X} , SOC_1 , SOC_2 , P_{CTR1} y P_{CTR2} de las MGs, a la salida del FLC se obtiene la variable P_{XC} que corresponde al porcentaje de potencia que será sustraído de P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} correspondientes a la MG1 y MG2 respectivamente.

Por último en la Figura 23 y Figura 24 se muestra el diagrama de flujo que regirá el proceso de control del EMS-EXG propuesto para el intercambio energético, de acuerdo a la política de control y a las variables mencionadas en la presente sección.

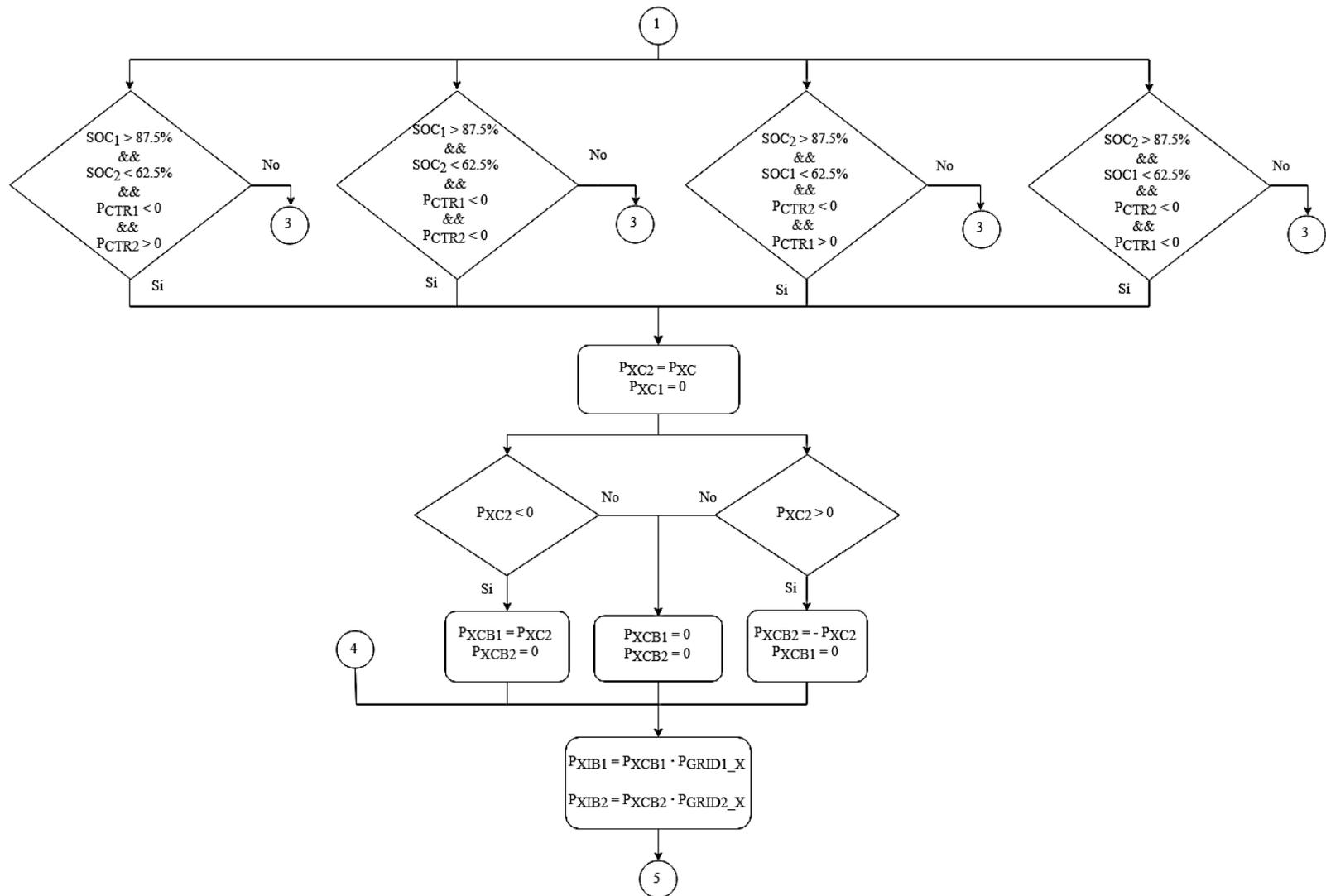


Figura 24. Diagrama de flujo del EMS-EXG de intercambio de potencia entre baterías.

4.3.3 Diseño del controlador FLC

El diseño del FLC busca mejorar el perfil de red y optimizar los índices de calidad de la MG, a través del intercambio de potencia entre las MGs. Para lograrlo, la estrategia de intercambio establece las variables de entrada y salida del controlador de lógica difusa mencionada en (4.3.1 Política de Control), ya que es necesario conocer aquellas variables que estén ligadas al intercambio de potencia y que permitan suavizar el perfil de red de las MGs. Además se propone usar como mecanismo de inferencia el método de Mamdani por mínimos, dado que posee una estructura simple donde se fuzzifican las variables de entrada, se evalúan las reglas de acuerdo a los antecedentes, se agrega la conclusión de cada regla y se produce la defuzzificación, este último paso se lo efectuará por el método del centroide por ser el más utilizado.

4.3.3.1 Entradas

Como ya se mencionó en la sección anterior el controlador FLC del EMS-EXG propuesto usa como entradas el P_{GRID1_X} , P_{GRID2_X} , SOC_1 , SOC_2 , P_{CTR1} y P_{CTR2} de las dos MGs, de esta manera se tiene seis entradas que se definen como los antecedentes del FLC:

- Perfil de red previo al intercambio energético (P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X}), ayudarán a determinar si las MGs presentan excedente o déficit de potencia generada de acuerdo a las fluctuaciones que se presenta en su perfil.
- Estado de carga de las baterías (SOC_1 y SOC_2), indica la capacidad de carga disponible en la batería de la MG1 y MG2 en un rango de carga del 50% al 100%.
- Potencia neta promedio (P_{CTR1} y P_{CTR2}), variable que determina la posibilidad de que la MG1 o MG2 presente generación o demanda de potencia a futuro.

Una vez establecidos los antecedentes, se definen las funciones de pertenencia (MF) para cada variable de entrada, y cada MF tiene dos subconjuntos difusos señalados como NB y PB, donde B es “Grande”, N es “Negativo” y P es “Positivo”. Por último, las MFs se distribuyen a lo largo del rango de variación de cada entrada, de esta manera se toman los valores máximos y mínimos del P_{GRID} , SOC y P_{CTR} de las dos MGs para establecer el rango de fuzzificación en el cual actuarán las entradas del FLC, ver Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5

Valores máximo y mínimo del perfil de red de cada microrred

	$P_{G,MIN}$ (kW)	$P_{G,MAX}$ (kW)
Microrred 1	-1.49	1.89
Microrred 2	-1.67	1.58

En la Tabla 5 se observa que los valores difieren para las dos microrredes por lo que se propone aumentar los valores a 2 kW para la $P_{GRID MAX}$ y -1.7 kW para la $P_{GRID MIN}$ para el caso que estas aumenten de magnitud durante el proceso de obtención del perfil de red.

Tabla 6

Valores máximo y mínimo de la P_{CTR} y SOC de la microrredes

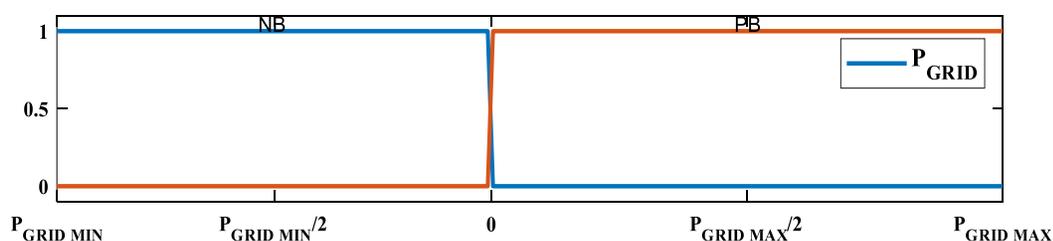
	$P_{CTR,MIN}$ (kW)	$P_{CTR,MAX}$ (kW)	SOC_{MIN} (%)	SOC_{MAX} (%)
Microrred 1	-1.49	1.59	50%	100%
Microrred 2	-1.63	1.26	50%	100%

Ahora se definen las funciones de pertenencia de las entradas:

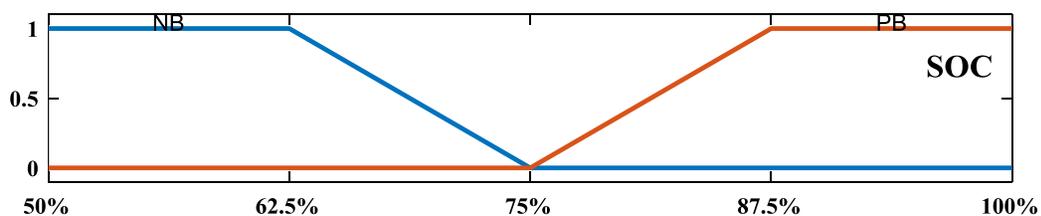
- El P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} , poseen dos funciones de pertenencia (Figura 25a): NB (Negativo Grande) que se encargará de indicar el excedente de potencia generada, y PB (Positivo Grande)

encargada de indicar el déficit de potencia generada de la MG. Las funciones de pertenencia son de tipo trapezoidal dado que se pretende analizar todas las fluctuaciones negativas y positivas correspondientes al perfil de red y con ello otorgar las condiciones de intercambio de potencia.

- El SOC_1 y SOC_2 , (Figura 25b) tienen dos funciones de pertenencia de forma trapezoidal que servirá para conocer si el SOC de las baterías se encuentra en un nivel de carga bajo- medio (62.5% al 75%), bajo (50% al 62.5%), o se encuentra en un nivel de carga medio- alto (75% al 87.5%), alto (87.5 % al 100%). De este modo NB (Negativo Grande) implica que el SOC de la batería está en un nivel medio hasta su valor bajo y PB (Positivo Grande) que el SOC de la batería está en un nivel medio hasta su valor alto.
- Por último P_{CTR1} y P_{CTR2} , (Figura 25c), tienen dos funciones de pertenencia: NB (Negativo Grande) que indica la posibilidad de generar potencia y PB (Positivo Grande) que indica la posibilidad que la MG demande potencia, al igual que en los casos anteriores las MFs son de tipo trapezoidal y servirán para conocer cuando la MG generará gran cantidad de potencia (P_{CTR_MIN} a $P_{CTR_MIN}/2$) o demandará gran cantidad de la misma ($P_{CTR_MAX}/2$ a P_{CTR_MAX}).



(a)



(b)

CONTINÚA ➡

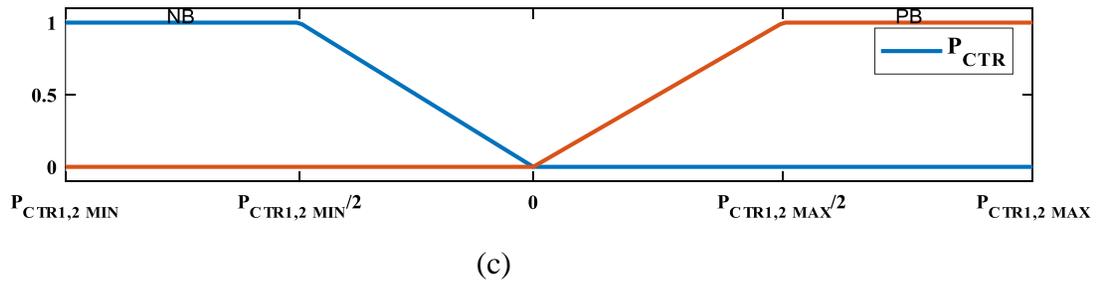


Figura 25. Funciones de pertenencia de las entradas del controlador.

(a) MFs para el P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} , (b) MFs para el SOC_1 y SOC_2 , (c) MFs para la P_{CTR1} y P_{CTR2} de las MGs.

4.3.3.2 Salida

La salida del controlador FLC estará gobernada por la variable P_{XC} e indicará el porcentaje de potencia intercambiada por el P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} de las microrredes, además sus funciones de pertenencia (Figura 26a) son tres, de tipo trapezoidal para NB y PB y de tipo triangular para ZE. El rango de fuzzificación será definida por dos variables P_{IG1} y P_{IG2} , que corresponderán al porcentaje de potencia intercambiado por MG1 y MG2 respectivamente, así se pretende intercambiar hasta el 13% de la potencia presente en el excedente de los perfiles de red de las MGs.

La selección de la forma trapezoidal de las funciones de pertenencia es para entregar el máximo de potencia cuando el resultado del centroide se encuentre en el rango de $(P_{IG1}$ a $P_{IG1} / 3)$ y $(P_{IG2} / 3$ a $P_{IG2})$, con esto se pretende suavizar las fluctuaciones positivas y negativas del perfil de red que presenten mayor magnitud; por otra parte la forma triangular es para indicar que ninguna MG va a entregar potencia. Ahora NB (Negativo Grande) indica la potencia aportada por la MG1, ZE (cero) implica que ninguna microrred realizará el intercambio y PB (Positivo Grande) indica la potencia aportada por la MG2.

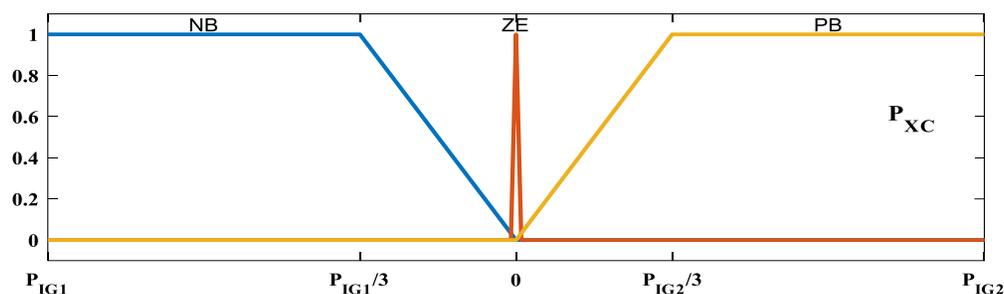


Figura 26. Funciones de pertenencia de la salida del controlador (P_{XC})

4.3.3.3 Definición de la base de reglas del controlador

Finalmente se procede a escribir la base de reglas que gobernarán el FLC. Así, el primer paso es conocer el número de reglas que intervienen en el proceso de control; para ello se multiplica el número de funciones de pertenencia de cada una de las entradas del controlador como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7

Número de funciones de pertenencia del controlador FLC

Entradas	Número de funciones de pertenencia
P_{GRID1}	2
P_{GRID2}	2
SOC_1	2
SOC_2	2
P_{CTR1}	2
P_{CTR2}	2
Total de número de reglas	64

A continuación, se procede a escribir las reglas del FLC por medio del método de inferencia de Mamdani a partir de los antecedentes de cada regla y como resultado se obtiene una conclusión, de este modo la base de reglas se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8*Base de reglas para el controlador FLC para el intercambio de energía.*

N° regla	Entradas						Salida
	P_{GRID1_X}	P_{GRID2_X}	SOC_1	SOC_2	P_{CTR1}	P_{CTR2}	P_{XC}
1	NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZE
2	NB	NB	NB	NB	NB	PB	NB
3	NB	NB	NB	NB	PB	NB	PB
4	NB	NB	NB	NB	PB	PB	ZE
5	NB	NB	NB	PB	NB	NB	PB
6	NB	NB	NB	PB	NB	PB	ZE
7	NB	NB	NB	PB	PB	NB	PB
8	NB	NB	NB	PB	PB	PB	ZE
9	NB	NB	PB	NB	NB	NB	NB
10	NB	NB	PB	NB	NB	PB	NB
11	NB	NB	PB	NB	PB	NB	ZE
12	NB	NB	PB	NB	PB	PB	ZE
13	NB	NB	PB	PB	NB	NB	ZE
14	NB	NB	PB	PB	NB	PB	ZE
15	NB	NB	PB	PB	PB	NB	ZE
16	NB	NB	PB	PB	PB	PB	ZE
17	NB	PB	NB	NB	NB	NB	NB
18	NB	PB	NB	NB	NB	PB	NB
19	NB	PB	NB	NB	PB	NB	NB
20	NB	PB	NB	NB	PB	PB	NB
21	NB	PB	NB	PB	NB	NB	NB
22	NB	PB	NB	PB	NB	PB	NB

CONTINÚA 

23	NB	PB	NB	PB	PB	NB	NB
24	NB	PB	NB	PB	PB	PB	NB
25	NB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
26	NB	PB	PB	NB	NB	PB	NB
27	NB	PB	PB	NB	PB	NB	NB
28	NB	PB	PB	NB	PB	PB	NB
29	NB	PB	PB	PB	NB	NB	NB
30	NB	PB	PB	PB	NB	PB	NB
31	NB	PB	PB	PB	PB	NB	NB
32	NB	PB	PB	PB	PB	PB	NB
33	PB	NB	NB	NB	NB	NB	PB
34	PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB
35	PB	NB	NB	NB	PB	NB	PB
36	PB	NB	NB	NB	PB	PB	PB
37	PB	NB	NB	PB	NB	NB	PB
38	PB	NB	NB	PB	NB	PB	PB
39	PB	NB	NB	PB	PB	NB	PB
40	PB	NB	NB	PB	PB	PB	PB
41	PB	NB	PB	NB	NB	NB	PB
42	PB	NB	PB	NB	NB	PB	PB
43	PB	NB	PB	NB	PB	NB	PB
44	PB	NB	PB	NB	PB	PB	PB
45	PB	NB	PB	PB	NB	NB	PB
46	PB	NB	PB	PB	NB	PB	PB
47	PB	NB	PB	PB	PB	NB	PB

CONTINÚA 

48	PB	NB	PB	PB	PB	PB	PB
49	PB	PB	NB	NB	NB	NB	ZE
50	PB	PB	NB	NB	NB	PB	ZE
51	PB	PB	NB	NB	PB	NB	ZE
52	PB	PB	NB	NB	PB	PB	ZE
53	PB	PB	NB	PB	NB	NB	ZE
54	PB	PB	NB	PB	NB	PB	ZE
55	PB	PB	NB	PB	PB	NB	ZE
56	PB	PB	NB	PB	PB	PB	ZE
57	PB	PB	PB	NB	NB	NB	ZE
58	PB	PB	PB	NB	NB	PB	ZE
59	PB	PB	PB	NB	PB	NB	ZE
60	PB	PB	PB	NB	PB	PB	ZE
61	PB	PB	PB	PB	NB	NB	ZE
62	PB	PB	PB	PB	NB	PB	ZE
63	PB	PB	PB	PB	PB	NB	ZE
64	PB	PB	PB	PB	PB	PB	ZE

A continuación se explica el proceso de control del FLC a partir de la base de reglas que intervienen en el intercambio energético, para ello se toman como ejemplo las reglas de control de la Tabla 9.

Tabla 9*Ejemplo de control de acuerdo a la base de reglas de FLC*

Entradas						Salida
P_{GRID1_X}	P_{GRID2_X}	SOC_1	SOC_2	P_{CTR1}	P_{CTR2}	P_{XC}
NB	NB	PB	NB	NB	PB	NB
PB	NB	NB	NB	PB	NB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	ZE

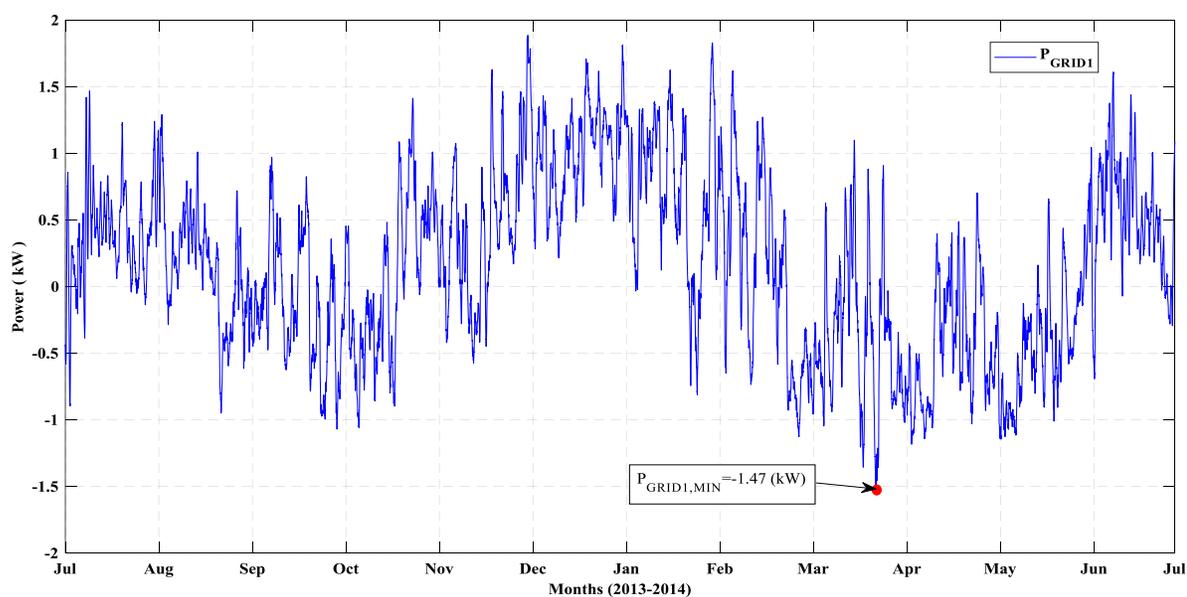
- En la primera regla se observa que el P_{GRID1_X} de MG1 y P_{GRID2_X} de MG2 presentan exceso de generación de potencia (NB), el SOC de MG1 es PB (batería cargada), el SOC de la MG2 es NB (batería descargada), la P_{CTR} de MG1 es NB (predicción de generación de potencia de MG1) y la P_{CTR} de MG2 es PB (predicción de demanda de potencia de MG2), por lo que se cumple el tercer caso de intercambio energético, entonces P_{XC} es NB que implica que el perfil de potencia de MG1 aportará energía a la potencia de la batería de la MG2. Para la segunda regla se observa que el P_{GRID1_X} de MG1 es PB (déficit de potencia generada) y P_{GRID2_X} de MG2 es NB (exceso de generación de potencia), por lo que se cumple el segundo caso de intercambio energético. De esta forma no es necesario analizar las otras variables y se procede al intercambio de potencia por parte del perfil de red de MG2 dado por PB en P_{XC} .
- En la tercera regla, el perfil de red de las MGs P_{GRID1_X} y P_{GRID2_X} presentan déficit de generación de potencia (PB) e implica que no es posible realizar el proceso de intercambio energético, por lo que la salida del controlador P_{XC} es ZE.

4.3.3.4 Ajuste de parámetros del FLC

En la Figura 27 se muestra el comportamiento del P_{GRID1} (Figura 27a) y P_{GRID2} (Figura 27b) respectivamente alcanzado con el FLC establecido, donde la potencia máxima entregada a la red

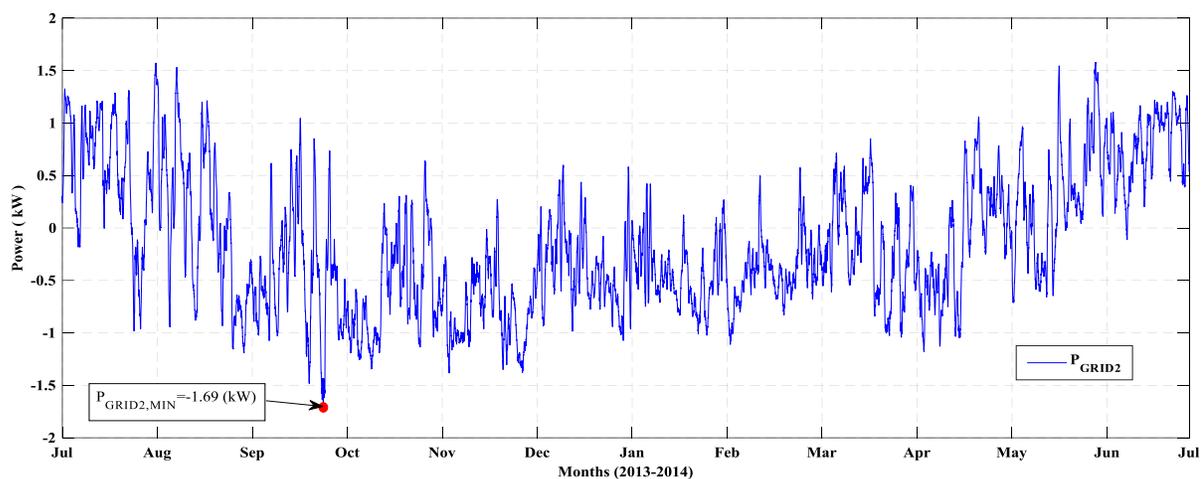
de la MG1 y MG2 alcanzan el valor de $P_{GRID1,MIN}=-1.47kW$ y $P_{GRID2,MIN}=-1.69kW$ respectivamente, es así que se observa que el valor de $P_{GRID1,MIN}$ es inferior al que se muestra en la Tabla 3 y $P_{GRID2,MIN}$ es superior al que se muestra en la Tabla 4.

De acuerdo a esto, el ajuste de parámetros del FLC se enfoca en reducir el valor de $P_{GRID2,MIN}$, para ello se propone analizar la regla que produjo el valor de $P_{GRID2,MIN}=-1.69kW$ y buscar una solución que permita reducir dicho valor; por esta razón la Tabla 10 muestra los valores alcanzados por los antecedentes del FLC en donde el $P_{GRID2,MIN}=-1.69kW$.



(a)

CONTINÚA →



(b)

Figura 27. Perfil de potencia de intercambio con la red obtenida con el EMS-EXG.

(a) P_{GRID1} de MG1, (b) P_{GRID2} de MG2

Tabla 10

Valores alcanzados por los antecedentes del FLC en $P_{GRID2, MIN}$.

	P_{GRID}	SOC	P_{CTR}
MG1	-0.98	86.71	-0.86
MG2	-1.69	90.45	-1.56

En la Tabla 10 se observa que las MGs presentan un perfil de potencia intercambiado con la red negativo (por lo que presentan excedente de potencia generada), un SOC de batería con un nivel alto de carga y un P_{CTR} negativo (indica posibilidad de generar potencia a futuro), sin embargo se observa que la P_{CTR} de la MG2 va a generar más potencia que la MG1, el SOC de la batería de MG2 es más alto que el alcanzado por la MG1 y el P_{GRID} de la MG1 es más bajo en relación al $P_{GRID1, MIN} = -1.47 kW$. Por esta razón se propone que el P_{GRID2} de la MG2 intercambie potencia a la MG1 ya que MG2 presenta más generación de potencia, y de esta manera lograr reducir el

$P_{GRID2,MIN}$ de la MG2 y aumentar el SOC de MG1, es así que de acuerdo a los antecedentes, la regla del FLC a modificar es la número trece cuya salida P_{XC} tendrá la MF igual a PB (ver Tabla 11).

Tabla 11

Ajuste de la base de reglas correspondiente al FLC de la EMS propuesta

N° regla	Entradas						Salida
	P_{GRID1_X}	P_{GRID2_X}	SOC_1	SOC_2	P_{CTR1}	P_{CTR2}	P_{XC}
13	NB	NB	PB	PB	NB	NB	PB

Como resultado del ajuste de las reglas del FLC, se obtiene un séptimo caso de intercambio de potencia que ocurre cuando:

- El perfil de red es negativo en las MGs, el SOC de la batería de MG1 se encuentre con una capacidad de carga alta (87.5% a 100%), el SOC de la batería de MG2 presente una capacidad de carga alta (87.5% a 100%) y la P_{CTR} de las MGs presentan un perfil de potencia negativo por lo que indicaría la posibilidad de generación de potencia. De este modo se modifica la ecuación (4.16) y la variable P_{XC2} tomaría el valor de P_{XC} de acuerdo a (4.28).

$$P_{XC2} = \begin{cases} P_{XC} & , P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_1 > 87.5\% \text{ y } SOC_2 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR1} < 0 \text{ y } P_{CTR2} > 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_1 > 87.5\% \text{ y } SOC_2 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR1} < 0 \text{ y } P_{CTR2} < 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_2 > 87.5\% \text{ y } SOC_1 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR2} < 0 \text{ y } P_{CTR1} > 0 \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_2 > 87.5\% \text{ y } SOC_1 < 62.5\% \text{ y } P_{CTR2} < 0 \text{ y } P_{CTR1} < 0, \\ & P_{GRID1_X} < 0 \text{ y } P_{GRID2_X} < 0 \text{ y } SOC_1 > 87.5\% \text{ y } SOC_2 > 87.5\% \text{ y } P_{CTR1} < 0 \text{ y } P_{CTR2} < 0 \\ 0 & , otros \end{cases} \quad (4.28)$$

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

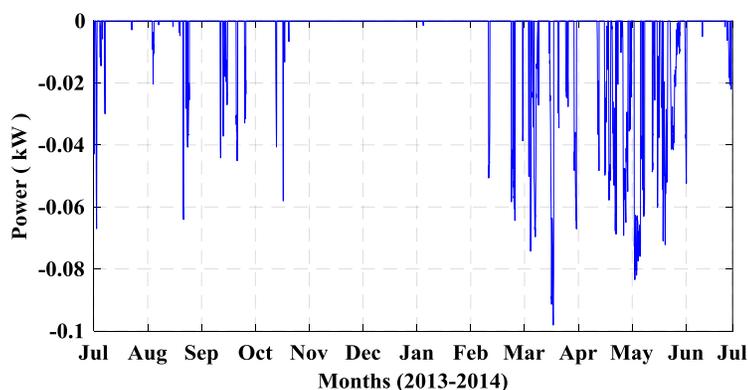
5.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas de la simulación del EMS-EXG, aplicada a datos históricos de generación y consumo de potencia, tomados desde julio de 2013 a julio de 2014. Aquí se compara el comportamiento de las microrredes de la estrategia descrita en (Diego Arcos-Aviles et al., 2017) con el EMS-EXG de intercambio energético. Se discuten los resultados alcanzados en los perfiles de red, el comportamiento del *SOC* de las baterías y por último se analiza los índices de calidad alcanzados en las MGs.

5.2 Pruebas y Resultados

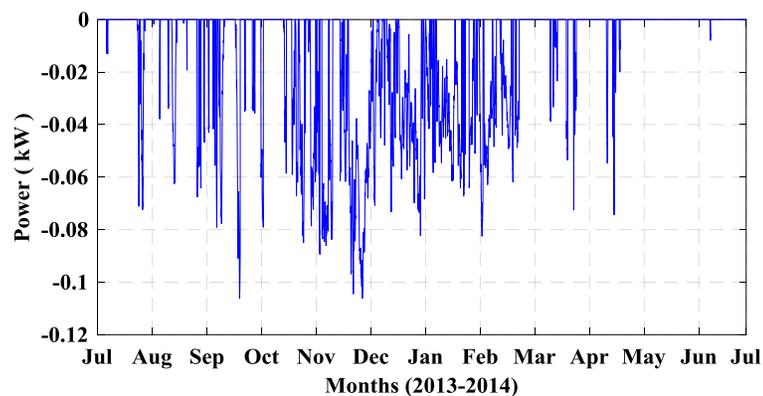
5.2.1 Intercambio energético obtenido a partir de los perfiles de red.

En esta sección se muestra los resultados obtenidos de la estrategia propuesta, al realizar el intercambio energético, únicamente a través del análisis de los perfiles de red de las MGs. En la Figura 28 se observa el perfil de potencia intercambiada entre las microrredes, donde se puede notar que la MG2 es la que mayor potencia aporta al intercambio (Figura 28b), debido a la baja demanda de sus cargas (Figura 20) en comparación a la MG1.



(a)

CONTINÚA →



(b)

Figura 28. Potencia intercambiada por los perfiles de red.
 (a) Potencia intercambiada por la MG1, (b) Potencia intercambiada por la MG2.

Tras realizarse el intercambio entre las MGs, en la Figura 29 y Figura 30 se puede notar la cantidad de potencia disminuida de los picos positivos y negativos de los perfiles de red, pertenecientes a la MG1 y MG2 respectivamente.

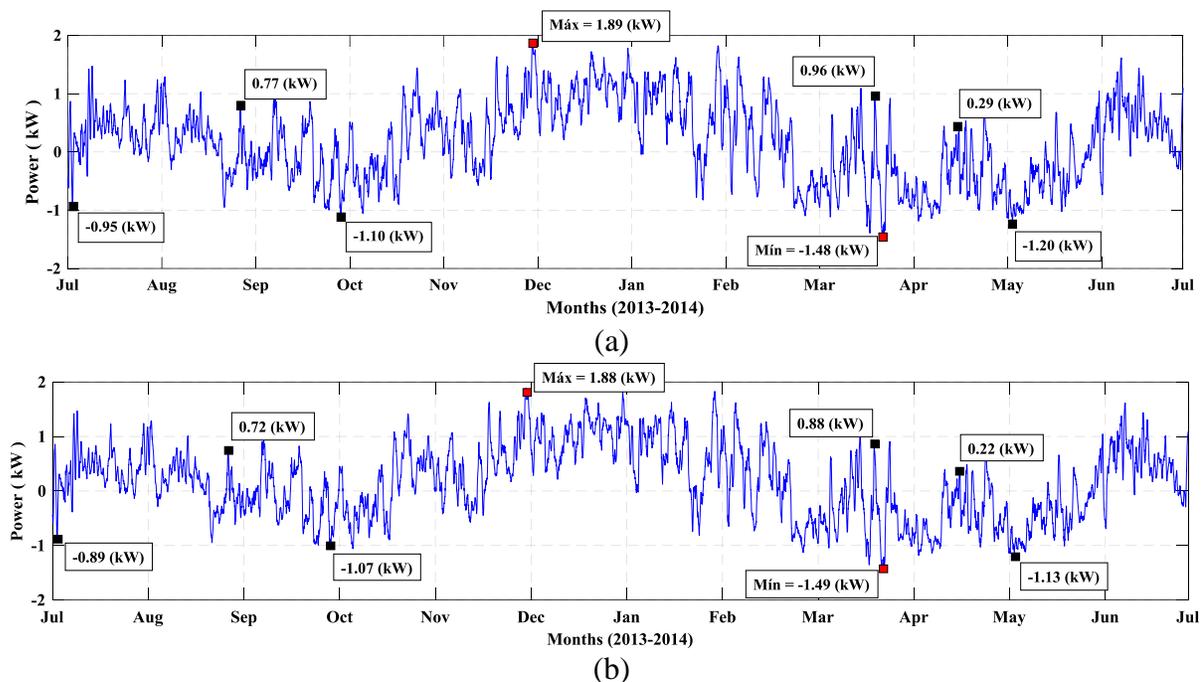


Figura 29. Comparación del perfil de potencia de red de MG1, con el intercambio.
 (a) P_{GRID} original, (b) P_{GRID} al aplicarse el EMS-EXG.

Así se logra disminuir los picos de potencia máxima entregadas por la red, que son de: $P_{G, MAX} = 1.88$ (kW) para MG1 (Figura 29b) y $P_{G, MAX} = 1.57$ (kW) para MG2 (Figura 30b), sin embargo no se nota una reducción en la potencia máxima absorbida por la red para MG1: $P_{G, MIN} = -1.49$ (kW) (Figura 29b), y se aprecia un aumento para la MG2, donde $P_{G, MIN} = -1.68$ (kW) (Figura 30b), respecto a los perfiles de red originales.

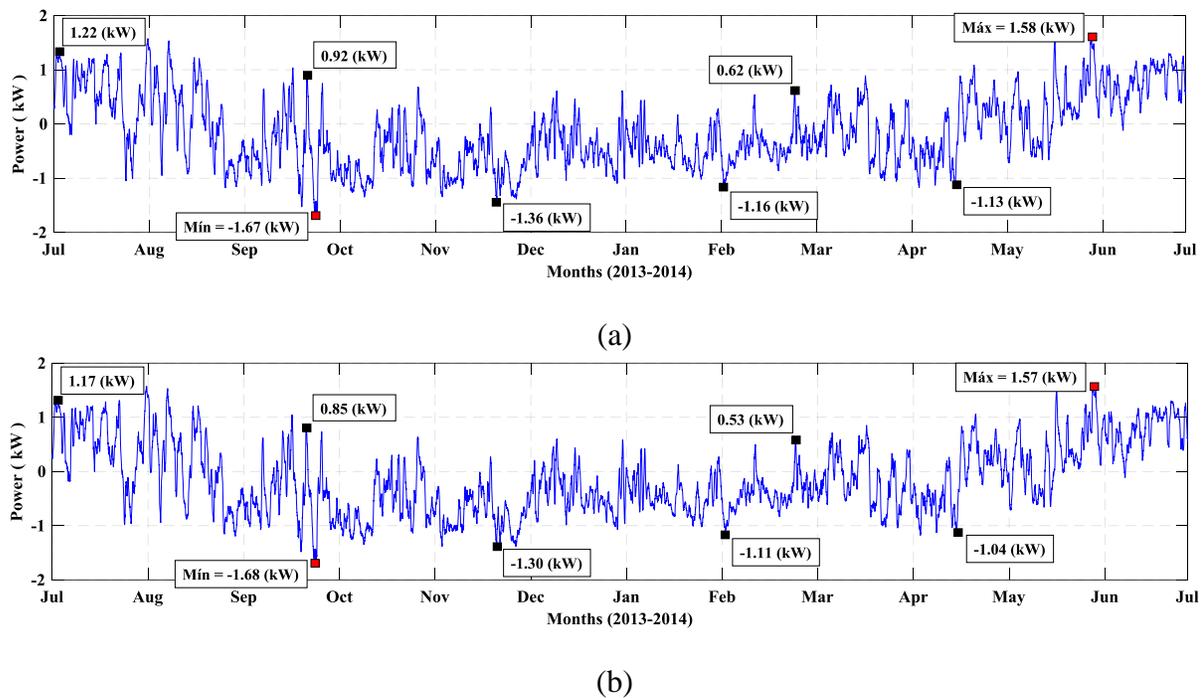


Figura 30. Comparación del perfil de potencia de red de MG2, con el intercambio.
(a) P_{GRID} original, (b) P_{GRID} al aplicarse el EMS-EXG.

En la Figura 31 y Figura 32 se ilustra el comportamiento del perfil del SOC promedio diario (SOC_{AVG}) alcanzado por el EMS-EXG propuesto durante el año de estudio, en estas se observa la variación (carga y descarga) del SOC provocado por el intercambio de potencia desde los perfiles de red. Para el caso del SOC_{AVG} de la MG1 el EMS-EXG propuesto alcanza un promedio de carga del 73.59%, este valor se ve reducido en comparación con el alcanzado sin aplicar el EMS propuesto de alrededor del 73.85%.

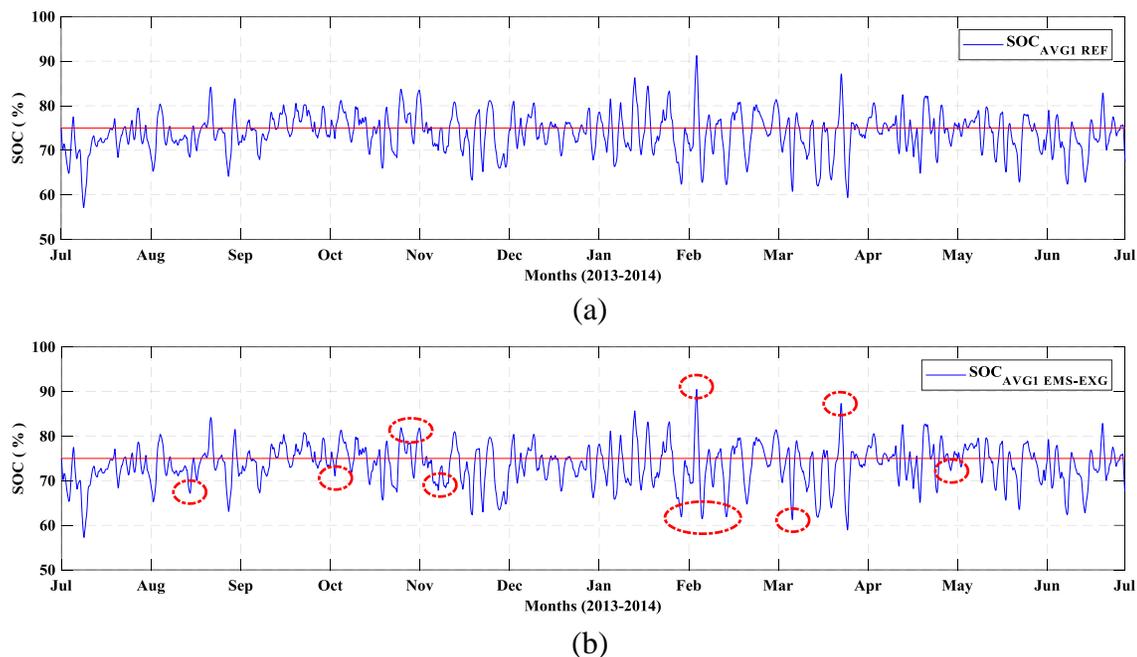
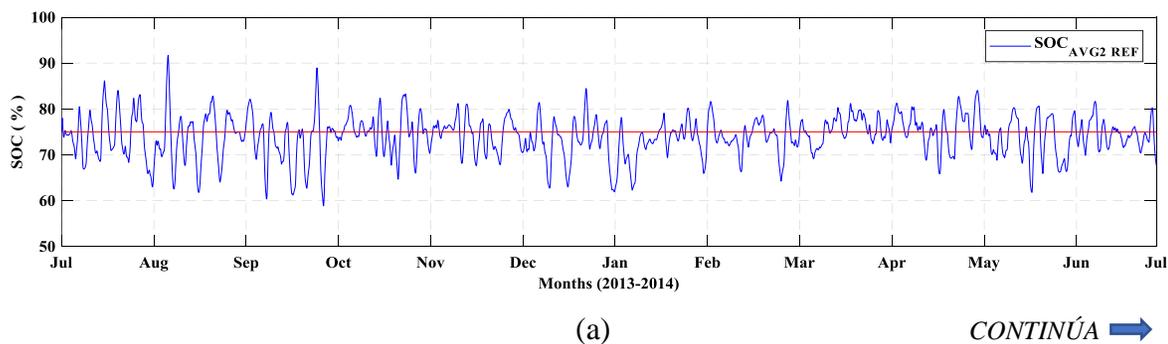


Figura 31. Comparación del SOC_{AVG} MG1, al intercambiar potencia entre perfiles de red.
 (a) SOC_{AVG} original, (b) SOC_{AVG} de intercambio.

Para el caso del SOC de la MG2, este alcanza un promedio de carga del 74.29% en el año de estudio que contrasta con un promedio del 74.05% alcanzado sin ejecutar el EMS-EXG propuesto.



CONTINÚA →

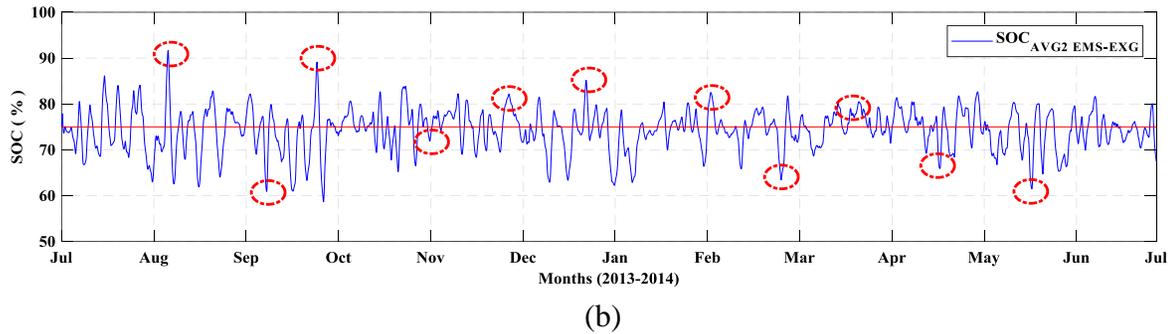
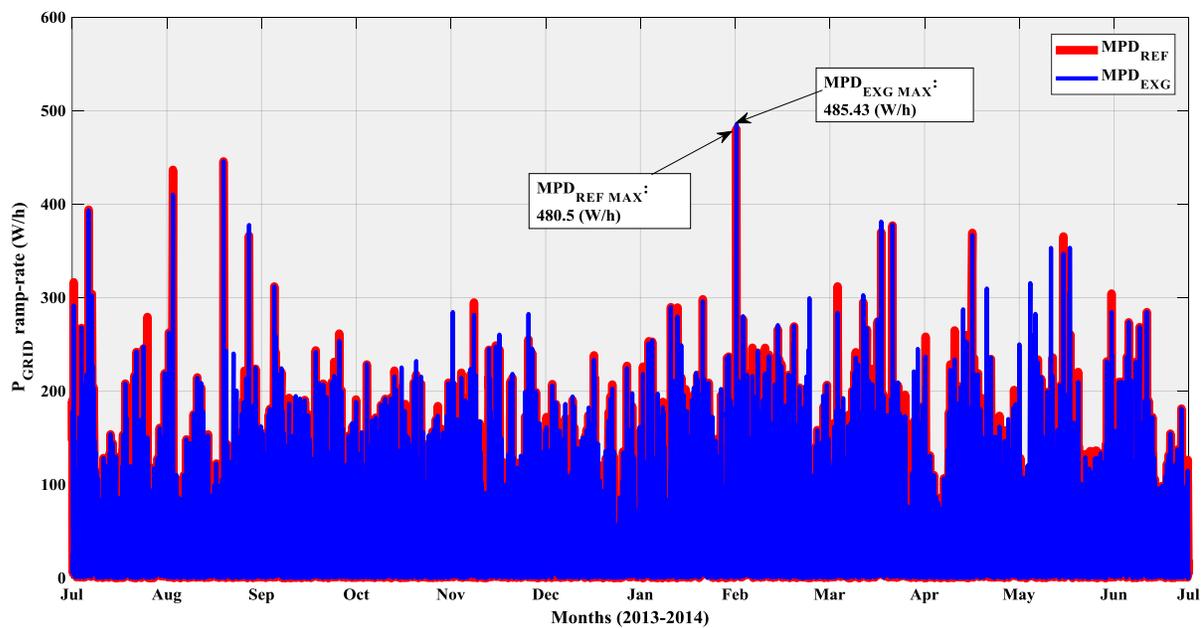


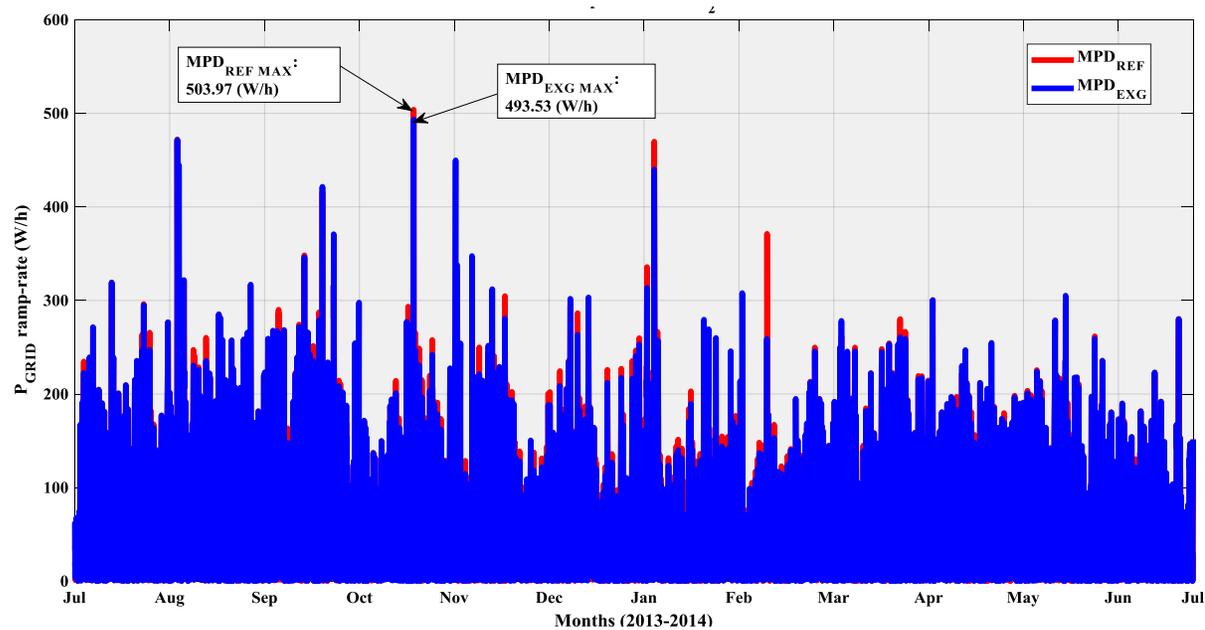
Figura 32. Comparación del SOC_{AVG} MG2, al intercambiar potencia entre perfiles de red. (a) SOC_{AVG} original, (b) SOC_{AVG} de intercambio.

De acuerdo al SOC_{AVG} promedio alcanzado por las dos MGs se observa que el intercambio de potencia a través de los perfiles de red beneficia en la carga del SOC de la MG2, a pesar que esta microrred es la que mayor cantidad de potencia inyecta al perfil de red de la MG1. Esto sucede debido a que la estrategia EMS-FC de cada MG mantiene el SOC de la batería en los límites seguros y por ello el SOC de las microrredes oscilan al 75% (línea roja continua) durante el año de estudio.

Para la Figura 33 se analiza el índice de calidad MPD , alcanzado por las MGs a lo largo del año de estudio, para MG1 (Figura 33a) se aprecia que el MPD incrementa su magnitud con un valor máximo de 485.43 W/h (línea azul continua) comparada con su valor original previo al intercambio de potencia con 480.5 W/h (línea roja continua). Por otro lado la MG2 (Figura 33b) presenta una reducción del MPD de 493.53 W/h alcanzada con el EMS-EXG propuesto, comparada con el valor original de 503.97 W/h.



(a)



(b)

Figura 33. Comparación del MPD máxima entre las MGs, con el EMS-EXG.
 (a) MPD para MG1, (b) MPD para MG2.

El intercambio energético a través de los perfiles de red de las MGs, ha logrado una reducción en la magnitud de ciertos índices de calidad mostrados de la Tabla 12 donde se observa la disminución de los índices $P_{G,MAX}$, APD y PPV para las dos MGs, sin embargo se aprecia un incremento de $P_{G,MIN}$ para las dos MGs y un incremento del MPD para la MG1, esto se debe a que la MG2 posee un mayor excedente de generación de potencia (perfil de red negativo) en su perfil de red, respecto a la MG1, por lo que no sería necesario que la MG1 aporte parte de su potencia a la MG2. Por este motivo se añadió otro criterio para el intercambio en la sección 5.2.2, que permita reducir dichos índices de calidad.

Tabla 12

Comparación de los índices de calidad de EMS-FC vs EMS-EXG.

MG1	$P_{G,MAX}$ (kW)	$P_{G,MIN}$ (kW)	MPD (W/h)	APD (W/h)	PPV
EMS-FC	1.89	-1.48	480.50	51.79	2.76
EMS-EXG	1.88	-1.49	485.43	51.55	2.68
MG2	$P_{G,MAX}$ (kW)	$P_{G,MIN}$ (kW)	MPD (W/h)	APD (W/h)	PPV
EMS-FC	1.58	-1.67	503.97	52.50	3.19
EMS-EXG	1.57	-1.68	493.53	51.50	3.09

Por último, en la Tabla 13 se puede observar que la mayor cantidad de potencia intercambiada la lleva a cabo el perfil de red de la MG2 en comparación con MG1, ya que la MG2 presenta una mayor generación de energía y menor consumo por parte de sus cargas.

Tabla 13

Beneficio de potencia alcanzada por las MGs a partir de sus perfiles de red.

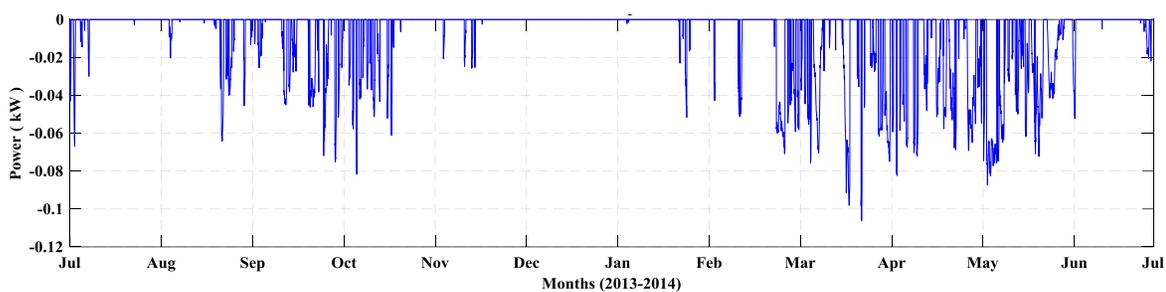
Microrred	Potencia intercambiada (kW)
MG1	91.70
MG2	111.72

Para esta sección, se concluye que el intercambio de potencia únicamente a través del análisis de los perfiles de red de las MGs, no alcanza a cumplir todos los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, sin bien es cierto se logra el intercambio energético entre las MGs, no se disminuye de forma considerable las fluctuaciones positivas y negativas presentes en los perfiles de red y tampoco se reduce el valor de todos los índices de calidad, por este motivo se plantea añadir a la estrategia, el análisis del *SOC* de las baterías y la predicción de la generación de potencia en las MGs.

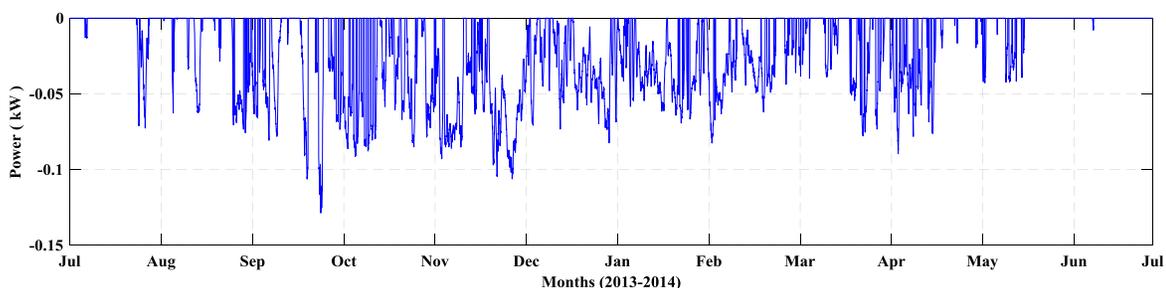
5.2.2 Intercambio energético obtenido a partir de los perfiles de red, el *SOC* de las baterías y la predicción de generación de potencia.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la estrategia EMS-EXG propuesta, al realizar el intercambio energético a través del análisis de los perfiles de red, y añadir el análisis del *SOC* de las baterías y la predicción de la generación de potencia de las MGs.

La Figura 34 se observa la salida del controlador FLC donde se puede notar que la MG2 es la que mayor potencia aporta al intercambio de potencia (Figura 34b) debido a la baja demanda de sus cargas (Figura 20) y a la mayor generación de sus fuentes renovables (Figura 19), lo que le permite obtener una reserva considerable de potencia para el intercambio, respecto a la MG1.



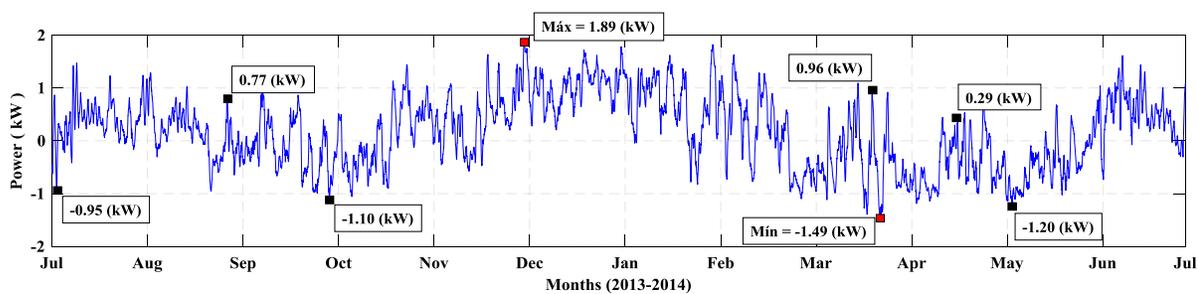
(a)



(b)

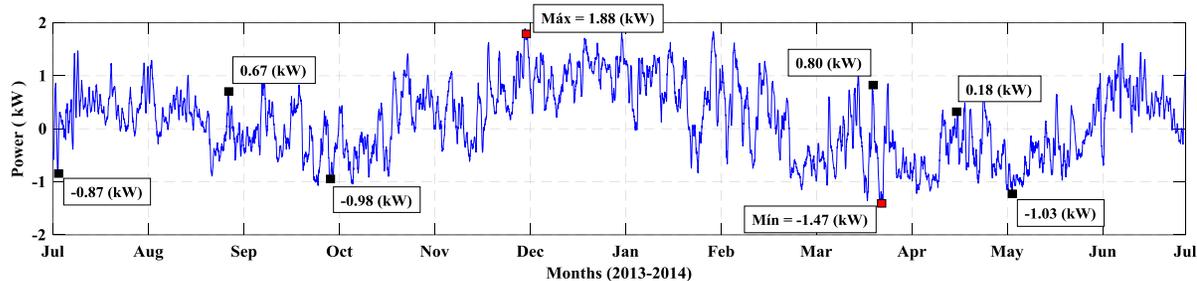
Figura 34. Potencia intercambiada por el P_{RED} , SOC de las baterías y la P_{CTR} de las MGs.
 (a) Potencia intercambiada por la MG1, (b) Potencia intercambiada por la MG2.

Tras realizarse el intercambio entre las MGs, en la Figura 35 y Figura 36 se puede notar que la estrategia propuesta reduce el número de fluctuaciones y el valor de los picos de potencia (negativos y positivos) del perfil de red con respecto al original, pertenecientes a la MG1 y MG2 respectivamente.



(a)

CONTINÚA →

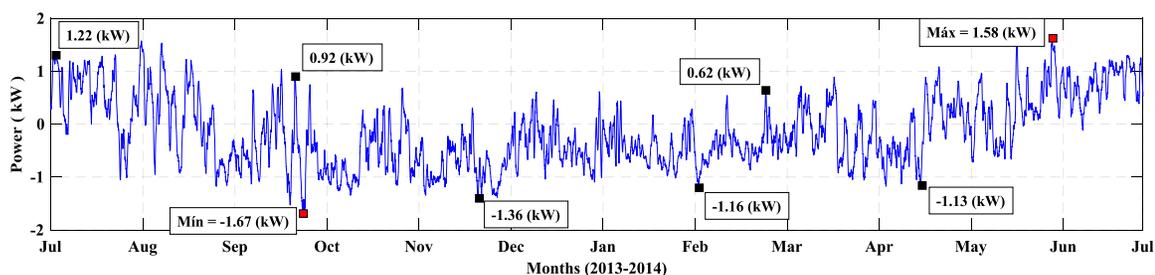


(b)

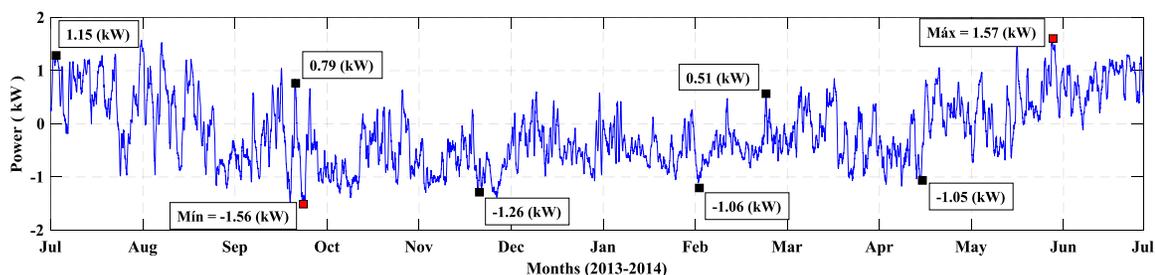
Figura 35. Comparación del perfil de potencia de red de MG1, con el intercambio.

(a) P_{GRID} original, (b) P_{GRID} al aplicarse el EMS-EXG.

Así se logra disminuir los picos de potencia máxima entregadas por la red, que son de: $P_{G, MAX} = 1.88$ (kW) para MG1 (Figura 35b) y $P_{G, MAX} = 1.57$ (kW) para MG2 (Figura 36b), además de la reducción en la potencia máxima absorbida por la red para MG1: $P_{G, MIN} = -1.47$ (kW) (Figura 35b), y para MG2: $P_{G, MIN} = -1.56$ (kW) (Figura 36b), respecto a los perfiles de red originales.



(a)

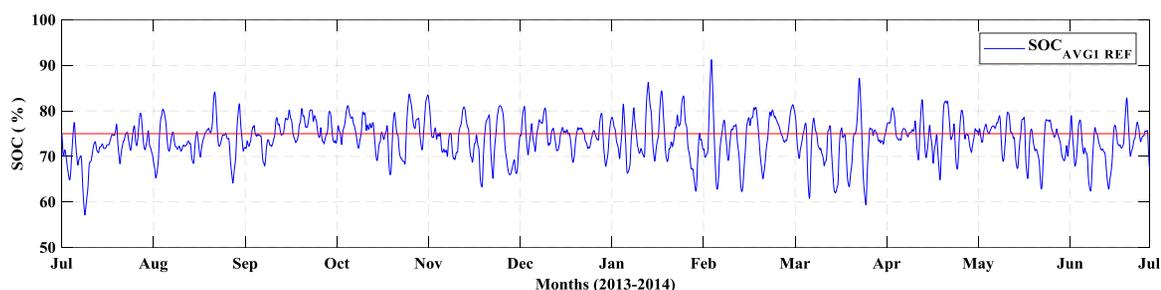


(b)

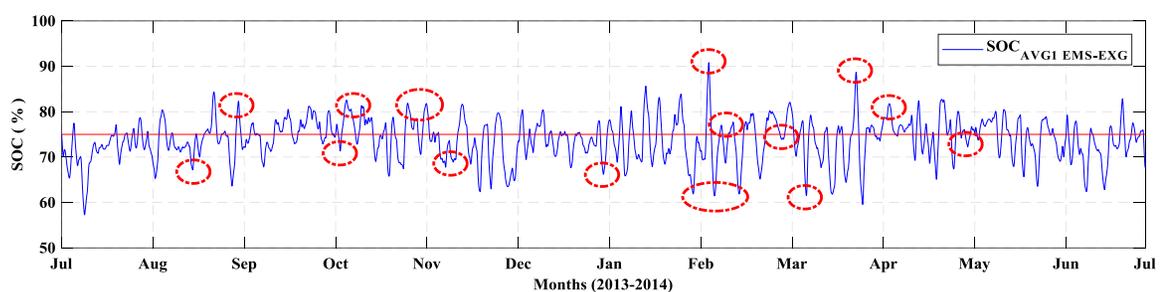
Figura 36. Comparación del perfil de potencia de red de MG2, con el intercambio.

(a) P_{GRID} original, (b) P_{GRID} al aplicarse el EMS-EXG.

En la Figura 37b y Figura 38b, se ilustra el comportamiento del perfil del SOC promedio diario (SOC_{AVG}) alcanzado por el EMS-EXG propuesto durante el año de estudio para la MG1 y MG2 respectivamente, en estas se aprecia al SOC con más variaciones comparada con las alcanzadas en la Figura 31b y Figura 32b. Para el caso del SOC_{AVG} de la MG1 el EMS propuesto alcanza un promedio de carga del 73.83%, más alta que la presentada en la sección 5.2.1 con un 73.59%, que contrasta con el valor de referencia de alrededor del 73.85%.



(a)



(b)

Figura 37. Comparación del SOC_{AVG} de MG1, al aplicar la estrategia EMS-EXG.
(a) SOC_{AVG} original, (b) SOC_{AVG} de intercambio.

En el caso del SOC_{AVG} de la MG2, la batería alcanza un promedio de carga del 74.54%, mayor al alcanzado en la sección 5.2.1 de 74.29%, y del valor de referencia sin ejecutar el EMS-EXG que es del 74.05%.

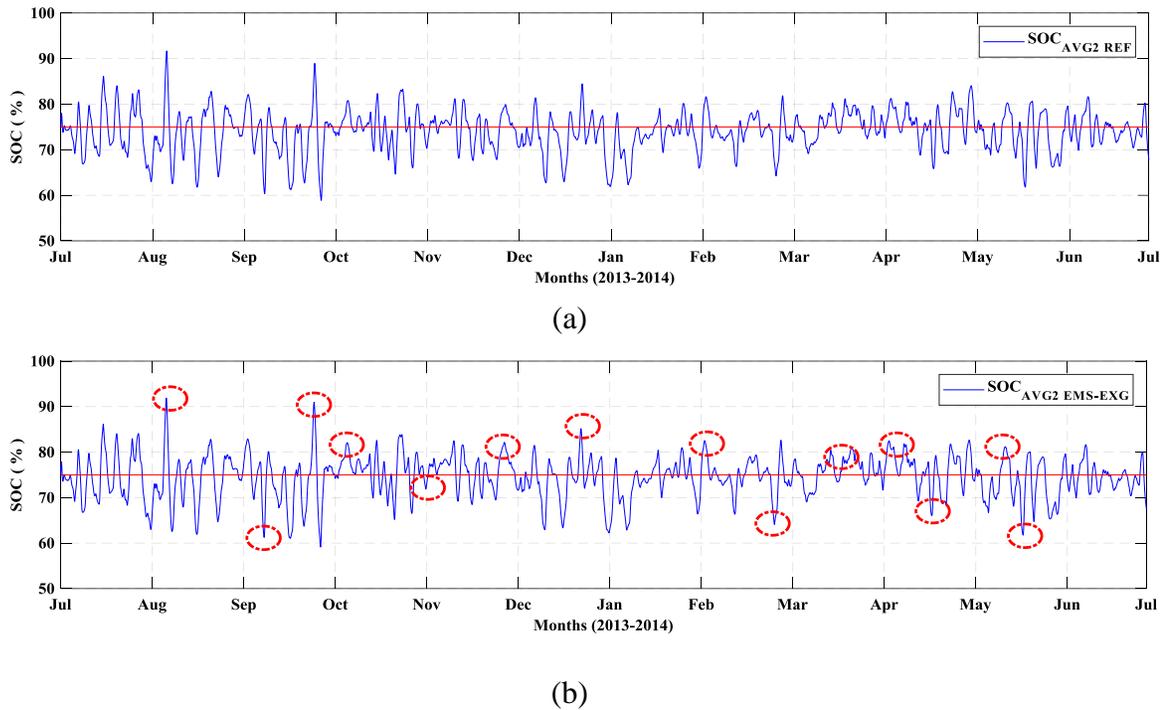
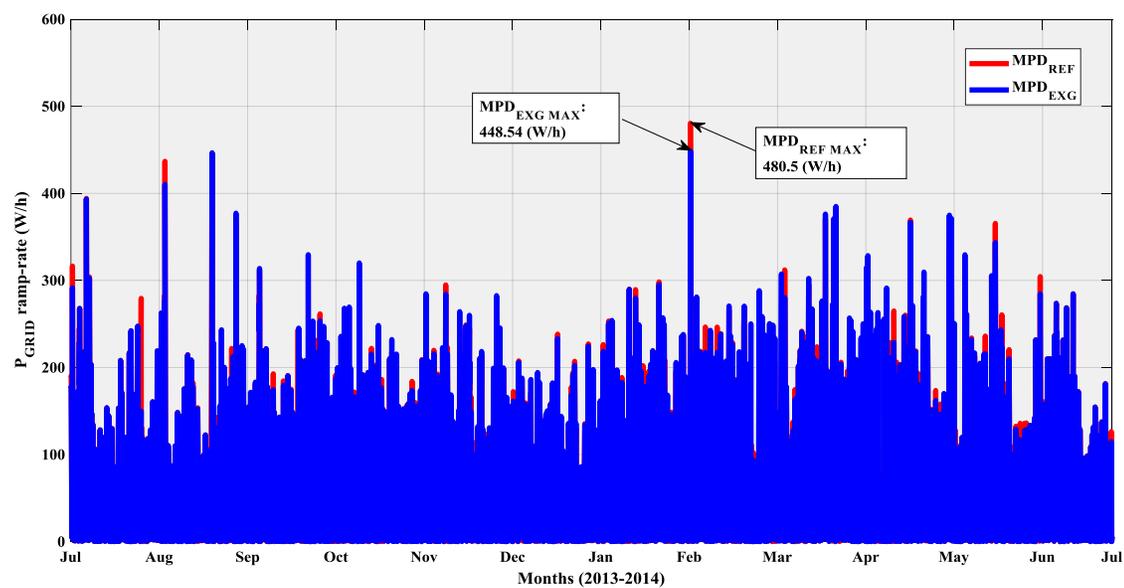


Figura 38. Comparación del SOC_{AVG} de MG1, al aplicar la estrategia EMS-EXG.
 (a) SOC_{AVG} original, (b) SOC_{AVG} de intercambio.

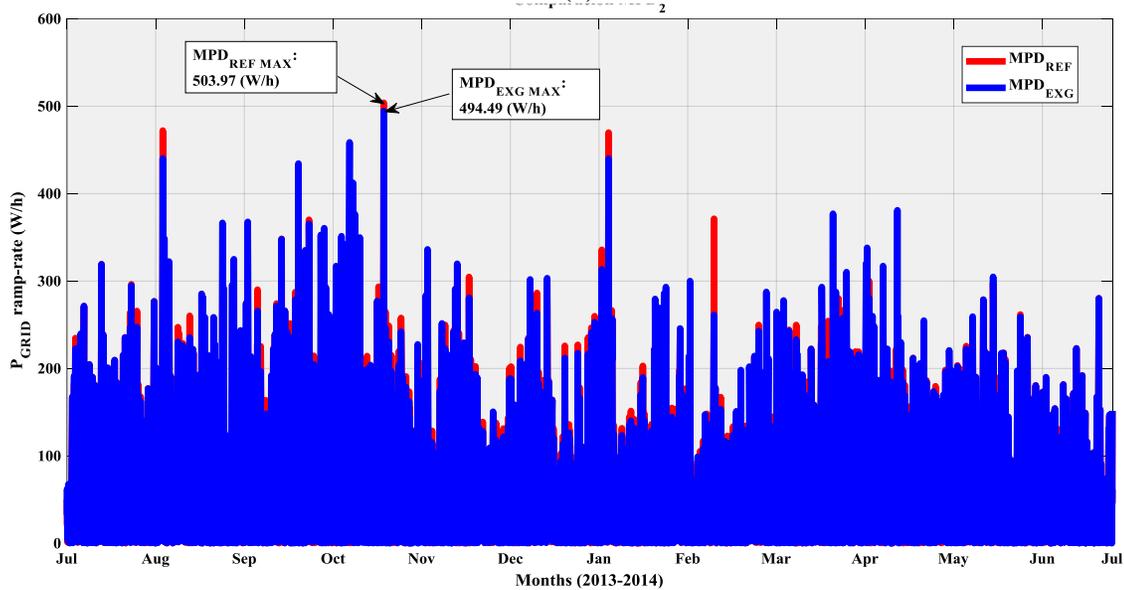
Al igual que en el intercambio de potencia a través de los perfiles de red (sección 5.2.1), el SOC de la baterías oscilan al 75% de su carga (línea roja continua) para el año de estudio. Sin embargo, al obtener el promedio de carga de las mismas, se nota el incremento en el SOC de las baterías, lo cual mostraría el aporte de potencia de los perfiles de red negativo de las MGs.

La Figura 39 muestra el índice de calidad MPD a lo largo del año de estudio, como se puede notar la estrategia de intercambio reduce la rampa de potencia de la red con respecto a la estrategia alcanzada por (Diego Arcos-Aviles et al., 2017). Para la MG1 (Figura 39a) el MPD disminuye su magnitud con un valor máximo de 448.54 W/h (línea azul continua) comparada con el valor original, antes del intercambio de 480.5 W/h (línea roja continua). De igual manera la MG2 (Figura 39b) presenta una disminución del MPD de 494.49 W/h, comparada con el MPD original con un

valor de 503.97 W/h. La reducción de las tasas de rampa de potencia de la red conduce a una mejor calidad en el perfil de potencia intercambiado con la red.



(a)



(b)

Figura 39. Comparación del MPD máxima entre las MGs, con el EMS-EXG.
(a) MPD para la MG1, (b) MPD para la MG2.

El intercambio energético a partir del análisis de los perfiles de red, el *SOC* de las baterías y la predicción de generación de potencia en las MGs, ha provocado cambios significativos en todos los índices de calidad, los cuales se muestran en la Tabla 14. En esta se observa también la reducción de la máxima potencia absorbida por la red ($P_{G,MIN}$) y la disminución significativa del *MPD* para las dos MGs, con respecto a la sección anterior (5.2.1).

Tabla 14

Comparación de los índices de calidad de la estrategia EMS-FC vs EMS-EXG.

MG1	$P_{G,MAX}$ (kW)	$P_{G,MIN}$ (kW)	<i>MPD</i> (W/h)	<i>APD</i> (W/h)	<i>PPV</i>
EMS-FC	1.89	-1.49	480.50	51.79	2.76
EMS-EXG	1.88	-1.47	448.54	51.65	2.75
MG2	$P_{G,MAX}$ (kW)	$P_{G,MIN}$ (kW)	<i>MPD</i> (W/h)	<i>APD</i> (W/h)	<i>PPV</i>
EMS-FC	1.58	-1.67	503.97	52.50	3.19
EMS-EXG	1.57	-1.56	494.49	51.46	2.99

Por último, en la Tabla 15 se puede observar que la mayor cantidad de potencia total intercambiada la lleva a cabo la MG2, como ya se ha mencionado antes esto se debe a que la MG2 presenta una mayor generación de energía y un menor consumo por parte de sus cargas, en comparación con la MG1.

Tabla 15

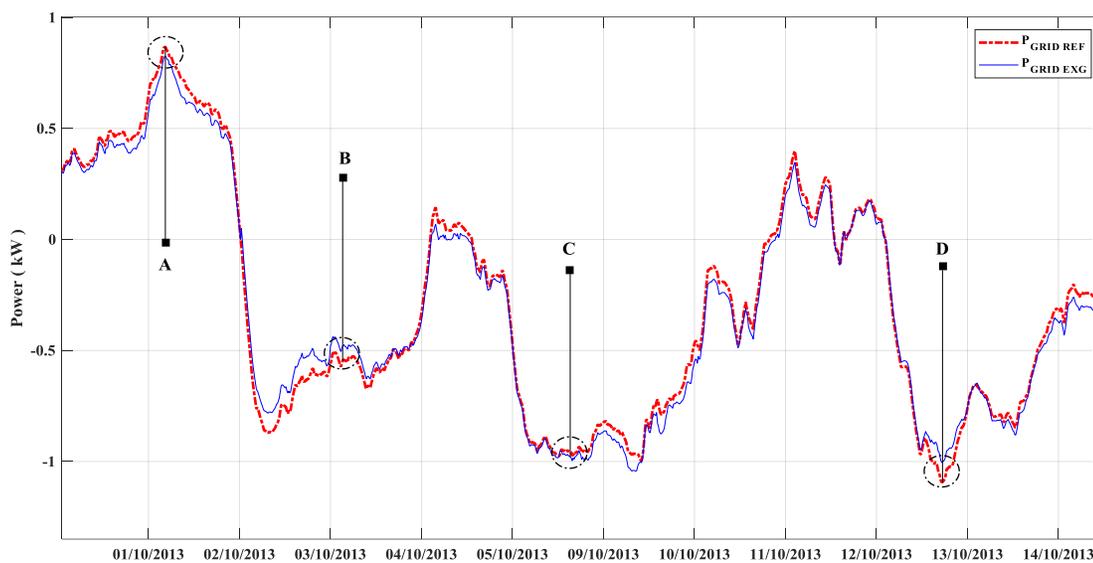
Beneficio de potencia total alcanzada por las MGs del EMS-EXG propuesto.

Microrred	Potencia total intercambiada (kW)
MG1	130.27
MG2	161.45

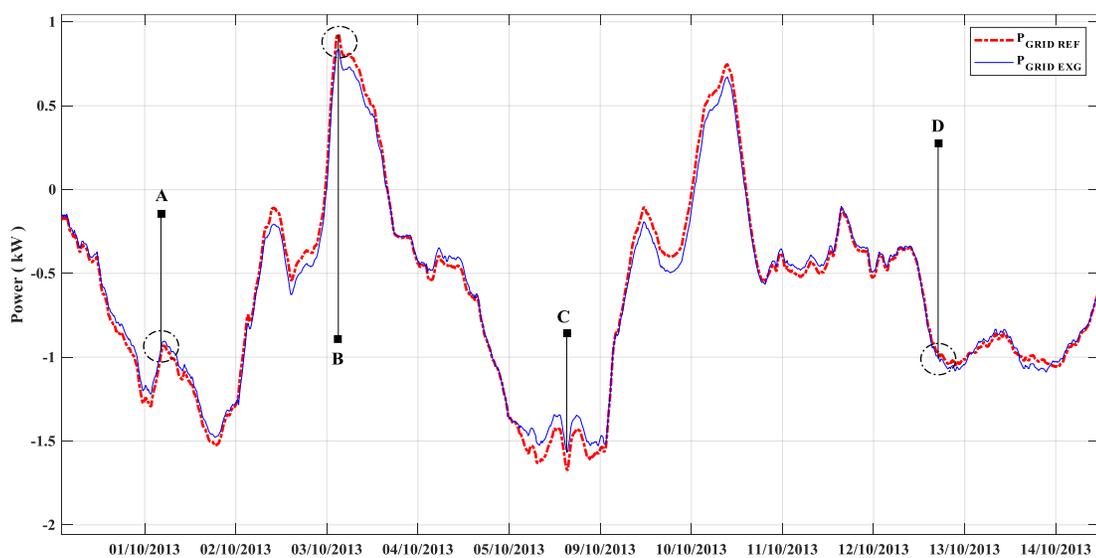
Para esta sección, se concluye que el intercambio del excedente de potencia en las MGs, al añadir al análisis el *SOC* de las baterías y la predicción de la generación de potencia, logra reducir de forma significativa, el valor de todos los índices de calidad, también se observa un mayor intercambio de potencia entre las MGs y se reduce de manera considerable las fluctuaciones positivas y negativas presentes en los perfiles de red. Además se confirma la baja variabilidad del perfil de potencia de la red alcanzado con la estrategia del intercambio propuesto.

5.2.3 Comparación de las microrredes con la estrategia del intercambio energético

En la Figura 40 se compara el perfil de red de referencia de las MGs (línea roja punteada) y el perfil de potencia al aplicar el EMS de intercambio propuesto (línea azul continua), en esta se van analizar los puntos A, B, C y D, para apreciar el intercambio de potencia efectuado desde el perfil de red de la MG2 hacia el perfil de red de MG1 (punto A), el intercambio de potencia del perfil de red de MG1 hacia el perfil de red de MG2 (punto B), el intercambio de potencia del perfil de red de MG2 hacia la potencia de la batería de MG1 (punto C) y el intercambio de potencia del perfil de red de MG1 hacia la potencia de la batería de MG2 (punto D).



(a)

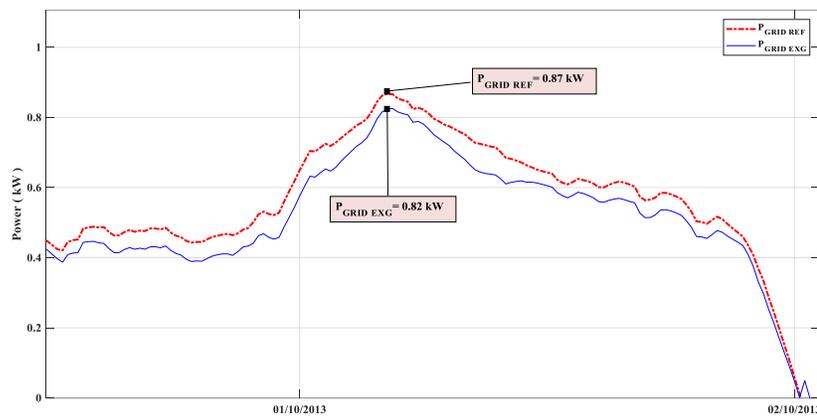


(b)

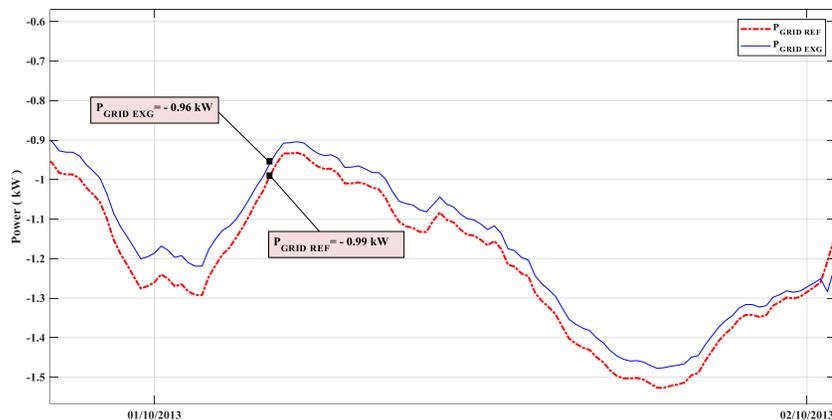
Figura 40. Comparación del perfil de potencia original y después del EMS-EXG.
 (a) P_{GRID} de MG1, (b) P_{GRID} de MG2.

Para el punto A de la Figura 40, el perfil de red de referencia de la MG1 (Figura 41a) muestra fluctuaciones positivas (déficit de potencia generada por la microrred) y la MG2 muestra

fluctuaciones negativas (excedente de potencia generada por la microrred). En este punto el EMS propuesto va a aplicar el segundo caso de intercambio energético, por lo que el perfil de red de MG2 va a inyectar potencia al perfil de red de MG1 y con ello conseguir la reducción de las fluctuaciones positivas y negativas de la MG1 y MG2 respectivamente. Es así que en la (Figura 41a) se muestra la reducción del perfil de red positivo de MG1 con un valor de $P_{GRID\ EXG} = 0.82$ (kW) comparado con su valor de referencia de $P_{GRID\ REF} = 0.87$ (kW), por otro lado en la MG2 (Figura 41b) se nota la reducción de su perfil de red negativo $P_{GRID\ EXG} = -0.96$ (kW) comparado con su valor de referencia $P_{GRID\ REF} = -0.99$ (kW).



(a)

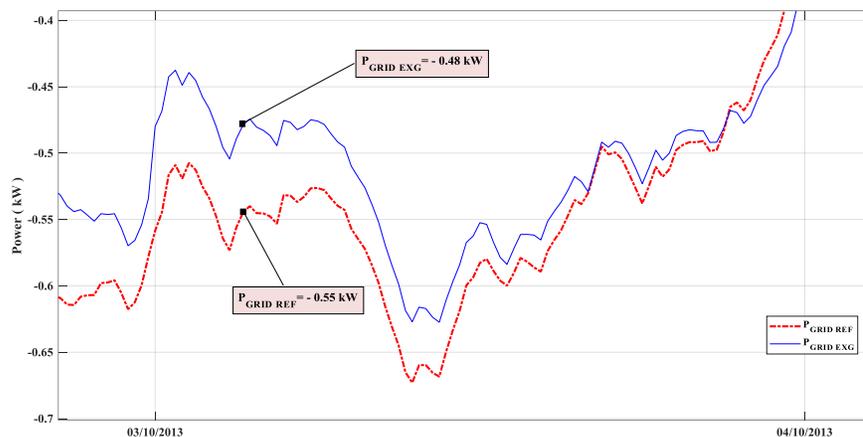


(b)

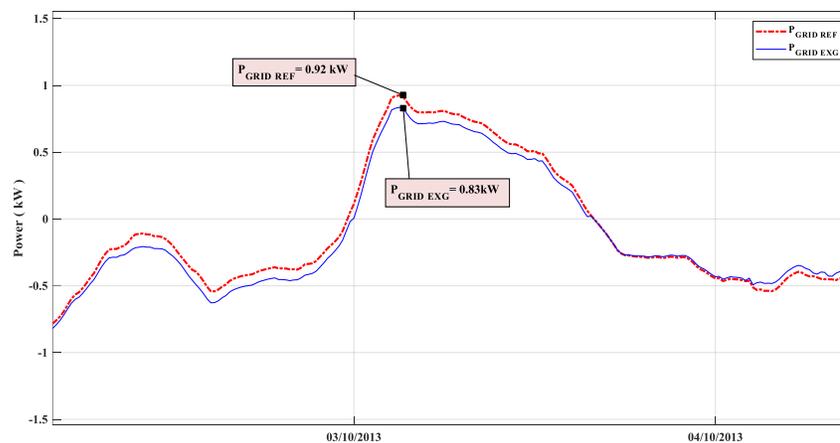
Figura 41. Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto A.
(a) P_{GRID} de MG1, (b) P_{GRID} de MG2.

El punto B de la Figura 40 se muestra el caso opuesto al punto A, donde el perfil de red de la MG1 (Figura 42a) será la que inyecta potencia a la MG2 (Figura 42b), ya que la primera indica un excedente de potencia generada y la segunda el déficit de la misma. De este modo en la (Figura 42a) se muestra la reducción del perfil de red negativo de MG1 con un valor de $P_{GRID\ EXG} = -0.48$ (kW), comparado con su valor de referencia de $P_{GRID\ REF} = -0.55$ (kW).

Por otro lado en la MG2 (Figura 42b) se nota la reducción de su perfil de red positivo $P_{GRID\ EXG} = 0.83$ (kW) contrastado con su valor de referencia $P_{GRID\ REF} = 0.92$ (kW).



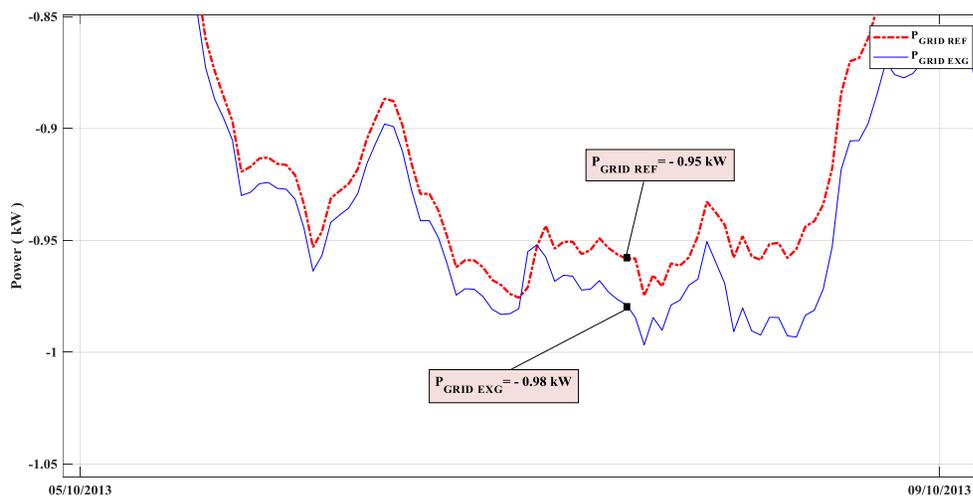
(a)



(b)

Figura 42. Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto B.
(a) P_{GRID} de MG1, (b) P_{GRID} de MG2.

Para el punto C de la Figura 40 se observa que las dos MGs presentan un perfil de red negativo e indican un excedente de potencia generada, por lo que el intercambio de potencia se lo hace al agregar al análisis: el SOC de referencia (Figura 44, línea azul punteada) y la predicción de generación o consumo de energía (Figura 44, línea negra punteada) de las MGs. Para la MG1, el perfil de red de referencia (Figura 43a) muestra un $P_{GRID REF} = -0.95$ (kW), en la (Figura 44a) la MG1 un $SOC_{REF} = 85.66\%$ (Figura 44a) y $P_{CTR REF} = -0.86$ (kW), por otro lado la MG2 presenta un valor de perfil de red de referencia (Figura 43b) de $P_{GRID REF} = -1.67$ (kW), en la (Figura 44b) la MG2 tiene un $SOC_{REF} = 89.18\%$ y $P_{CTR REF} = -1.57$ (kW). Por los valores descritos se nota que ambas MGs presentan un perfil de red negativo, una predicción de generación de potencia (perfil negativo en $P_{CTR REF}$) y que la diferencia radica en el SOC de las mismas, donde MG1 tiene un valor de 85.66% y la MG2 tiene un valor de 89.18%, de acuerdo a esto la MG que va a inyectar parte de su potencia corresponde a MG2 ya que se cumple el séptimo caso de intercambio mostrado en la sección 4.3.3.4.



(a)

CONTINÚA →

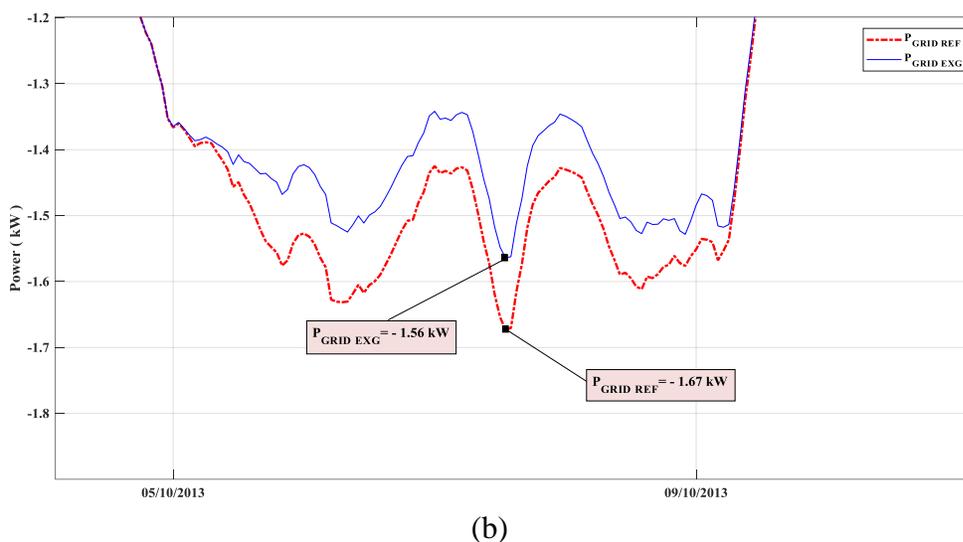
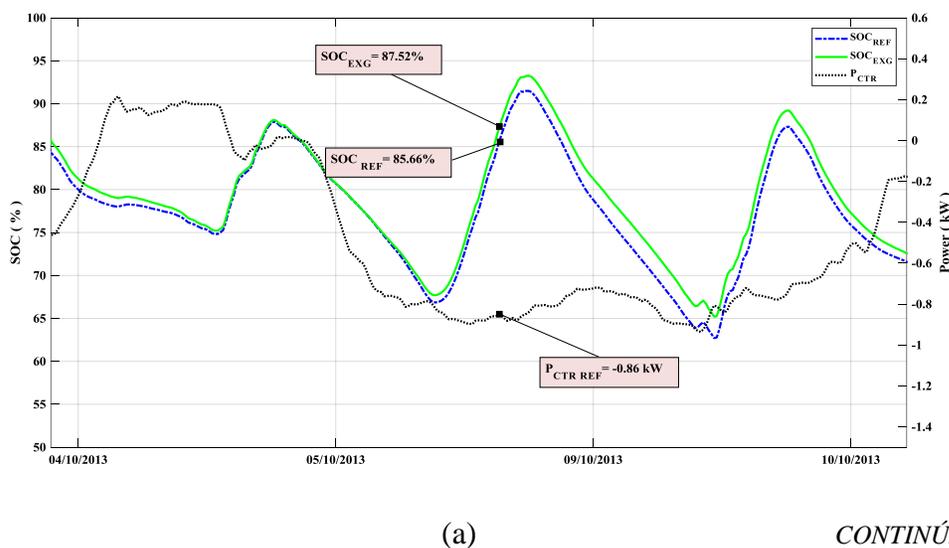


Figura 43. Comparación del perfil de red original y después del EMS-EXG del punto C.
(a) P_{GRID} de MG1, (b) P_{GRID} de MG2.

En la Figura 43b se observa que tras realizar el intercambio de potencia, el perfil de red de la MG2 ha disminuido con un valor de $P_{GRID EXG} = -1.56$ (kW) (línea azul continua), y la potencia transferida a la potencia de la batería de MG1 debe cargar el SOC de la misma, esto se observa en la Figura 44a (línea verde continua) donde se alcanza un valor de $SOC_{EXG} = 87.52\%$.



CONTINÚA →

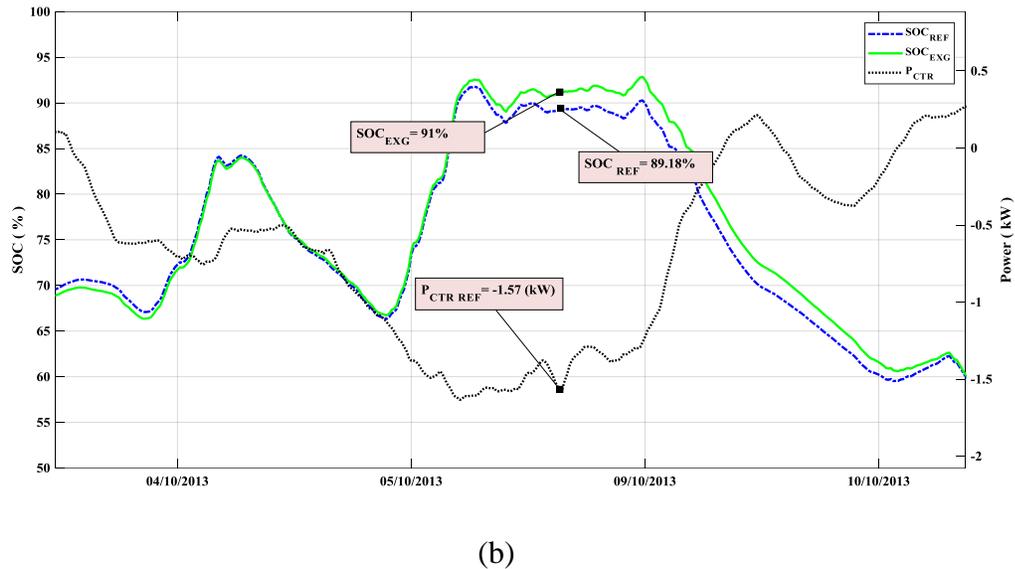
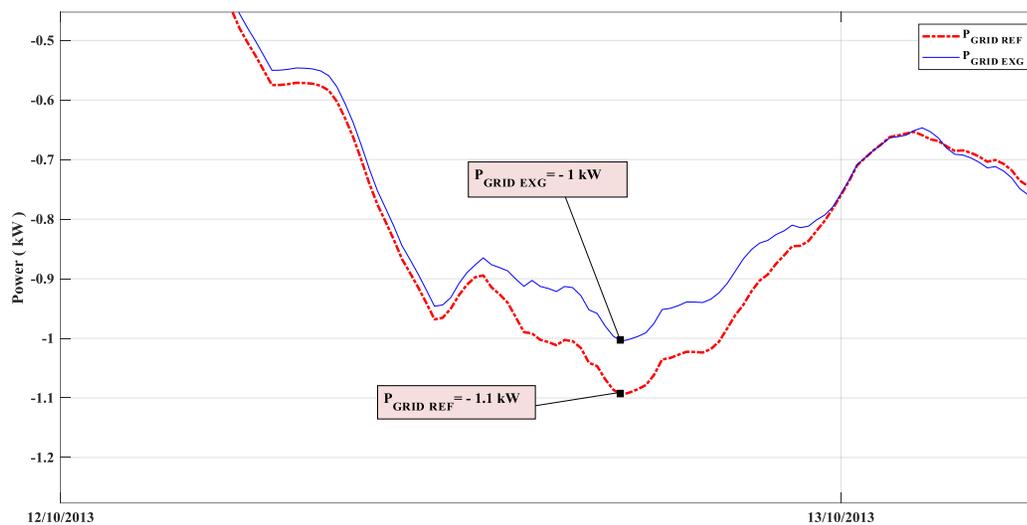
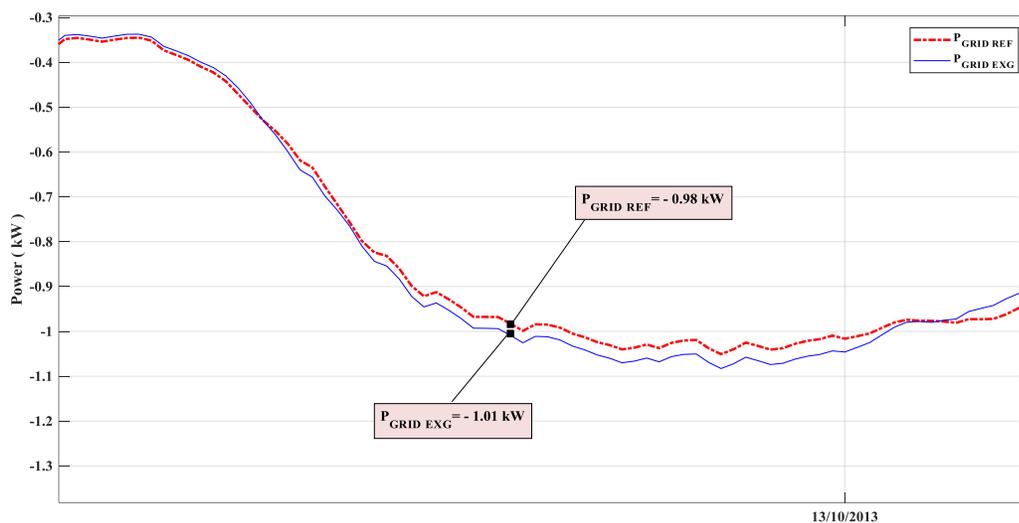


Figura 44. Comparación del SOC y la P_{CTR} original vs EMS-EXG en el punto C.
(a) SOC y P_{CTR} de MG1, (b) SOC y P_{CTR} de MG2.

Por último en el punto D de la Figura 40, se observa que el perfil de red de MG1 inyecta potencia hacia la potencia de la batería de MG2. Ya que el perfil de red de MG1 (Figura 45a) muestra un valor de potencia de $P_{GRID REF} = -1.1$ (kW), en la (Figura 46a) un SOC de valor igual a $SOC_{REF} = 94.84$ % y una predicción de generación de energía de $P_{CTR REF} = -0.95$ (kW), por otro lado la MG2 presenta un perfil de red (Figura 45b) con un valor de potencia igual a $P_{GRID REF} = -0.98$ (kW), en la (Figura 46b) la MG2 presenta un SOC igual a $SOC_{REF} = 69.81$ % y una predicción de generación de energía de $P_{CTR REF} = -0.97$ (kW). Al igual que en el punto C, se observa que ambas MGs presentan un excedente de potencia en su perfil de red, una predicción de generación de energía y la diferencia radica en el SOC , donde el SOC de MG1 indica un nivel alto de carga y la MG2 indica un nivel medio-bajo de carga (mayor al 87.5% y menor al 75%). Por estas razones la MG que va a inyectar parte de su potencia corresponde a la MG1, tras cumplirse el tercer caso de intercambio.



(a)



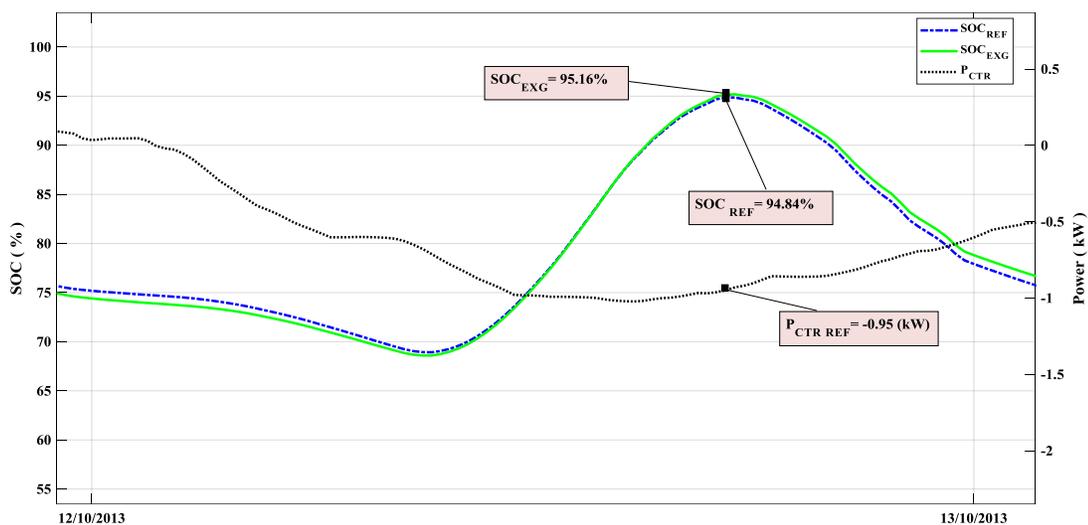
(b)

Figura 45. Comparación del perfil de red original, después del EMS-EXG del punto D.

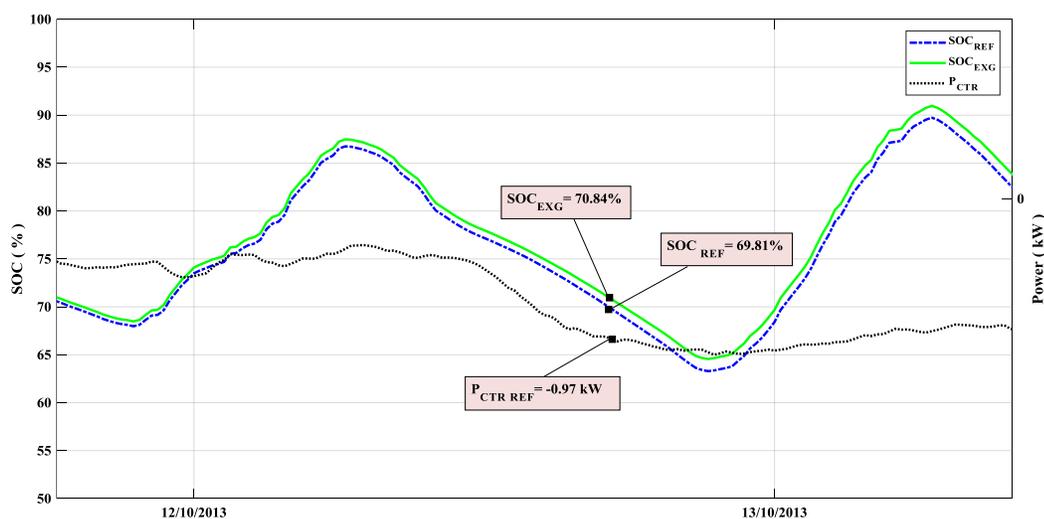
(a) P_{GRID} de MG1, (b) P_{GRID} de MG2.

La Figura 45a indica que tras realizar el intercambio de potencia el perfil de red de MG1 ha disminuido con un valor de $P_{GRID EXG} = -1$ (kW) (línea azul continua), y la potencia transferida a la

potencia de la batería de MG2 debe cargar el SOC de la misma, lo que se aprecia en la Figura 46b (línea verde continua) con un valor de $SOC_{EXG} = 70.84\%$.



(a)



(b)

Figura 46. Comparación del SOC y la P_{CTR} original vs EMS-EXG en el punto D.
(a) SOC y P_{CTR} de MG1, (b) SOC y P_{CTR} de MG2.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El presente trabajo de investigación ha mostrado el diseño de una estrategia de gestión energética para el intercambio de potencia entre dos microrredes residenciales basado en un controlador FLC con 64 reglas, el cual analiza el perfil de potencia, el estado de carga actual de las baterías y la potencia neta promedio generada en las microrredes. El diseño del EMS se fundamenta en el intercambio de potencia a través del excedente de potencia encontrada en el perfil de red de las MGs, mediante siete casos de intercambio: El primer y segundo caso de intercambio radica en compartir potencia a través de los perfiles de red de las MGs, por otro lado del tercer al séptimo caso de intercambio se incorpora al análisis el *SOC* de la batería y la potencia neta promedio de las microrredes, con la finalidad de inyectar potencia, procedente de los perfiles de red de las MGs, hacia las baterías de tal forma que aumente el *SOC* de las mismas y las mantenga en límites seguros para satisfacer la demanda de las cargas.
- Los datos de generación y consumo de potencia para la MG2 fueron generadas tras modificar los datos de la microrred obtenido en la estrategia EMS-FC descrita anteriormente, la razón de ello es conseguir una microrred con alta generación de energía y con bajo consumo de potencia por parte de las cargas, y así evidenciar el intercambio energético realizado por las MGs tras el diseño y simulación del EMS-EXG propuesto en el presente proyecto.
- El sistema implementado cumple con la estrategia de gestión energética y el correcto balance de las potencias que intervienen en las microrredes, donde se observa que la mayor parte de la potencia intercambiada por el perfil de potencia corresponde a la potencia brindada por la MG2

con un valor de potencia de 161.44 (kW) comparada con la MG1 que posee un total de potencia compartida de 130.27 (kW) al año de estudio.

- Mediante los resultados simulados en el software de Matlab se logró visualizar que el máximo porcentaje de potencia intercambiada por las MGs (dado por el FLC), fue de alrededor del 10%, valor suficiente para reducir los picos y fluctuaciones de los perfiles de red y los índices de calidad de las MGs.
- Al comparar los perfiles de potencia de la red original con el EMS-EXG propuesto, se obtiene una disminución de las fluctuaciones positivas y negativas de la MG1 en un 3.87% y 3.52% respectivamente, en comparación con la MG2 cuyas fluctuaciones positivas y negativas disminuyen un 2.23% y 5.73%, de esta manera se confirma que la MG2 comparte mayor cantidad de potencia, debido a que presenta una mayor reducción de su perfil de red negativo.
- La estrategia EMS-EXG propuesta logra una apreciable reducción en la magnitud todos los índices de calidad definidos con respecto a la estrategia anterior. En resumen los indicadores de calidad $P_{G, MAX}$, $P_{G, MIN}$, MPD , APD y PPV se han reducido en 0.53%, 1.34%, 6.65%, 0.27% y 0.36%, respectivamente para la MG1 y en 0.63%, 6.6%, 1.90%, 1.98% y 6.27% para la MG2, lo que confirma la reducción de los índices de calidad de las MGs a través el EMS-EXG propuesto.
- Los resultados obtenidos demuestran que además del intercambio de potencia, las microrredes suavizan el perfil de potencia y reducen los índices de calidad respecto a sus valores de referencia, por lo tanto se puede constatar que existe una mejora del rendimiento de cada microrred al trabajar de manera conjunta.

- El beneficio de compartir potencia entre microrredes implica un ahorro económico debido a que es potencia no suministrada por la red eléctrica, así se promueve la independencia, la fiabilidad del suministro y la seguridad energética.
- El EMS-EXG propuesto sería capaz de intercambiar mayor potencia entre las dos MGs, sin embargo los índices de calidad se verían afectados (al aumentar su magnitud) y no llegaría a cumplir los objetivos trazados en el presente trabajo de investigación, debido a que estos permiten evaluar el correcto comportamiento de los perfiles de red.
- En el caso de que se pretenda sustituir alguna de las MGs por una nueva, se recomienda analizar previamente los perfiles de generación de potencia y demanda de carga de la misma, para ajustar los parámetros del controlador FLC de la estrategia EMS-EXG propuesta, y con ello evitar que los indicadores de calidad de las MGs aumenten significativamente.

6.1 Trabajos Futuros

Como ya se ha mencionado las microrredes constituyen una solución a la independencia de generación de energía por medio de fuentes convencionales, por lo que es una alternativa para la gestión de energía en ciudades inteligentes, por lo tanto este trabajo de investigación busca fomentar el estudio de nuevas estrategias de gestión energéticas relacionadas a mejorar el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica mientras se intercambia potencia entre las microrredes a través del uso de controladores difusos debido a la facilidad de diseño e implementación.

El proyecto desarrollado ha logrado un acercamiento al intercambio de potencia entre dos MGs a través del análisis de sus perfiles de potencia, el *SOC* de la batería y la predicción de generación de potencia a través de su potencia neta promedio, y usa para el caso una microrred y la EMS-FC mencionada anteriormente, donde ya se obtiene un perfil de red suavizado a través del uso de un controlador FLC.

Por lo mencionado se propone como trabajo futuro el diseño de una EMS de intercambio de potencia, donde a partir de su potencia neta, el error de predicción y el estado del *SOC* se logre conseguir un perfil de potencia adecuado para el intercambio con la red eléctrica y de esta manera reducir los índices de calidad observados en el presente proyecto y así favorecer la escalabilidad del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agency, I. E. (2015). CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights, 1–15.
- Arcos-Aviles, D., Guinjoan, F., Marietta, M. P., Pascual, J., Marroyo, L., & Sanchis, P. (2016). Energy management strategy for a grid-tied residential microgrid based on Fuzzy Logic and power forecasting. In *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4103–4108). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793088>
- 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*, 3053(c), 1. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>
- Asmus, P., & Lawrence, M. (2016). Emerging Microgrid Business Models 1. Executive Summary, 1–14.
- Bernadó, Alaminos, J., Alcor, E., & Asensio, M. (2014). Estudio sobre las microredes y su aplicación a proyectos de electrificación de zonas rurales aisladas, 4–6.
- Borja, G. F. de. (2007). *Estrategias de programación diaria y operación horaria en el mercado de la electricidad de un parque eólico dotado de un sistema acumulador de energía*. Universidad de Sevilla.
- Cañizares, C. A. (2014). Trends in Microgrid Control, 05(04), 15. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Centro Nacional de Energías Renovables. (2018). *Introducción a las microredes*. Navarra.

- Committee, D., Power, I., & Society, E. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, 2014. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Daniel Schnitzer, Deepa Shinde Lounsbury, Juan Pablo Carvallo, R. D., Jay Apt, and D. M. K., Schnitzer, D., Deepa, S., Carvalo, J. P., Ranjit, D., ... Daniel, K. (2014). Microgrids for Rural Electrification : A critical review of best practices based on seven case studies Microgrids for Rural Electrification : A critical review of best practices. *United Nations Foundation*, 122.
- De los Ríos, C. D. (2004). Evaluación de estructuras y métodos de ajuste de reguladores PID-difusos.
- Dr. Figueredo, C. M. (2016). *Energías fotovoltaica y eólica: ventajas y desventajas*. La Habana. Retrieved from <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia71/HTML/Articulo05.htm>
- Elfvengren, K., Karvonen, M., Klemola, K., & Lehtovaara, M. (2014). The future of decentralised energy systems: insights from a Delphi study. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 10(3/4), 265. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2014.066883>
- Erenovable. (2015). Energías renovables ventajas y desventajas, (Ventajas de la energia solar y eolica). Retrieved from <https://erenovable.com/energias-renovables-ventajas-y-desventajas/>
- Fernández, A. E. (2009). *Microrredes, una posible revolución energética para los consumidores*. Retrieved from http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/03/12/183966.php
- Fernández, J. M. (2015). A voltage disturbances prototype for testing electrical generators connected to microgrids.
- Guamán, C. (2016). Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a

un área de concesión de la empresa eléctrica regional centro sur.

Hashmi, K., Khan, M. M., Habib, S., & Tang, H. (2017). An Improved Control Scheme for Power Sharing between Distributed Power Converters in Islanded AC Microgrids. In *2017 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)* (pp. 270–275). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FIT.2017.00055>

Hatziargyriou, N. (2014). *Architectures and Control*.

Heating, F. of E., Associations, V., & Conditioning, A. (2019). *Renewable energy sources directive (RES)*. Bruselas- Bélgica.

Henares, A. de empresarios del. (2011). *Guía práctica para la implantación de sistemas de gestión energética*.

Hernández, C. D. y J. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica. *Redalyc*.

Hosseinimehr, T., Shahnia, F., & Ghosh, A. (2015). Power sharing control of batteries within autonomous microgrids based on their state of charge. In *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2015.7324848>

Jing, W., Lai, C. H., Dennis Wong, M. L., & Wong, W. S. H. (2015). Smart hybrid energy storage for stand-alone PV microgrid: Optimization of battery lifespan through dynamic power allocation. In *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2015.7381050>

Kevin M, P., & Stephen Yurkovich. (1998). *Fuzzy Control*. California: Addison Wesley Longman, Inc.

Kouro R, S., & Musalem M, R. (2005). *Control Mediante Lógica Difusa*. Valparaíso.

- L. Berrío y C. Zuluaga. (2014). Smart Grid and solar photovoltaic energy as renewable energy source for the distributed generation in the global energy context. *Redalyc*.
- Línea, A. en. (2015). Lógica difusa. Retrieved January 31, 2019, from <http://aprendeonlinea.udea.edu.co/lms/investigacion/mod/page/view.php?id=9134>
- Lorenzo, E. (2011). *Energy Collected and Delivered by PV Modules. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch22>
- Martínez, A., Ariño, C., Flors, O., Gil, A., Moya, D., Pérez, E., & Beltrán, H. (2015). Sistema de gestión de energía para microrredes basado en control predictivo. *Comité Español de Automática de La IFAC (CEA-IFAC)*. Retrieved from <https://www.ehu.es/documents/3444171/4484748/92.pdf>
- Matos Felipe, Batista Luis, P. A. (2009). *Modelo simple para la predicción de la generación eólica (MOSIMPRE) utilizando los procesos sinópticos objetivos. Aplicación al parque eólico demostrativo de Turiguanó. Ciego de Ávila, Cuba*. Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros de Cayo Coco.
- MIT Technology Review. (2006). Large-Scale, Cheap Solar Electricity. Retrieved April 10, 2019, from <https://www.technologyreview.com/s/405975/large-scale-cheap-solar-electricity/>
- Naciones Unidas/CEPAL. (2016). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. *Publicación de Las Naciones Unidas, Mayo*(Obj.7; Meta 7.3a), 50. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nair, D. R., Devi, S., Nair, M. G., & Ilango, K. (2016). Tariff based fuzzy logic controller for active power sharing between microgrid to grid with improved power quality. In *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* (pp. 406–409). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2016.7583789>

- Nian Liu, Jie Wang, and L. W. (2018). Hybrid Energy Sharing for Multiple Microgrids in an Integrated Heat-Electricity Energy System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2861986>
- Pascual Miqueleiz, J. M. (2015). *Estrategias avanzadas de gestión energética basadas en predicción para microrredes electrotérmicas*. Universidad Pública de Navarra.
- Quimtia Medioambiente. (2017). *Efectos del incremento de emisiones de gas invernadero*. Perú. Retrieved from <http://www.quimtiamedioambiente.com/blog/efectos-incremento-emisiones-gas-invernadero/>
- R.H.Lasseter. (2002). Örtliches Entwicklungskonzept Flächenwidmungsplan Bebauungsplan (Neuplanungsgebiet) □ GFZ, Fluchtlinien, 305–308. <https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985003>
- Renovable, M. de E. y E. (2016). *Guía práctica para el uso eficiente de la energía eléctrica en el Ecuador*. Quito: MEER, PNUD, GEF.
- Reza, M., Sudarmadi, D., Viawan, F. A., Kling, W. L., & Van Der Sluis, L. (2006). Dynamic stability of power systems with power electronic interfaced DG. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings*, 1423–1428. <https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296510>
- Senplades. (2017). Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una Vida, 1–148. Retrieved from https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/PNBV-26-OCT-FINAL_0K.compressed1.pdf
- Tecnalia, L. (2007). *Guía Básica de la Generación Distribuida*. Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid.
- Theler, G. (2007). *Controladores basados en lógica difusa y loops de convección natural caótica*.

- Universidad Nacional de Cuyo. Retrieved from https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/115/38115194.pdf?r=1&r=1
- Tolón, T. (2013). *Energéticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energética y ambiental*. Universitat de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. Retrieved from https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19411/TamaraTolon_MemoriaTFM_Deposito.pdf
- Torres Pinzón, C. A. (2017). *Sistemas Distribuidos para el Control del Modo de Operación en Micro-Redes Inteligentes Basados en Técnicas Multi-Agente*. Universidad Santo Tomás.
- Universidad Publica de Navarra. (2015). Institute of Smart Cities. *Microred Eléctrica Del Laboratorio de EERR de La UPNA*. Retrieved from <https://www.unavarra.es/isc/investigacion/infraestructura-cientifica>
- Vgb-rv, F. (2015). *VGB-Standard Basic Terms of the Electric Utility Industry* (Vol. 0).
- WWEA. (2016). The World Wind Energy Association Join us at : WWEA Half-year Report 2016.