

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

ANÁLISIS DE MICROREDES EN COLOMBIA

Niver Joan Mesa Pérez

Tecnología Electromecánica

Bonie Johana Restrepo Cuestas

Luis Fernando Grisales Noreña

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

9 de Octubre de 2017

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis de las microredes (MRs) en Colombia. Para lograrlo, se inició con la definición de los conceptos básicos asociados a la funcionalidad de las MRs, luego se muestra su panorama actual a nivel mundial, resaltando los países con mayor desarrollo en esta temática y algunos sistemas en funcionamiento. De este análisis, se lograron identificar las tecnologías más utilizadas, además de las barreras técnicas, económicas y legislativas que se presentan en este tipo de proyectos. Seguido de lo anterior, se revisa el estado actual colombiano, partiendo del sistema energético, identificando además los tipos de energías renovables aplicados a partir de su potencial. Igualmente se exponen los principales casos de MRs en el país, identificando sus principales barreras y posibles soluciones.

Palabras clave: Microred; Generación distribuida; Almacenador de energía; Energías renovables; Zonas no interconectadas; Cargas en microredes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Con la realización de este trabajo quiero agradecer a mis dos tutores por la paciencia, colaboración y apoyo moral que hicieron posible este trabajo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

ABB Asea Brown Boveri.

ANLA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.

CERTS Consortium for Electric Reliability Technology Solutions.

CREG Comisión de Regulación de Energía y Gas.

ER Energías Renovables.

FCE Fuentes Convencionales de Energía.

FNCE Fuente No Convencional de Energía.

GD Generación Distribuida.

kW Kilo Vatios.

IVA Impuesto Sobre el Valor Agregado.

IRENA International Renewable Energy Agency.

MME Ministerio de Minas y Energía.

MR Microred.

MRs Microredes.

MW Mega Vatios.

NEDO New Energy and Industrial Technology Development Organization.

PCH Pequeña Central Hidroeléctrica.

SIN Sistema Interconectado Nacional.

UPME Unidad de Planeación Minero Energética.

ZNI Zonas No Interconectadas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	9
3. METODOLOGÍA.....	14
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	37
REFERENCIAS	39

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Actualmente el 52% del territorio colombiano pertenece a zonas no interconectadas (ZNI), es decir, no pertenece al sistema interconectado nacional (SIN) y esto hace que el costo de la energía producida sea mayor. La mayoría de ZNI son de difícil acceso y se encuentran muy alejadas de los grandes centros urbanos, por tanto las líneas de transmisión requeridas para su conexión serían demasiadas extensas, y esto se vería reflejado en un alto costo económico. Del 52% de territorio no interconectado, hay cerca de 2 millones de personas que cuentan con el recurso eléctrico, pero este servicio se caracteriza por utilizar combustibles fósiles como por ejemplo el diésel, lo cual lo convierte en un servicio con altos costos de generación. Por otro lado, el servicio se presta en un horario establecido; es decir, las cargas no se encuentran atendidas las 24 horas. Además, cerca de 1.2 millones de personas no tienen acceso al recurso de energía eléctrica, lo cual hace necesario proponer estrategias que den solución a esta necesidad.

Actualmente las MRs se presentan como una solución a esta problemática, ya que permite mejorar la cobertura y la eficiencia energética, disminuir las pérdidas por transporte, reducir el impacto ambiental, mejorar la calidad del suministro y principalmente atender las ZNI (Gaona, Trujillo, & Guacaneme, 2015).

La implementación de esta estrategia promueve la integración de fuentes renovables a la generación de electricidad, así se incrementa la viabilidad de estos sistemas, teniendo mayor seguridad, flexibilidad y sobre todo acceso al recurso de energía eléctrica (Ahmad Khan, Naeem, Iqba, Qaisar, & Anpalagan, 2016; Muntaz & Safak Bayram, 2017; Piagi & Lasseter, 2006; Soshinskaya, Crijns-Graus, Guerrero, & Vasquez, 2014; Tan, Li, & Wang, 2013). Actualmente esta temática es ampliamente discutida a nivel mundial, por

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ejemplo, se pueden encontrar estudios sobre la capacidad instalada de MRs en todo el mundo, lo que permite determinar que China es el país con mayor capacidad y tiene un número mayor de proyectos en planeación y en marcha (Romankiewicz, Marnay, Zhou, & Qu, 2014; Zeng, Zhao, Yang, & Tang, 2013). En paralelo, se avanzan en estudios sobre gestión, evaluación de costos y productividad de las MRs (Tolón & Tamara, 2013).

Es por tanto que toma sentido, realizar un análisis de la actualidad de las MRs a nivel mundial y posteriormente investigar cual ha sido el avance en el mismo tema en Colombia. Para lograrlo, inicialmente se identificaron sus componentes y tecnologías de generación más utilizadas. Luego, se continuó la búsqueda hacia proyectos de MRs desarrollados alrededor del mundo, analizando niveles de potencia, tecnologías implementadas, las barreras que se han presentado y las soluciones propuestas.

Conociendo el análisis global de las MRs se hace una comparación con el territorio colombiano, a partir de los proyectos desarrollados, en curso y a futuro. Esto permitirá al lector observar en un panorama general el estado actual de las MRs en Colombia, identificando cuales de las barreras que se presentan en el mundo aplican en el caso colombiano, y que soluciones han sido planteadas para superarlas.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Realizar un análisis del estado actual de las MRs en Colombia.

Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual de las MRs a nivel mundial, desde lo técnico y económico.
- Identificar las barreras de las MRs y sus posibles soluciones.
- Realizar un análisis comparativo con el desarrollo de las MRs en Colombia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.3. Organización del trabajo

Este documento se ejecuta mediante un trabajo escrito donde se empieza por el marco teórico que está conformado por diversos conceptos que permiten comprender el desarrollo del proyecto. En la metodología se listan las tareas que fueron desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos. Seguido de los resultados y su análisis. Y finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

A continuación se definirán los conceptos necesarios, para desarrollar el tema de interés:

2.1. Microred (MR):

Una MR es un pequeño sistema o red de energía de distribución de bajo voltaje, que funciona de forma aislada o conectada a la red, proporcionando de forma controlada energía eléctrica (Giraldo Gómez, 2016). Una MR está compuesta de un sistema de distribución eléctrico que contiene cargas, fuentes de energía distribuida y depósitos de almacenamiento (Lasseter, 2002; Tolón & Tamara, 2013).

Las MRs se clasifican por su funcionamiento, es decir, pueden estar conectadas o desconectadas de la red (Piagi & Lasseter, 2006). En el primer caso, las MRs operan en sincronía con la red eléctrica, así pueden adicionar potencia, mantienen el flujo energético constante y ayudan a sostener la red principal con control de voltaje. En el modo desconectado puede operar cuando hay un fallo o ausencia de suministro de la red eléctrica; de esta forma se convierte en un sistema de generadores distribuidos y elementos almacenadores de energía, funcionando de forma autónoma, proporcionando electricidad de buena calidad, con menor costo y menores pérdidas de potencia (Muntaz & Safak Bayram, 2017; Tolón & Tamara, 2013). Una MR puede operar con corriente alterna, directa o de forma híbrida, dependiendo de los requerimientos de los usuarios finales (Planas, Andreu, Gárate, Martínez de Alegría, & Ibarra, 2015).

La construcción de una MR consta de dos etapas. La primera, es el diseño que consiste en dimensionar los dispositivos. En esta etapa se tiene en cuenta la localización del sistema, ya que esto determinará las tecnologías que podrán ser utilizadas, dadas las condiciones climatológicas y geográficas; por ejemplo; en los casos de sistemas fotovoltaicos deberá

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

tenerse en cuenta la variación de irradiación solar y temperatura, en los sistemas eólicos se tiene en cuenta la variación en la velocidad y dirección del viento, entre otros. Para finalizar la etapa de diseño, se deberá realizar un estudio de la carga eléctrica de interés, ya que se pueden alimentar diferentes tipos de cargas, como pueden ser residencial, comercial e industrial, de las dos últimas se encuentran algunas conocidas como cargas críticas, que son cargas que no pueden dejar de funcionar como por ejemplo hospitales, aeropuertos, minas, servidores de redes entre otros. La segunda etapa, consta de la gestión de la MR, que consiste en realizar de forma coordinada el análisis de potencia, consumo, generación y almacenamiento; permitiendo mejorar su eficiencia y confiabilidad (Giraldo Gómez, 2016).

2.2. Componentes de la MR

- **Generación**

La generación de energía eléctrica puede basarse en cualquier tipo de fuente, es decir que pueden ser renovables o no renovables. Estas a su vez, pueden ser convencionales o no convencionales.

Las energías renovables (ER) son las que aprovechan los caudales naturales de energía del planeta, con una fuente inagotable de flujo energético, que se puede renovar constantemente y por lo general tienen un menor impacto contaminante (Vanegas Chamorro et al., 2014). Estas se encuentran conformadas por fuentes no convencionales de energía (FNCE), su uso es escaso debido a altos costos de producción, difícil implementación y transformación en energía eléctrica (Cortés Francisca, 2008). Dentro de las más utilizadas se encuentran la energía solar, eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), biomasa, entre otras (CorpoEma, 2010b). También las conforman fuentes convencionales de energía (FCE), que son toda aquella fuente que es utilizada de forma cotidiana como lo es la utilización de las centrales hidroeléctricas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

A continuación se describen las principales fuentes de ER utilizadas en las MRs:

Generación solar: se define como el aprovechamiento de radiación solar para transformar la energía solar o radiación del sol a energía eléctrica. Está basado en un sistema fotoeléctrico que absorbe fotones y libera electrones generando una corriente eléctrica (CorpoEma, 2010b).

Generación eólica: Este tipo de generación consiste en un generador eólico o aerogenerador que convierte la energía cinética del aire en energía eléctrica. Esta tecnología ha tenido bastante desarrollo en los últimos años. Estos generadores se dividen en dos grupos: turbinas de eje vertical y turbinas de eje horizontal (Enríquez, 2014).

Biomasa: Esta energía se obtiene de compuestos orgánicos de procesos naturales para utilizar como fuente de energía. Está compuesta por materia heterogénea, por ejemplo desechos agrícolas. Se utiliza en calderas donde el material se quema con el pasar del tiempo, genera vapor y hace mover una turbina que está conectada a un generador y produce energía (“¿Qué es y cómo funciona la biomasa? | Sostenibilidad para todos,” n.d.).

Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): Es una tecnología similar a las centrales hidroeléctricas, consiste en aprovechar la energía hidráulica en energía eléctrica, con la diferencia que se presenta en una escala mucho menor, su capacidad va desde 1000 y 20000 kW. Estas aplican para ZNI y conectadas a la red (CorpoEma, 2010).

Las energías no renovables son aquellas que se encuentran en depósitos cuyo consumo es limitado y una vez agotadas sus reservas no se pueden sustituir (Foro

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

nuclear, 2017). Se encuentran conformadas por fuentes convencionales de energía (FCE), que son las basadas en el uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas que por lo general, se aprovechan como fuente de calor y electricidad (Roldán Vilorio, 2008) y también se encuentra la utilización de la energía nuclear (CorpoEma, 2010a).

- **Almacenadores de energía**

Los dispositivos de almacenamiento de energía son uno de los principales componentes críticos, son los encargados de almacenar energía y entregarla al sistema según la necesidad (Cortes, 2016). En la actualidad existen varios tipos de almacenadores de energía, los cuales presentan diferencias constructivas y operativas como tiempos de carga y descarga, vida útil, entre otros (Tan et al., 2013). Entre los más comunes se encuentran:

Supercondensadores: son condensadores electroquímicos que presentan las características de un condensador y una batería, son capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica y cederla rápidamente cuando se requiere (Guacaneme, Velasco, & Trujillo, 2014).

Baterías: son almacenadores electroquímicos capaces de acumular energía eléctrica, estas funcionan con la reacción electroquímica entre dos electrodos separados por un electrolito. Las clases dependen de su composición como por ejemplo: baterías de plomo-acido, níquel-hierro entre otras (Guacaneme et al., 2014).

A la hora de seleccionar y dimensionar los almacenadores de energía, se deben analizar de forma detallada las necesidades de carga, ya que ésta es un factor esencial del cual depende el tamaño, tipo a instalar, vida útil y características de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

almacenamiento (Xu et al., 2017). Además los almacenadores están limitados por unas horas de uso, ya que pueden haber momentos en que no dan abasto con las necesidades de la carga, entonces para estos casos en que pueden haber fallos o los requerimientos de la carga sean mayores, se necesitan de fuentes de respaldo para suplir con la demanda (Giraldo Gómez, 2016).

- **Cargas**

Las cargas eléctricas son todos aquellos usuarios que se abastecen del servicio de energía eléctrica. Se clasifican como residencial, comercial e industrial, estas mismas pueden ser críticas y no críticas (Llanos Proaño, 2012).

Como los consumos y la generación varían hora a hora, se genera una curva de demanda y generación, por lo que se necesita estudiar estas curvas para saber cuáles son las horas pico, manteniendo una gestión óptima que permita abastecer al usuario y tener un mejor control de la red. Dichas curvas pueden calcularse con el estudio de la población a alimentar, perfiles de actividad diaria y equipos a sostener. Las cargas son uno de los factores primordiales en una MR, ya que su correcta determinación asegura el diseño, capacidad, suministro de energía y sirve para tener una buena aproximación del pico de demanda.

Estas están ubicadas cerca a las MRs para aumentar la eficiencia y minimizar las pérdidas por transmisión (Ávila Swinburn, 2013). A partir de los requerimientos de la carga se realiza la planificación de las MRs, así el buen cálculo de la carga permite una correcta entrega del recurso energético, ya que hay un tipo de cargas que nunca pueden desconectarse de la red eléctrica, como lo son hospitales, minas, aeropuertos entre otras, el cual el corte del flujo energético tendría graves consecuencias económicas y humanas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Para desarrollar este informe inicialmente se compiló información requerida del concepto de MRs como: elementos que la componen, requerimientos para su clasificación y diseño. Así mismo se consultó sobre las MRs a nivel mundial, se buscó información sobre por qué aplicar esta tecnología, cómo se ha implementado, partes donde se ha puesto en funcionamiento con mayor regularidad y además se exaltaron los casos de éxito. Este análisis permitió conocer cuáles son las tecnologías que se utilizan con mayor frecuencia y presentan mayor eficiencia. Unido a lo anterior se analizaron las barreras técnicas, económicas y legislativas que se presentan en el mundo, identificando su respectiva forma de superación para cotejar estos resultados con situaciones similares en Colombia. Luego de esta recopilación se analizó el país de Colombia, se verificó en mapas de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y bases de datos cuáles son las tecnologías que se implementan y tienen mayor potencial en su ejecución, unido a esto se buscó sobre la necesidad de aplicación de estas tecnologías. Se investigó sobre las barreras técnicas, legislativas y económicas que aplican en el caso colombiano, se hizo un rastreo de cuáles son sus principales impedimentos y qué entes favorecen la solución a esta problemática. Se analizaron desde el ámbito legislativo, económico y tecnológico los proyectos ejecutados y en marcha, además de los que en un futuro se implementarán. Para terminar se indagó en entidades como la UPME, la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la Autoridad Nacional De Licencias Ambientales (ANLA), entre otras, acerca de los proyectos de MRs colombianos desarrollados, en curso y a futuro, además de los entes u organizaciones que ayudan o incentivan acerca de esta temática. Toda esta información se basó en tesis, artículos y páginas web, en un rango de 10 años.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección muestra un panorama global de las MRs, se inicia con una descripción de sus beneficios, casos reales y las tecnologías de conversión más utilizadas. Luego se identifican y se describen de manera global las barreras técnicas, económicas y legislativas, mostrando sus posibles soluciones. Igualmente se analizan estas barreras en el caso colombiano y se muestra la situación actual de dicho país. Finalmente se muestra los proyectos desarrollados, en curso y futuros. Además se mencionan organizaciones que promueven su utilización. Este estudio, se basó en artículos y documentación encontramos en su mayoría en bases de datos como Science Direct e IEEE, en un rango aproximado de 10 años.

4.1. MRs en el mundo

En los últimos años el sector energético ha tenido diferentes desafíos como lo son: las pérdidas que se presentan por transmisión debido a la generación centralizada, el abastecimiento a poblaciones en ZNI y los altos índices de contaminación. La integración de las MRs alrededor del mundo está evolucionando rápidamente como un escenario emergente para el sector energético, convirtiéndose así en un atractivo para satisfacer estos desafíos (Systems, 2005).

Cada vez más naciones están descubriendo los beneficios de las MRs y crean estrategias para generar un nuevo modelo de negocio de electricidad. Estas fomentan el crecimiento económico; dado que aumentan el desarrollo social lo que conlleva a que la demanda de empleos e inversión local pueda aumentar, siendo así una gran posibilidad para generar ingresos (Manríquez, 2013). Las MRs al contar con generación distribuida, permiten reducir las pérdidas por transporte de energía, impactando directamente los costos del servicio (Martin-Martínez, Sánchez-Miralles, & Rivier, 2016). Así mismo, las MRs promueven las tecnologías verdes, estas tecnologías favorecen al cuidado del medio ambiente (Hossain, Kabalci, Bayindir, & Perez, 2014).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Al conformar una MR se pueden integrar diferentes tipos de generación, lo que permite un modo de operación flexible y eficiente, que se puede implementar tanto en pueblos subdesarrollados como en ciudades inteligentes (Lidula & Rajapakse, 2010).

4.1.1. Casos de éxito en el mundo

Las MRs han atraído la atención de la comunidad científica y el mercado global, por lo cual en los últimos años se han desarrollado planes piloto y centros de investigación alrededor de esta temática (Hossain et al., 2014; Lidula & Rajapakse, 2010; Marnay et al., 2015; Tian et al., 2017; Ustun, Ozansoy, & Zayegh, 2011). Aunque el interés por las MRs se centra principalmente en un contexto de investigación, hoy en día se presenta un avance notable en su implementación.

La Unión Europea se ha propuesto diferentes objetivos para el 2020, a través de las directrices 2001/77/EC, 2003/30/EC y 2006/32/EC (Imulauer, Pera, Bartels, & Brandes, 2007). Estas estipulan la importancia en la reducción de emisiones contaminantes y los incentivos para ER en pro de mejorar el rendimiento energético. En consecuencia, existen diferentes proyectos en curso:

- **Microgrids Project:** liderado por la Universidad Técnica Nacional de Atenas, su objetivo fue desarrollar estrategias de control, protección y operación de los generadores distribuidos en MRs, sin el apoyo de una red de transmisión de energía eléctrica externa (Hatzigrygiou, Asano, Iravani, & Marnay, 2007).
- **MR - Málaga (España):** proyecto realizado por Endensa, que integra un sistema de generación fotovoltaica y uno eólico, con sistema de almacenamiento. Su objetivo es alimentar el alumbrado público del paseo marítimo. El sistema funciona de forma aislada (Press, 2016).
- **MR Atenea (España):** conformada por 90 módulos fotovoltaicos, con una capacidad instalada de 275 kW, un aerogenerador de 25 kW, un grupo electrógeno diésel de 55 kVA, una micro turbina de gas de 30 kW y banco de baterías de 50 kW (CENER, n.d.).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- MR Bronsbergen Holiday Park (Países Bajos): alimenta 208 casas y está compuesto de 108 paneles fotovoltaicos. El sistema tiene una potencia de 315 kW y cuenta con una central de almacenamiento; además está conectada a la red (Lidula & Rajapakse, 2010).
- MR Am Steinweg - Stutensee (Alemania): es una prueba del proyecto Dispower que se compone de una PCH de 28 kW, varias instalaciones fotovoltaicas que totalizan 35 kW y una unidad de almacenamiento (Lidula & Rajapakse, 2010).
- MR - Kythnos (Grecia): Se encuentra conectada a la red principal, proporciona electricidad a 12 casas, con un sistema de energía solar fotovoltaica de 10 kW, un banco de baterías de 53 kWh y un generador diésel de 5 kVA (Mitra, Degner, & Braun, 2008).

En el caso de América del Norte, Estados Unidos cuenta con el consorcio CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions), que cuenta con los siguientes proyectos de MRs:

- Parque MR Mad River (California): abastece 6 instalaciones comerciales e industriales y 12 residenciales, cuenta con dos grupos de generadores de combustión de 280 kW y 100 kW, una micro turbina de 30 kW y varias instalaciones fotovoltaicas, además permite trabajar en modo aislado o conectado a la red (Systems, 2005).
- MR Palmdale Water (California): este sistema incorpora una turbina eólica de 950 kW, generadores de gas con capacidad de 250 kW y un ultra condensador de 450 kW (Bayindir, Hossain, Kabalci, & Billah, 2015).

Por otro lado, existen otros proyectos que no pertenecen a este consorcio como el siguiente:

- MR – Alcatraz: es una de las MRs más grandes de la nación, que integra un sistema de energía solar y diésel, cuenta con 959 paneles solares fotovoltaicos con una potencia total de 305 kW, 8 convertidores de potencia de 100 kW cada uno, 480

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

baterías con un total de capacidad de 1920 kW y 2 generadores diésel (“Welcome to Alcatraz: One of the Largest Microgrids in the United States | Department of Energy,” 2017).

Por otro lado, América del Norte cuenta también con proyectos destacados en Canadá, como los siguientes:

- MR Colville Lake: se encuentra en servicio desde el 2015, cuenta con 135 kW de generación fotovoltaica, 200kWh de almacenamiento en baterías de iones litio y generadores diésel (Prieur, 2015).
- MR - Columbia Británica: cuenta con dos aerogeneradores de 5 kW cada uno, módulos fotovoltaicos que totalizan 300 kW, turbina de 250 kW y una batería de 550 kWh, esta MR alimenta el Instituto de Tecnología de Columbia Británica (Hossain et al., 2014).

En el continente asiático, Japón es uno de los países que se ha comprometido con el uso de ER, en su mayoría sistemas eólicos y fotovoltaicos. Esto se debe a los recientes estudios e investigaciones de sus problemas de intermitencia, en la entrega de energía a sus usuarios.

Algunos proyectos son:

- MR Kyoto Eco-energy: Se encuentra funcionando desde el 2005, fue desarrollada por el consorcio NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization). Está conformada por una planta de motores a gas con una potencia total de 400 kW, pilas de combustible que totalizan 250 kW, un acumulador de plomo-acido de 100 kW y dos sistemas fotovoltaicos y una turbina eolia pequeña con total de capacidad de 50 kW (Hossain et al., 2014).
- MR de Aichi: fue construida NEDO, consiste en un sistema de suministro de pilas de combustible de capacidad de 270 kW y 300 kW, una célula de combustible de 25 kW, cuatro pilas de ácido fosfórico que totalizan 200 kW, 300 kW de generación

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

fotovoltaica y un almacenamiento de baterías. Todos los sistemas de combustible funcionan por biogás (Barnes et al., 2007).

China es uno de los países en el que el crecimiento de MRs ha sido notable, como consecuencia se tienen varios proyectos:

- MR project in Xinjiang: es la primera demostración de MR en china hecha en el 2005, la capacidad total de la MR es de 250kW, cuenta con paneles fotovoltaicos de 70kW, un generador diésel de 100kW y baterías de 80 kW. Además se puede conectar a la red (Zeng et al., 2013).
- MR in Hangzhou Dianzi Technology University: Fue construida en el 2008. Está compuesta por paneles fotovoltaicos que totalizan 120 kW, un generador diésel de 50 kW y supercondensadores de 100 kW (Zeng et al., 2013).
- MR in Hangzhou: se construyó en el 2010. Cuenta con paneles fotovoltaicos que totalizan 60 kW, un emulador de inducción de 30 kW, dos turbinas de viento de 5 kW cada una, un generador diésel de 250 kW, un acumulador de energía de 250 kW y baterías de plomo acido de 168 kWh (Zeng et al., 2013).

Por otro lado, en África y América del Sur también se pueden encontrar algunos proyectos:

- MR (Kenia): liderado por ABB (Asea Brown Boveri) que es una compañía innovadora especializada en generación de energía eléctrica, suministra energía eléctrica a las aldeas en ZNI de Kenia, se compone de un sistema eólico de 500 kW (ABB, 2015; Pearce, 2015).
- MR – Huatacondo (Chile): gestionada por la Universidad de Chile, cuenta con 22 kW de generación solar, 3 kW de generación eólica, 150 kW por combustión de gas y tiene 96 baterías de plomo-ácido que totalizan 170 kWh (Jiménez, 2012).
- MR (Isla Bonaire) realizada por EcoPower Bonaire, con capacidad de generación de 2.85 MW de motores diésel, 11 aerogeneradores que totalizan 1MW y un conjunto de baterías de níquel-cadmio con potencia de 3 MW (PEi, 2010).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.2. Tipos de generación de energía más utilizadas en MR

La energía distribuida de fuentes renovables se ha convertido en una opción importante para las MRs y cada vez las comunidades están incluyendo este tipo de tecnologías como una opción para satisfacer sus necesidades energéticas. En la Figura 1 se puede evidenciar el notable crecimiento del consumo de la energía solar y eólica a comparación de las energías convencionales.

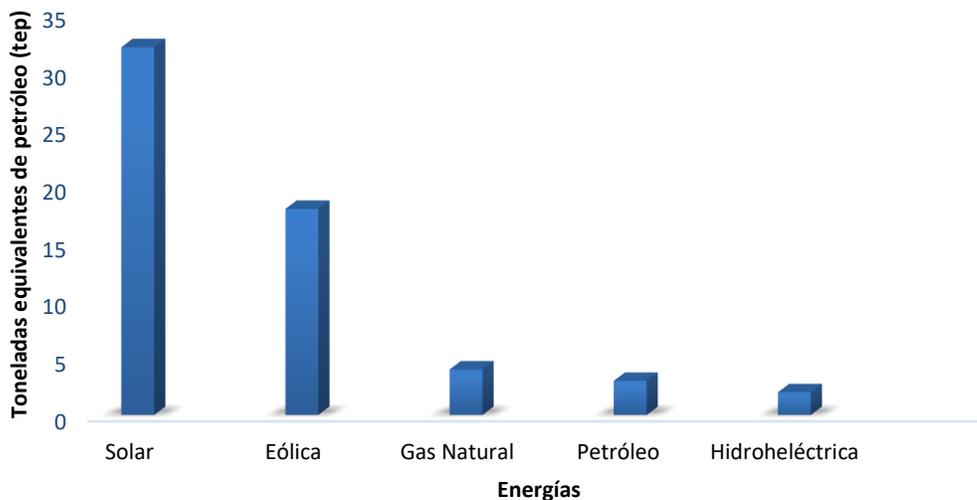


Figura 1. Crecimiento del consumo de energía en 2015. Fuente: (bp Global, 2015).

Aunque la mayoría de países desarrollados, han empezado a utilizar ER, aún hay un largo camino para su plena utilización. Entre las tecnologías más implementadas, de fácil captación y utilización se encuentran la energía solar y la eólica (Sultana, Sahoo, Sukchai, Yamuna, & Venkatesh, 2017). En la Figura 2 se puede evidenciar el crecimiento que han tenido las instalaciones de energía solar y eólica en el periodo de 2000-2017 y la capacidad proyectada para el año 2020.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

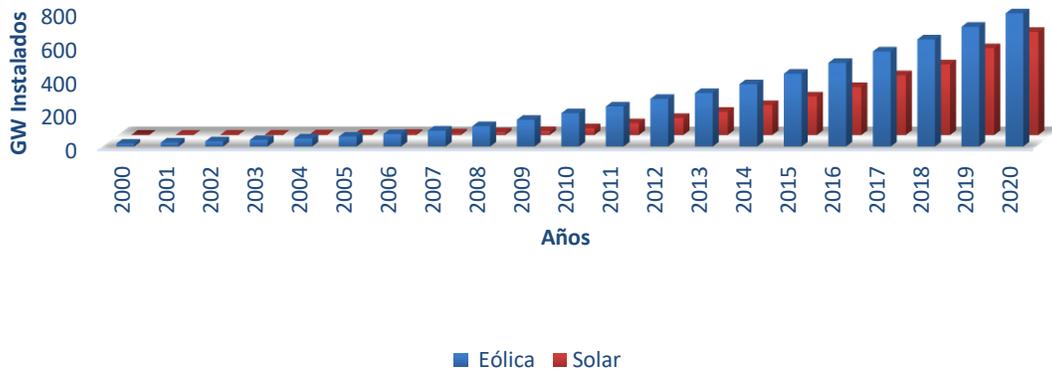


Figura 2. Crecimiento de la energía solar y eólica entre el año 2000 y 2020. Fuente: (“Powerweb,” n.d.)

La energía solar como fuente renovable de energía está siendo implementada en las MRs (Kannan & Vakeesan, 2016). Esto debido a que este recurso energético, es superior en términos de disponibilidad, siendo así la fuente más abundante de energía renovable. De la amplia investigación alrededor de esta tecnología, se tiene como consecuencia su gran evolución y aceptación, ya que el precio de los paneles fotovoltaicos ha disminuido considerablemente en los últimos 10 años (DOE, 2016) y esto ha ayudado a aumentar las instalaciones fotovoltaicas en un 50%. La industria solar está creciendo rápidamente, en la figura 2 se evidencia el aumento de la potencia de energía solar, que en el año 2000 generaba unos 1.3 MW y pasa a una cifra considerable en el 2017 de 355.000 MW. Además es probable que este mercado continúe creciendo en el futuro como ha crecido hasta ahora, debido a que más entes cada vez promueven el uso de este tipo de tecnología (Sampaio & González, 2017).

La capacidad de generación eólica aumentó más del 20% anual en los últimos 10 años, con un alcance de 392.927 MW a finales de junio del 2015, además todas las turbinas eólicas instaladas en el mundo de este mismo año pueden generar el 4% de la demanda mundial de electricidad (WWEA, 2016). Su precio ha disminuido a tal punto de favorecer su implementación junto con las políticas actuales que benefician a esta tecnología por

tratarse de una energía verde (Ho, 2016). Según datos de IRENA (International Renewable Energy Agency) el empleo en el sector eólico se ha elevado un 23%, lo cual se debe a que hoy en día implementar MRs con sistemas eólicos es mucho más accesible (Kumar et al., 2016).

Dentro de los países que mayor integración actual y proyectada tienen de estos tipos de ER dentro su matriz energética se encuentra China. Es uno de los países con los planes más ambiciosos de ER, ya que pretende instalar a finales de este año 120 GW de energía eólica y 43 GW de energía solar, lo que lo convierte en el país con los más altos índices de implementación de estas tecnologías, seguido por países como Alemania, Japón y Estados Unidos. En la figura 3 y la figura 4 se pueden evidenciar los países con mayor implementación de estas tecnologías en el 2015.

Por otro lado, se puede evidenciar que en el estudio de casos de MRs en el mundo, la mayoría de ejemplos de centros de estudios o proyectos en marcha, cuentan con una fuente de respaldo, por lo general siendo la generación diésel. Esto con el fin de aumentar la confiabilidad y seguridad en el sistema (Giraldo Gómez, 2016).

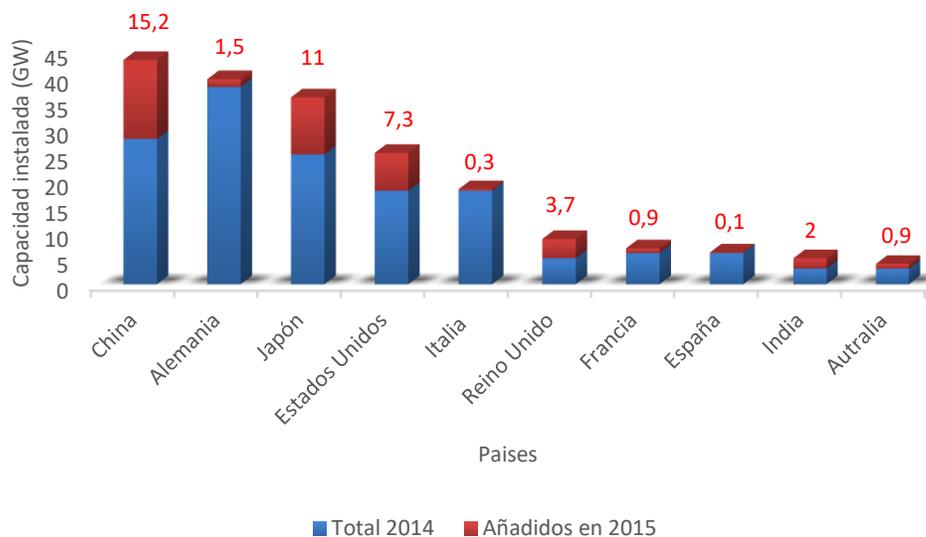


Figura 3. Capacidad de energía solar fotovoltaica en el 2015. Fuente:(Renewable Energy Policy Network, 2016).

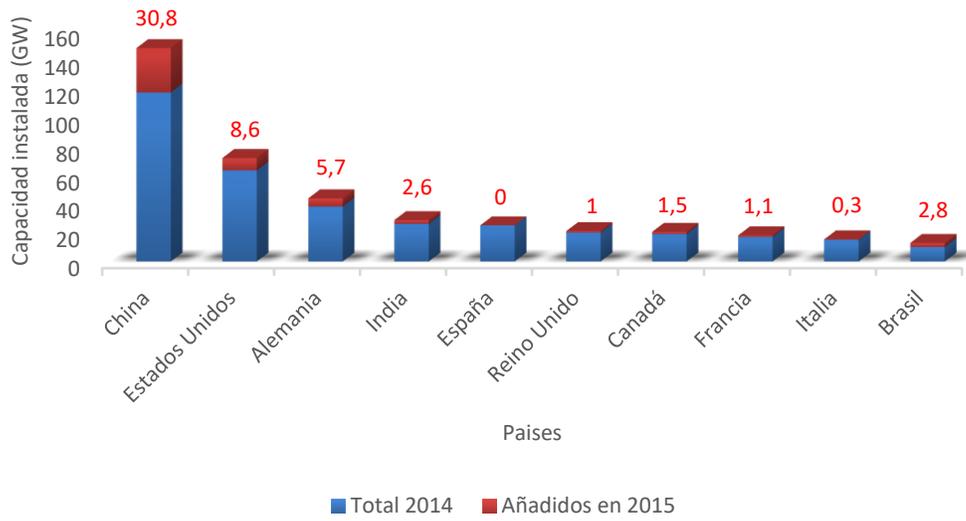


Figura 4. Capacidad de energía eólica en el 2015. Fuente: (Renewable Energy Policy Network, 2016)

4.2. Barreras que afectan la implementación de las MRs

Aunque la MR ha sido altamente estudiada en los últimos años, todavía no se ha masificado su implementación debido a las diferentes barreras que aún se presentan; las barreras identificadas se pueden clasificar como: técnicas, económicas y legislativas. Los impedimentos técnicos más comunes son: problemas con componentes tecnológicos, conmutación entre el modo conectado a la red y el modo isla, calidad y control de energía y problemas de coordinación de protecciones. Los problemas económicos de mayor impacto son los altos costos de inversión y de reconversión tecnológica (Systems, 2005). Las limitantes legislativas más comunes, están asociadas a las reglas políticas de cada país, que restringen la interconexión de las fuentes de generación distribuida (GD) con la red principal, la prohibición del flujo de energía bidireccional y el comercio local de energía, la falta de un marco regulatorio de conexión y de tarifas para este tipo de sistemas (Farrell, 2016). A continuación, se ampliará cada uno de los tipos de barrera anteriormente mencionados:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1. Barreras técnicas

Todavía es frecuente encontrar problemas de tipo tecnológico por equipos o elementos específicos de la MR; las unidades de generación aun no son tan eficientes y duraderas, los almacenadores presentan inconvenientes con el almacenamiento de grandes potencias, aun no hay una buena funcionalidad de convertidores e inversores con sistemas de comunicación y control, lo cual la disponibilidad comercial es todavía limitada en comparación con las tecnologías convencionales. Este tipo de desventajas se han podido superar mediante la incorporación y estudios exhaustivos de varias tecnologías y softwares de comunicación y control que garantizan la gestión óptima de la MR (Tao, Schwaegerl, Narayanan, & Zhang, 2011). Por ejemplo, en la MR de la isla de Utsira en Noruega, se pudo comprobar que la utilización de la energía eólica era de un solo 20% frente al 75% esperado, debido a que los generadores eólicos no eran tan eficientes como se esperaban, además presentaba dificultades en la pila de combustible, pues perdía el líquido refrigerante y su duración era muy corta. Por lo que se necesitó incluir electrolizadores más eficientes, mejorar la hidrogeno-electricidad y los generadores eólicos (Statoil ASA Enercon GmbH, 2004).

En el modo conectado a la red la falta de sincronización, de controles de voltaje y frecuencia, de inversores y convertidores con tiempo de respuesta rápida, tienen como consecuencia desajustes entre la generación y la carga lo cual genera un mal funcionamiento y hace que se vea afectada el funcionamiento de la MR. La MR de la cárcel de Santa Rita en los Estados Unidos es un claro ejemplo, esta mostraba dificultades asociadas con la transición en modo isla. Presentaba problemas de fiabilidad de la energía cuando había un apagón en la red central y el generador no empezaba a energizar de inmediato el sistema de la MR, el cual tenía una transición con fisuras (Marnay, Deforest, Lai, & Lawrence, 2012). Para el funcionamiento dual de la MR en forma conectada y desconectada se están

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

estudiando inversores y controles de voltaje con sistemas de control para mitigar estos desajustes (Teimourzadeh, Aminifar, & Davarpanah, 2017).

La protección de la red operando en forma conectada y desconectada sigue siendo uno de los mayores desafíos, puesto que no es fácil diseñar un sistema de protección bidireccional para la MR. Aun es frecuente encontrar fallos de cortocircuitos que pueden dañar los equipos y afectar el personal de la MR. Por lo tanto es necesario tener planes de protección para fallas externas e internas, para lo cual se instalan relés de protección que detecten condiciones anormales en el sistema, aíslen el fallo y cambien la configuración de retransmisión (Muntaz & Safak Bayram, 2017).

El control de potencia y frecuencia se ve constantemente vulnerado debido a la imprevisibilidad y dependencia climática de las ER, ya que la MR tiene diferentes componentes como los generadores eólicos y fotovoltaicos, micro turbinas, pilas de combustible, almacenadores, inversores, entre otros; los cuales pueden causar problemas de estabilidad, fiabilidad y calidad de la energía, tales como las fluctuaciones de voltaje y frecuencia, desequilibrio de potencia, etc. Se tiene como ejemplo la MR de Hachinohe en Japón, que experimentó caídas de frecuencia, tensión con arranques en AC, y además de esto presentó desequilibrios en la integración de varias tecnologías al mismo tiempo como las fotovoltaicas y eólicas (Kojima, 2009). Todo lo anterior limita a las MRs, por no contar con un servicio de flujo de energía estable a los consumidores. Para mantener el control de potencia y frecuencia se están adoptando algoritmos en sistemas de almacenamiento y convertidores que ayuden a mantener estable el sistema (Basak, Chowdhury, Halder Nee Dey, & Chowdhury, 2012).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.2. Barreras económicas

La mayoría de los artefactos tecnológicos que emplean las MRs como las energías de generación renovables, inversores, protecciones y tecnologías de almacenaje tienen precios elevados y manejan estructuras de precios inconsistentes que desventaja a las MRs ante las fuentes de suministro de energía convencionales. En el mercado global de las ER los precios son poco competitivos, lo que hace catalogar a la MR como un negocio no rentable. Se tiene como ejemplo la MR de la isla Utsira en Noruega que tuvo como conclusión la inviabilidad económica, ya que la planta de generación de viento-hidrogeno requería una célula de combustible de 10 kW, la cual era demasiado costosa para los 215 kW que generaba en total la MR (Statoil ASA Enercon GmbH, 2004). Para este caso se debe promover el comercio de estas tecnologías, para así generar un mercado equitativo que pueda competir con las tecnologías convencionales (Tao et al., 2011).

El apoyo financiero con el que cuentan hoy en día los sistemas de MRs es mínimo comparado con los subsidios para la generación con energías convencionales, teniendo como ejemplo los combustibles fósiles; además no es fácil encontrar un apoyo financiero del gobierno para facilitar la compra de estos elementos tecnológicos, por lo cual no se ven favorecidas en el comercio. Un ejemplo de esto es la MR en Am Steinweg en Alemania, que no contaba con el apoyo financiero del gobierno y encontró que eran demasiados costosos los controladores de flujo de potencia y sistemas de gestión de calidad, llegando a la conclusión que se debían bajar los costos o contar con apoyo económico del gobierno o entidades promotoras de ER para que la integración de este sistema pudiera ser factible (Lidula & Rajapakse, 2010). Para este caso cada país debe promover políticas efectivas con subsidios económicos para los proyectos de MRs que integren ER. Por lo cual se necesitan entidades financieras que puedan

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

desarrollar modelos de negocios sostenibles, que generen un panorama estable con apoyos económicos que verdaderamente beneficien y ayuden a promover las MRs (Romankiewicz et al., 2014).

Para empezar a implementar sistemas de energía renovable y la reconversión tecnológica asociada a esto, se tienen altos costos de inversión, lo cual dificulta la adquisición de las MRs. Además de esto, es difícil encontrar inversionistas debido a que el tiempo de retorno de la inversión es demasiado largo. Se tiene como ejemplo la MR Huatacondo en Chile, que encontró como desafío realizar la reconversión tecnológica, ya que en la comunidad donde se encontraban no era un área de altos recursos económicos y era un gran problema encontrar un buen inversionista para este proyecto (Reyes, 2011). Como soluciones a estos altos costos de inversión se puede incentivar estos proyectos con las siguientes alternativas: manejar una fácil importación de estas tecnologías, tener impuestos especiales, disminución de impuestos, préstamos de bajo interés para así lograr reducir los costos de inversión e incentivar el desarrollo de la MR (Soshinskaya et al., 2014).

4.2.3. Barreras legislativas

La mayor barrera para la implementación es el entorno regulatorio que cobija a las MRs, ya que muchos aspectos políticos restringen su implementación y pueden bloquear el despliegue de las MRs (Ali et al., 2017).

Los procedimientos administrativos para proyectos en marcha de MR son ineficaces, con un alto número de autoridades implicadas con falta de coordinación entre estas, los procedimientos no son transparentes y tienen largos plazos de entrega de respuesta con costos elevados para los solicitantes. Además, se presentan normas o códigos insuficientes que no están bien definidos y expresados en la norma. Para mitigar estos aspectos regulatorios se puede

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mejorar y racionalizar los procedimientos administrativos, con procesos transparentes y no discriminatorios para cualquier tipo de solicitud, que las autoridades competentes tengan plazos máximos de respuesta, con directrices claras, pocas limitaciones administrativas y procedimientos simplificados (Yoldaş, Önen, Muyeen, Vasilakos, & Alan, 2017).

La gestión para interconexión entre la MR y la red principal es demasiado extensa y en algunos casos difícil de obtener. Hay que contar con un gran número de permisos y licencias. Se tiene como ejemplos los casos de las MRs Sendai y Hachinoe en Japón, que tuvieron que tener una ardua gestión entre las compañías eléctricas y el operador de la MR, ya que prohibían el flujo de energía de las MRs hacia la red principal (Irie, 2012; Kojima, 2009). A pesar del creciente desarrollo, aun no existen políticas claras e instrumentos normativos para la integración de esta tecnología, lo cual dificulta el despliegue de las MRs (Klessmann, Held, Rathmann, & Ragwitz, 2011).

Todas estas regulaciones opacan los beneficios de las MRs, ya que no pueden conectarse a la red, viéndose altamente limitadas por las condiciones que restringen y eliminan cualquier posibilidad de ganancia económica en comercializar el producto eléctrico producido localmente. Se tiene como ejemplo el proyecto de MR Bronsbergen en los Países Bajos, al cual no se le permitía comercializar la energía desde los almacenadores (Loix, 2009). Como respuesta a estos problemas legislativos, cada país ha empezado a reestructurar sus políticas sobre la generación de energía, promoviendo el uso de esta tecnología, ayudando mediante apoyos económicos para incentivar las tecnologías verdes y así avanzar en su libre implementación (Saadeh, 2015).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3. Situación actual de las MR en Colombia

A continuación, se mostrará el panorama actual del sistema energético colombiano, los proyectos que se han ejecutado, las barreras que se pueden encontrar y dificultan el despliegue de las MRs, y adicionalmente las organizaciones que ayudan a promover este tipo de proyectos.

Como se puede evidenciar en la figura 5, gran parte de la generación del SIN de Colombia se da por medio de generación hidroeléctrica (69%). Debido al gran porcentaje del recurso hídrico del cual depende la generación eléctrica en este país, el SIN se puede ver afectado o estar en crisis por diferentes factores, como es el caso del fenómeno del “niño”, que consiste en la disminución de las lluvias y un aumento de la temperatura, que traen como consecuencia la sequía o disminución de los afluentes hídricos. Por otro lado, se encuentra el fenómeno de la “niña”, que causa un aumento en las precipitaciones hídricas, que traen como consecuencias inundaciones, deslizamientos, y elementos no deseados en los embalses (Gaona et al., 2015).

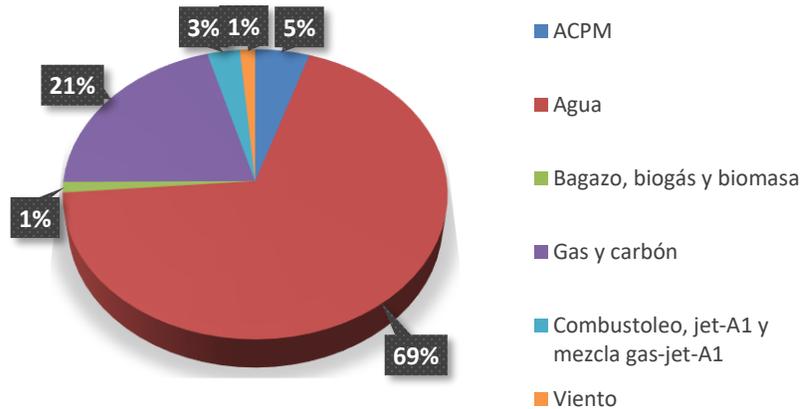


Figura 5. Matriz energética colombiana (diciembre del 2016). Fuente: (UPME, 2016)

Con la presencia de estos fenómenos se aumenta el uso de combustibles fósiles como respuesta a la escasez de la generación hidroeléctrica. Para mitigar el uso de combustibles fósiles cuando se presentan estos fenómenos, Colombia debería implementar las MRs para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

fortalecer la infraestructura del país como solución alternativa al SIN, diversificando su matriz energética, de tal forma que pueda mejorar la cobertura eléctrica nacional y evitar futuros problemas energéticos relacionados a los cambios climáticos que se puedan presentar.

4.4. Casos de MRs en Colombia

Este país es de inmensas riquezas naturales, cuenta con diferentes tipos de recursos renovables, como son la energía solar, eólica, hidráulica y biomasa (Vanegas Chamorro et al., 2014). Estas son las posibles formas de generar energía eléctrica que pueden ser utilizados tanto en las ZNI como en el SIN. Actualmente en Colombia se encuentran instalados 6 MW de energía solar, de los cuales el 57% se utiliza en zonas rurales y el 43% en alumbrado público, cuenta con una capacidad de energía eólica de 19.5 MW, tiene 197 PCHs con capacidad de 168.2 MW aproximadamente. Con respecto a la biomasa se tiene una capacidad instalada aproximada de 16.260 MWh, que está distribuido en 658 MWh de biodiesel, 2.640 MWh de bioetanol, 11.828 MWh de residuos agrícolas, 442 MWh de residuos de plantaciones forestales y 698 MWh de residuos forestales (CorpoEma, 2010a; Gaona et al., 2015). Aunque estas instalaciones utilizan fuentes de ER, no se cuentan como proyectos de MRs, puesto que no cumplen con las características descritas en secciones anteriores, pero aun así demuestran el potencial energético de las ER en Colombia, que pueden usarse también en MRs.

A continuación, se presentan algunos proyectos de MRs en el país:

- Parque de Generación Energética – Alta Guajira: cuenta con una capacidad de 684 kW y un banco de baterías de 480 V (IPSE, 2016a).
- Planta de generación solar PV-Diésel en Isla Fuerte Bolívar: cuenta con dos generadores diésel de 150 kW cada uno y un sistema fotovoltaico de 175 kW (IPSE, 2016d).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Planta de generación Titumate - Chocó: cuenta con 450 paneles solares fotovoltaicos con capacidad total de 105 kW y 124 kW de generación diésel (IPSE, 2014).
- MR Cali: cuenta con 88 kW de generación solar, 500 kW de generación gas/diésel y 500 kW de generación hidráulica (Microgrid Media, n.d.).
- Sistema Híbrido Diésel / Solar – Santa Cruz del Islote Cartagena: Cuenta con una capacidad solar de 67 kW, 144 baterías con capacidad total de 4800 Ah y una unidad de generación diésel de 116 kW (IPSE, 2016b).
- MR UPB- Medellín: Cuenta con 20 paneles solares con una capacidad proyectada entre 50 kW y 70kW , tiene una capacidad eólica máxima de 10 kW aproximadamente, además tiene una capacidad de almacenamiento de 50 kWh con baterías de plomo ácido gelificadas (UPB, 2014).
- PCH Bahía Solano -Chocó: cuenta con una central diésel de 1.600 kW y generación hidroeléctrica de 1.875 kW (Gensa, 2016).
- Sistema híbrido Diésel / Solar - Isla Múcura Cartagena: cuenta con una capacidad solar de 30 kW, 96 baterías con capacidad total de 2500 Ah y una unidad de generación diésel de 116 kW (IPSE, 2016c).

Existen además sistemas de GD importantes, que aunque no hacen parte de las MRs vale la pena mencionar, como son:

- Parque Eólico Jepírachi: es el primer parque de generación de energía eólica del país. Está ubicado en la costa atlántica de la región nororiental colombiana, cuenta con una potencia nominal de 15.5 MW, lo constituyen 15 aerogeneradores de 1.3 MW cada uno (EPM, n.d.).
- Planta generadora de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos – San Andrés Isla: Esta planta funciona con la quema de residuos sólidos con una potencia nominal de 800 kW (Energía Archipiélago, 2013).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Planta Incubadora Santander- Norte del Cauca: Esta planta funciona a partir de la biomasa y tiene una potencia nominal de 4.4 MW (El tiempo, 2017).

4.5. Barreras colombianas para las MRs

Con el objetivo de promover el desarrollo y utilización de FNCE renovables para abastecer el SIN y las ZNI, se crea la ley 1715 de 2014 (Congreso de Colombia, 2014). La ley establece un marco legal con instrumentos para la promoción, inversión, investigación y desarrollo de la gestión eficiente de la energía. Este país, aunque tiene el potencial geográfico y cuenta con los recursos naturales para implementar las MRs con energías verdes, presenta muchas de las barreras detectadas a nivel mundial. A continuación, se nombrarán a través de su clasificación:

4.5.1. Barreras económicas:

Debido a que el esquema eléctrico con el cual cuenta actualmente Colombia es de generación centralizada, el mercado eléctrico colombiano está conformado por entidades con un alto porcentaje de participación. Dado esto, las MRs no se ven favorecidas, ya que se puede notar un gran privilegio para apoyar proyectos centralizados. Esto trae como consecuencia que no exista un alto apoyo económico a las MRs, lo cual genera poca demanda en este tipo de proyectos; eso sumado, a que no se logra competir en términos económicos con proyectos a gran escala (Marín Jiménez, 2013).

Otra barrera con respecto a las ZNI, parte de su ubicación geográfica, puesto que acceder a estas zonas en muchos casos es complejo, y este factor se verá reflejado en un aumento de los costos de inversión de la MR (Tolón & Tamara, 2013).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La puesta en marcha de una MR con FNCE renovables presenta una inversión más elevada y la remuneración económica se presenta en un periodo de tiempo más largo comparado con los sistemas con FCE. Esto es debido a que las implementaciones de estas nuevas tecnologías no son tan comunes y hace que los precios sean demasiados elevados (CorpoEma, 2010b).

4.5.2. Barreras tecnológicas:

Actualmente Colombia es un país donde es más difícil hacer proyectos con FNCE debido a que cuenta con un mercado cerrado donde predominan las FCE y hace que se dificulte la entrada de nuevas tecnologías que sean modernas, más amigables con el medio ambiente y virtualmente inagotables (Cortés Francisca, 2008).

Debido al poco potencial tecnológico con que cuenta Colombia, las MRs no son 100% confiables debido a que se necesita integrar nuevas tecnologías que permitan sustituir la mayoría de equipos de bajo rendimiento con las que cuenta el país, como lo son los almacenadores, inversores, convertidores, protecciones entre otros y así mejorar la eficiencia de estos sistemas (Rodríguez Hernández, 2009).

En las MRs aisladas es común ver fallas en la sincronización entre sus componentes, como lo son los generadores distribuidos, almacenadores, convertidores e inversores. Esto hace que las fallas se vuelvan frecuentes, el cual convierte la MR en un servicio no confiable (Rodríguez Hernández, 2009).

Al ser prácticamente nuevas las MRs en Colombia, estas se ven afectadas en su coordinación y operación con el sistema energético colombiano. Esto sucede porque la malla energética de los sistemas de distribución fue diseñada para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

entregar potencia de forma unidireccional y no bidireccional como se necesita. Entonces esto conlleva a que la implementación de las MRs se vea limitada ya que puede generar afectaciones a la red de distribución o al sistema de generación (Cortés Francisca, 2008).

La operación de la MR en la transición de modo conectado a aislado y viceversa, es uno de los principales problemas tecnológicos debido a que los artefactos deben ser de tecnología avanzada y alta velocidad de operación, ya que se necesita una alta sincronización para poder aislar la MR en caso de falla o mantener estable la tensión, corriente y frecuencia en el modo conectado a la red (Cortés Francisca, 2008).

4.5.3. Barreras legislativas:

Las influencias de los marcos regulatorios que fueron desarrollados para la legislación y organización del esquema eléctrico centralizado de Colombia han sido un impedimento para la implementación de las MRs ya que no concibe el desarrollo de la GD sino el desarrollo de la generación centralizada (Rodríguez Hernández, 2009).

La normatividad vigente no permite el desarrollo de proyectos de MRs con FNCE debido a que las políticas actuales tienen pocos incentivos tributarios, los tramites de financiación son numerosos, lentos y de difícil acceso. Por otro lado, el retorno de la inversión se da en un plazo muy largo y adicionalmente los programas de promoción, investigación y desarrollo de estas tecnologías no son suficientes (Cortés Francisca, 2008; Rodríguez Hernández, 2009).

Debido a la falta de regulación que especifique todos los aspectos y requerimientos necesarios para las MRs con FNCE, se genera una alta

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

incertidumbre en el marco legal y productivo de esta nueva tecnología (CorpoEma, 2010).

Como solución a estos inconvenientes legislativos el Ministerio de Minas y Energía (MME) ha determinado que la ampliación y cobertura del servicio de energía que no sea económicamente viable conectar al SIN, prestará el servicio mediante soluciones aisladas como MRs y las inversiones serán efectuadas por empresas prestadoras del servicio o a través de recursos públicos (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

Junto a esto, el gobierno nacional de Colombia pone en marcha la ley 1715 de mayo de 2014, la cual estipula y promueve el desarrollo de FNCE renovables en el SIN y en las ZNI, un desarrollo económico sostenible, la protección ambiental y seguridad del abastecimiento energético. Esta ley presenta beneficios económicos para la ejecución de proyectos que generan energía eléctrica a través de FNCE como los siguientes (Ministerio de Minas y Energía, 2014):

- Los proyectos de ER podrán disminuir en un 50% la declaración de renta de la inversión realizada en el proyecto hasta por 5 años desde su ejecución y hace que la recuperación de la inversión sea en tiempo no tan prolongado.
- Toda la maquinaria, equipos, materiales e insumos necesarios para estos proyectos quedan exentos del impuesto sobre el valor agregado (IVA).
- Toda la inversión que se haga en elementos y artefactos tecnológicos necesarios para los proyectos y se encuentren en el exterior, contarán con el privilegio de la exención del pago de derechos arancelarios por las importaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Se cuenta con el aumento en la depreciación de los activos implementados en los proyectos, para así evitar pérdida de capital.

Aunque esta ley menciona varios beneficios para la implementación de FNCE, falta detalle de cómo se puede ejecutar y trae como consecuencia que la metodología de esta ley resulte ser bastante problemática debido que para la aprobación de proyectos se requiere respuesta de dos ministerios; el de Minas y Energía, y el de Medioambiente y Desarrollo Sostenible, donde predominan procedimientos desconocidos , amplios tiempos de aprobación, altos costos de trámites y no se tiene claro el proceso que se debe ejecutar. Por otra parte, aunque esta ley se encuentra constituida, aún hace falta trabajar al detalle en algunos aspectos como:

- La conexión y operación de la GD y autogeneración a pequeña escala.
- Reglamentos tecnológicos que rijan la generación con las diferentes FNCE y la entrega de excedentes de autogeneración al SIN.
- Procedimientos de conexión, operación, respaldo y comercialización de energía de la autogeneración a pequeña escala de la GD.
- Venta y mecanismos para contabilizar la entrega de excedentes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones:

- Este trabajo presenta un análisis de las MRs en Colombia, partiendo del estudio de la arquitectura de la MR, sus componentes y funcionalidades. Igualmente revisa las barreras, los casos de éxitos en el mundo. Para finalizar con el estudio del marco regulatorio, económico, tecnológico y proyectos actuales de MRs implementadas en Colombia.
- Como consecuencia de los altos índices de contaminación ambiental que se presenta hoy en día a nivel mundial, la integración de MRs está evolucionando rápidamente debido a que son sistemas emergentes que permiten la integración de FNCE renovables, lo cual hace que sean vistas como alternativa para la evolución de las redes eléctricas y puedan ser una solución viable para mejorar la eficiencia disminuyendo las pérdidas energéticas y principalmente abastecer a las ZNI.
- Las MRs aunque han atraído la atención de la comunidad científica y el mercado global, aun gran cantidad de las tecnologías implementadas además de las técnicas de gestión y control están en desarrollo, y hacen que la mayoría de proyectos de MRs se encuentren en estado de investigación o pruebas piloto.
- El esquema jurídico colombiano debe diseñar y reestructurar la normativa vigente, para así generar una legislación transparente que mantenga regulado la implementación de las MRs en Colombia.
- Los incentivos con los que cuentan las MRs no son de gran impulso debido a que estos proyectos presentan una inversión más elevada, complicaciones tecnológicas y además, no se logra competir económicamente con los proyectos a gran escala.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Aunque el panorama eléctrico colombiano cuenta con buena participación de ER, hoy en día se encuentra muy susceptible a los cambios climatológicos, debido a que cuenta con demasiados proyectos centralizados de recursos hídricos y se encuentran pocos proyectos de MRs que respalden a las ZNI y el SIN en Colombia. Por lo cual en pro de diversificar la matriz energética se requiere la integración de MRs.

Recomendaciones:

Para promover los estudios e inversiones de estos proyectos de MRs en Colombia, se deben aclarar las leyes y los pasos que se deben seguir para llevar a cabo estos tipos de proyectos, además de reducir los tiempos y costos de los trámites para su implementación; para así conocer los procesos que se deben ejecutar tanto para su implementación y obtención de incentivos.

Trabajo futuro:

Conociendo el esquema estructural de una MR con FNCE, los parámetros, requisitos y toda la normativa pertinente de la GD, es posible realizar el diseño de un MR para una región específica del territorio colombiano, teniendo en cuenta el análisis técnico-económico para su desarrollo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- ¿Qué es y cómo funciona la biomasa? | Sostenibilidad para todos. (n.d.). Retrieved June 15, 2017, from <http://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/que-es-y-como-funciona-la-biomasa/>
- ABB. (2015). Una comunidad remota de Kenia utiliza una solución ABB para micro-redes que incrementa el uso de energía renovable. Retrieved July 23, 2017, from <http://www.abb.es/cawp/seitp202/5cd0955ba9240a10c1257ec10065f780.aspx>
- Ahmad Khan, A., Naeem, M., Iqba, M., Qaisar, S., & Anpalagan, A. (2016). A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *58*, 1664–1683. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115016421>
- Ali, A., Li, W., Hussain, R., He, X., Williams, B., & Memon, A. (2017). Overview of Current Microgrid Policies, Incentives and Barriers in the European Union, United States and China. *Sustainability*, *9*(7), 1146. <https://doi.org/10.3390/su9071146>
- Ávila Swinburn, F. I. (2013). *Diseño de un sistema de gestión de demanda para micro-redes*. Universidad de Chile. Retrieved from http://www.cec.uchile.cl/~dsaez/wp-content/uploads/2017/03/cf-avila_fs.pdf
- Barnes, M., Kondoh, J., Asano, H., Oyarzabal, J., Ventakaramanan, G., Lasseter, R., ... Green, T. (2007). Real-World MicroGrids-An Overview. In *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2007.4304255>
- Basak, P., Chowdhury, S., Halder Nee Dey, S., & Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*, 5545–5556. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.043>
- Bayindir, R., Hossain, E., Kabalci, E., & Billah, K. M. M. (2015). Investigation on North American Microgrid Facility. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, *5*(2), 558–574. Retrieved from <http://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/2203>
- bp Global. (2015). Statistical Review of World Energy. Retrieved September 1, 2017, from <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- CENER. (n.d.). Atenea-Microgrid. Retrieved August 13, 2017, from <http://www.cener.com/es/areas-de-investigacion/departamento-de-integracion-en-red-de-energias-renovables/infraestructuras-y-recursos-tecnicos/atenea-microgrid-cener/atenea-microgrid-cener/>
- CorpoEma, C. energético. (2010a). *Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia PDFNCE*. Bogotá (Colombia).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- CorpoEma, C. energético. (2010b). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. Retrieved from http://www.upme.gov.co/sigic/documentosf/vol_2_diagnostico_fnce.pdf
- Cortes, L. (2016). *Operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes*. Universidad Tecnológica de Pereira. Retrieved from <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/7410/62131C828.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cortés Francisca. (2008). *Estudio de factibilidad del uso de micro generación en base a energías renovables en redes de baja tensión*. Universidad de Chile. Retrieved from http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/cortes_fg/sources/cortes_fg.pdf
- DOE. (2016). El periódico de la energía. Retrieved September 1, 2017, from <http://elperiodicodelaenergia.com/la-increible-reduccion-de-costes-de-las-tecnologias-renovables-en-los-ultimos-siete-anos/>
- El tiempo. (2017, April 27). Avícola que funcionará con la energía de la gallinaza. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/colombia/cali/incubadora-santander-con-planta-de-energia-renovable-en-el-cauca-81924>
- Enríquez, M. (2014). *Análisis del emplazamiento de un generador eólico en una vivienda urbana usando técnicas CFD*. Universidad de Chile. Retrieved from <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/131578/Analisis-de-emplazamiento-de-un-generador-eolico-en-una-vivienda-urbana....pdf?sequence=1>
- Farrell, J. (2016). Breaking the Macro Barriers to Microgrids. Retrieved August 31, 2017, from <http://www.renewableenergyworld.com/ugc/articles/2016/03/breaking-the-macro-barriers-to-microgrids.html>
- Foro nuclear. (2017). Fuentes de energía no renovables | Rincón Educativo. Retrieved June 15, 2017, from <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/fuentes-de-energia-no-renovables>
- Gaona, E. , Trujillo, C. L., & Guacaneme, J. A. (2015). Rural microgrids and its potential application in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 125–137. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115004499>
- Gensa. (2016). *En Bahía Solano*. Retrieved from <http://www.gensa.com.co/psw/wp-content/uploads/2016/12/separata-bsolano-w.pdf>
- Giraldo Gómez, W. D. (2016). *Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/53470/1/1017168710.2016.pdf>
- Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Scielo*, 25, 175–188. Retrieved from http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642014000200020&script=sci_arttext

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Hatziaargyriou, N., Asano, H., Iravani, R., & Marnay, C. (2007). Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine*, 5(4), 78–94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>
- Ho, L.-W. (2016). Wind energy in Malaysia: Past, present and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 279–295. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.054>
- Hossain, E., Kabalci, E., Bayindir, R., & Perez, R. (2014). Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86, 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.012>
- Imulauer, K., Pera, R., Bartels, S., & Brandes, S. (2007). Market and business chances in the EU in the field of renewable energies and energi efficiency. In *INTELEC 07 - 29th International Telecommunications Energy Conference* (pp. 477–480). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2007.4448825>
- IPSE. (2014). *Titumate (Unguia - Chocó)*. Retrieved from http://190.216.196.84/CNM/Data/informes_telemetria/TITUMATE - UNGUIA - CHOCO - 122014.pdf
- IPSE. (2016a). Alta Guajira con 24 horas de energía eléctrica. Retrieved August 23, 2017, from <http://www.ipse.gov.co/component/content/article/2-uncategorised/1046-alta-guajira-con-24-horas-de-energia-electrica>
- IPSE. (2016b). *Informe Mensual de Telemetría*. Cartagena. Retrieved from http://190.216.196.84/CNM/Data/informes_telemetria/SANTA CRUZ DEL ISLOTE - CARTAGENA - BOLIVAR - 052016.pdf
- IPSE. (2016c). *Informe mensual de telemetría isla mucura*. Retrieved from http://190.216.196.84/CNM/Data/informes_telemetria/ISLA MUCURA - CARTAGENA - BOLIVAR - 052016.pdf
- IPSE. (2016d). *Isla Fuerte (Cartagena - Bolivar)*. Retrieved from http://190.216.196.84/CNM/Data/informes_telemetria/ISLA FUERTE - CARTAGENA - BOLIVAR - 052016.pdf
- Irie, H. (2012). *Sendai Microgrid*. Retrieved from http://e2rg.com/microgrid-2012/Sendai_Irie.pdf
- Jiménez, G. (2012). *Chile energy supply challenge: Microgrids solutions International Smartgrid Communication Korea -LAC*. Retrieved from <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36861477>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Klessmann, C., Held, A., Rathmann, M., & Ragwitz, M. (2011). Status and perspectives of renewable energy policy and deployment in the European Union—What is needed to reach the 2020 targets? *Energy Policy*, 39, 7637–7657. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.038>
- Kojima, Y. (2009). *Operation Result of the Hachinohe Microgrid Demonstration Project*. Retrieved from https://building-microgrid.lbl.gov/sites/default/files/Kojima_2009.pdf

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Kumar, Y., Ringenberg, J., Depuru, S. S., Devabhaktuni, V. K., Lee, J. W., Nikolaidis, E., ... Afjeh, A. (2016). Wind energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.200>
- Lasseter, R. H. (2002). MicroGrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org.itm.elogim.com/document/985003/>
- Lidula, N. W. A., & Rajapakse, A. D. (2010). Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.041>
- Llanos Proaño, J. del R. (2012). *Método para la generación de perfiles de demanda en comunidades aisladas y predicción de demanda de corto plazo, para micro-redes basadas en energías renovables*. Universidad de Chile. Retrieved from http://www.cec.uchile.cl/~dsaez/wp-content/uploads/2017/03/cf-llanos_jp.pdf
- Loix, T. (2009). *The first microgrid in the Netherlands*. Retrieved from <http://www.olino.org/wp-content/uploads/2009/10/microgridbrons.pdf>
- Manríquez, S. P. (2013). *Análisis técnico-económico para la implementación de microredes eléctricas en Chile*. Universidad de Chile. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115612/cf-pribnow_sm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marnay, C., Chatzivasileiadis, S., Abbey, C., Irvani, R., Joos, G., Lombardi, P., ... von Appen, J. (2015). Microgrid Evolution Roadmap. In *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)* (pp. 139–144). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SEDST.2015.7315197>
- Marnay, C., Deforest, N., Lai, J., & Lawrence, E. O. (2012). A Green Prison: The Santa Rita Jail Campus Microgrid. Retrieved from <https://eta.lbl.gov/sites/default/files/publications/eetdbl-gov-ea-emp-reports-lbnl-5345e.pdf>
- Martin-Martínez, F., Sánchez-Miralles, A., & Rivier, M. (2016). A literature review of Microgrids: A functional layer based classification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1133–1153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.025>
- Microgrid Media. (n.d.). Microgrid Projects. Retrieved August 15, 2017, from <http://microgridprojects.com/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). Energía Eléctrica. Retrieved September 18, 2017, from <https://www.minminas.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>
- Mitra, I., Degner, T., & Braun, M. (2008). Distributed Generation and Microgrids for Small Island Electrification in Developing Countries: A Review. *Solar Energy Society of India*, 18, 6–20. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Martin_Braun5/publication/43535952_Distributed_generation_and_microgrids_for_small_island_electrification_in_developing_countries_A_revie

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

w/links/53e44b530cf21cc29fc8f424.pdf

- Muntaz, F., & Safak Bayram, I. (2017). Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. *Energy Procedia*, 107, 94–100. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021631726X>
- Pearce, F. (2015). Luces de África: las microrredes suministran electricidad a las zonas rurales de Kenia : Environment 360. Retrieved June 7, 2017, from <http://e360yale.universia.net/luces-de-africa-las-microrredes-suministran-electricidad-a-las-zonas-rurales-de-kenia/>
- PEi. (2010). Bonaire: Isla de los sueños verdes - Power Engineering International. Retrieved August 15, 2017, from <http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-18/issue-5/features/bonaire-island-of-green-dreams.html>
- Piagi, P., & Lasseter, R. H. (2006). Autonomous Control of Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1–8. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org.itm.elogim.com/document/1708993/>
- Planas, E., Andreu, J., Gárate, J. I., Martínez de Alegría, I., & Ibarra, E. (2015). AC and DC technology in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 726–749. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010065>
- Powerweb. (n.d.). Retrieved September 1, 2017, from <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html#TOP>
- Press, E. (2016). Endesa integra su primera “microgrid” en España para estudiar el funcionamiento eléctrico. Retrieved August 13, 2017, from <http://www.europapress.es/andalucia/malaga-00356/noticia-endesa-integra-primera-microgrid-espana-estudiar-funcionamiento-electrico-20160510183601.html>
- Prieur, A. (2015). *Remote Northern Microgrids in Canada*. Retrieved from <http://microgrid-symposiums.org/wp-content/uploads/2015/10/25-Prieur-Remote-Northern-Microgrids-20150817.pdf>
- Renewable Energy Policy Network. (2016). *Energías renovables*. Retrieved from http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf
- Rodríguez Hernández, A. (2009). *La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional*. Bogotá. Retrieved from <https://www.naturgas.com.co/uploads/circulares/2009/N53.anxpdf.pdf>
- Roldán Vilorio, J. (2008). *Fuentes de energía*. Paraninfo. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1VSdl7o_t2kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=energia++norenovable&ots=aEsdp-UBg0&sig=FO03EDuXTgJxh3fCa53RapMKtVU#v=onepage&q&f=false
- Romankiewicz, J., Marnay, C., Zhou, N., & Qu, M. (2014). Lessons from international experience for China’s microgrid demonstration program. *Energy Policy*, 67, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.059>
- Saadeh, O. (2015). Microgrids Flourishing in Spite of Regulatory Barriers. Retrieved August 31,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2017, from <https://www.greentechmedia.com/articles/read/microgrids-flourishing-in-spite-of-regulatory-barriers>

Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 590–601.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>

Soshinskaya, M., Crijns-Graus, W. H. J., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Microgrids: Experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>

Statoil ASA Enercon GmbH. (2004). *Utsira Wind Power and Hydrogen Plant*. Retrieved from http://www.iphe.net/docs/Renew_H2_Ustira.pdf

Sultana, W. R., Sahoo, S. K., Sukchai, S., Yamuna, S., & Venkatesh, D. (2017). A review on state of art development of model predictive control for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.058>

Systems, N. P. (2005). Update on Mad River MicroGrid and Related Activities. Retrieved from http://microgrid-symposiums.org/wp-content/uploads/2014/12/berkeley_lync.pdf

Tan, X., Li, Q., & Wang, H. (2013). Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. *Electrical Power and Energy Systems*, 44(1), 179–191. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512003754>

Tao, L., Schwaegerl, C., Narayanan, S., & Zhang, J. H. (2011). From laboratory Microgrid to real markets — Challenges and opportunities. In *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia* (pp. 264–271). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944600>

Teimourzadeh, S., Aminifar, F., & Davarpanah, M. (2017). Microgrid dynamic security: Challenges, solutions and key considerations. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.04.015>

Tian, P., Xiao, X., Chen, Y., Jing, T., Huang, X., & Zhi, N. (2017). The key technologies and analysis of research state of microgrid community. *Resources, Conservation & Recycling*, 121, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.005>

Tolón, M., & Tamara, I. (2013). Operación y gestión de microrredes energéticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energética y ambiental. Retrieved from http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19411/TamaraTolon_MemoriaTFM_Deposito.pdf?sequence=1

UPB. (2014). Micro Red inteligente. Retrieved September 22, 2017, from <https://microred.upb.edu.co/>

UPME. (2016). Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano. Retrieved September 21, 2017, from http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2016/Segui_variables_dic_2016.pdf

Ustun, T. S., Ozansoy, C., & Zayegh, A. (2011). Recent developments in microgrids and example cases around the world — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4030–

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4041. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.033>

Vanegas Chamorro, M., Valencia Ochoa, Gu., Vega Clavijo, L., Cortes Pérez, D., Silva Zapata, D., Cárdenas Escorcia, Y., ... Núñez Fuentes, N. (2014). *Energía Renovable*. Barranquilla . Retrieved from http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/cartilla_energia_renovable.pdf

Welcome to Alcatraz: One of the Largest Microgrids in the United States | Department of Energy. (2017). Retrieved August 13, 2017, from <https://energy.gov/eere/articles/welcome-alcatraz-one-largest-microgrids-united-states>

WWEA. (2016). *Wind Energy Around the World*. Retrieved from http://www.wwindea.org/download/wwea_quaterly_bulletin/Bulletin_2_2016_reduced.pdf

Xu, B., Wang, Y., Dvorkin, Y., Fernandez-Blanco, R., Silva-Monroy, C. A., & Watson, J.-P. (2017). Scalable Planning for Energy Storage in Energy and Reserve Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, *PP(99)*, 1–13. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org.itm.elogim.com/stamp/stamp.jsp?arnumber=7879307>

Yoldaş, Y., Önen, A., Muyeen, S. M., Vasilakos, A. V., & Alan, İ. (2017). Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.064>

Zeng, Z., Zhao, R., Yang, H., & Tang, S. (2013). Policies and demonstrations of micro-grids in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *29*, 701–718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.015>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES _____

Nivei Mesa
Fecha: 9 de octubre de 2017

FIRMA ASESOR _____

BONTE J. ROBERTO C
FECHA: 9 de octubre de 2017

Jairo Fernando Acosta W
Fecha: 9 de octubre de 2017

FECHA ENTREGA: 9 de Octubre de 2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____