



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group – JWG C6.C5.4



DOCUMENTO TÉCNICO

REGULACIÓN, NORMATIVA Y NUEVOS MERCADOS EN MICRORREDES EN EL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO

ABRIL 2021



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
 Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
 Join Group - JWG C6.C5.4.

Tabla de Contenido

Página

Contenido

REGULACIÓN, NORMATIVA Y NUEVOS MERCADOS EN MICRORREDES	5
1. GENERALIDADES	6
2. PARTICIPANTES	6
3. ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	7
4. INTRODUCCIÓN	8
5. ESTANDARIZACIÓN DE CONCEPTOS Y DEFINICIONES PARA MICRORREDES	8
5.1 Conceptos y definiciones	8
5.2 Definición de Microrred	9
5.3 Componentes de una Microrred	11
5.4 Operación y Control de Microrredes	14
5.5 Ambientes de simulación en tiempo real de acuerdo con la Normativa IEEE 2030.7 e IEEE 2030.8	15
6. GENERACIÓN DE NUEVOS MERCADOS ANTE LA PENETRACIÓN DE LOS DER Y LAS MICRORREDES	16
6.1 Agentes involucrados e interacciones	18
6.1.1 Microrred aislada	18
6.1.2 Microrred conectada a la red	18
6.1.3 Prosumidores	18
6.1.4 Agregadores	18
6.1.5 Comunidades energéticas	19
6.1.6 Desarrollo conceptual de agregadores de energía bajo la figura de Virtual Power Plants (VPP)	22
6.1.7 Participación Activa de la Demanda	23
6.2 Objetos transaccionales - Flexibilidad y servicios auxiliares	25
6.3 Arquitecturas de mercado para las DER y MR	28



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group - JWG C6.C5.4.

7. ESTADO ACTUAL EN LA INTEGRACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS EN COLOMBIA	31
8. INVESTIGACIÓN SECTORIAL	35
8.1 Metodología de la encuesta	35
8.2 Análisis de la encuesta	35
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
10. REFERENCIAS	44

	Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa Join Group - JWG C6.C5.4.
---	--

Listado de Figuras

Figura 1. Composición general de una MR [creación propia].....	12
Figura 2. Comparación entre tipos de bancos de pruebas de potencia y la fidelidad del sistema [19].	16
Figura 3. Estructura de mercado completo de energía eléctrica para Colombia.	17
Figura 4. Tabla de similitudes y diferencias en las definiciones de comunidades [20].	20
Figura 5. Iniciativas, Proyectos y Casos de Estudio en la Academia y Empresariales.	31
Figura 6. Actores en el proceso de implementación de las microrredes.	36
Figura 7. Proyectos de Microrredes.	36
Figura 8. Estado de Avance de las Microrredes.	37
Figura 9. Ubicación geográfica de las Microrredes en Colombia.	37
Figura 10. Año de entrada en Operación de las Microrredes.	38
Figura 11. Otros elementos a considerar en las Microrredes.	38
Figura 12. Conexión de las Microrredes.	39
Figura 13. Normatividad de las Microrredes.	39
Figura 14. Impulsores de las Microrredes.	39
Figura 15. Opciones de Microrredes.	40
Figura 16. Barreras en la implementación de Microrredes.	40

Listado de Tablas

TABLA 1. Comparación entre MR y generación distribuida	13
TABLA 2. Panorama político, regulatorio y normativo en Colombia ante la adopción de cada una de las tecnologías DER	33



REGULACIÓN, NORMATIVA Y NUEVOS MERCADOS EN MICRORREDES

RESUMEN

En la última década, los sistemas eléctricos de potencia se han expandido de manera vertiginosa, creando necesidades y requerimientos cada vez más complejos en áreas como generación distribuida (DG, sigla en inglés), uso de fuentes renovables, microrredes, medición, comunicaciones, ciberseguridad, entre otros.

Por otro lado, el cambio climático y el deterioro del medio ambiente constituyen uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo, a lo cual aportan en gran medida los actuales sistemas de generación de energía. Sin embargo, al mismo tiempo representa una gran oportunidad para implementar proyectos innovadores que permitan minimizar los impactos ambientales, contribuyendo al desarrollo sostenible de la sociedad y de la economía.

Creemos que la eficiencia y sostenibilidad que brindan las nuevas tecnologías a nivel de microrredes, son muy importante para permitir que los mercados se sigan desarrollando de manera simultánea. Al mismo tiempo, se requiere un esquema tarifario para la implementación de microrredes en el país que considere el reconocimiento de las inversiones que esto conlleva por parte de los diferentes actores del sector eléctrico, los cuales deben ser motivados constantemente para apalancar toda la transición energética de manera transversal, tal como se ha venido trabajando desde la Ley 1715 de 2014 hasta la fecha.

Para lograr la implementación de estas nuevas tecnologías, es de vital importancia contar con una estandarización en las definiciones, conceptos y alcance de los diferentes documentos reglamentarios y/o normativos enmarcados en microrredes (leyes, normas, decretos, resoluciones, acuerdos, entre otros); lo anterior, será de mucha utilidad en la implementación de nuevos mercados de energía, que permitan acelerar la adopción de las nuevas tecnologías asociadas a las microrredes.

Por todo lo anterior, el Grupo de Trabajo del Comité JWG C6.C5.4 de CIGRE COLOMBIA, presenta un reporte técnico que contiene la conceptualización en el marco regulatorio, técnico y de nuevos mercados de las microrredes en Colombia, con el fin de ser socializado con la comunidad académica y el sector industrial.

PALABRAS CLAVES: Microrredes, Recursos de Energía Distribuida, Generación Distribuida, Medición, Comunicaciones, Ciberseguridad.

1. GENERALIDADES

En este reporte técnico se presentan recomendaciones regulatorias, políticas, normativas y para la constitución de nuevos mercados, las cuales, se considera, deben tenerse en cuenta para la implementación de microrredes en Colombia tanto a nivel comercial, industrial como residencial. Lo anterior debe basarse en las experiencias y requerimientos internacionales (estándares), consolidando una base técnica para dar argumentos técnicos, sociales y económicos, al gobierno, al sector industrial y la academia, para planear las redes eléctricas futuras en Colombia.

2. PARTICIPANTES

El grupo de trabajo estuvo conformado por las personas que se listan a continuación:

Líderes

Martha Gil	XM
Rafael Franco Manrique	Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A
Eduardo Gómez Luna	Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A

Integrantes

Alejandro Garcés Ruiz	Universidad Tecnológica de Pereira – UTP
Carlos Arturo Lozano Moncada	Universidad del Valle
Lizeth Tamayo	XM
Esneyder González	XM
Luz Natalia Mejía	Potencia y Tecnologías Incorporadas S.A
Diego Sánchez	CIDET



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group – JWG C6.C5.4.

Invitados especiales

Juan David Molina C.	Colombia Inteligente
Carlos Adrián Correa-Flórez	Pontificia Universidad Javeriana

3. ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AMI: Infraestructura de medición avanzada

AVR: Regulador Automático de Voltaje

CEC: Citizen Energy Communities (Comunidades Ciudadanas de Energía)

CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

DDV: Demanda Desconectable Voluntaria

DER: Recursos Distribuidos de Energía

DMS: Sistema de gestión de Distribución

DERMS: Sistema de gestión de recursos energéticos distribuidos

DG: Generación Distribuida

EMS: Sistemas de Gestión de Energía

EV: Vehículo Eléctrico

FNCER: Fuentes No Convencionales de Energía Renovable

IEDs: Dispositivo Electrónico Inteligente

MGCC: Microgrid Central Controller (Control Central de la Microrred)

MPPT: Maximum Power Point Tracker (Seguidor de Punto de Máxima Potencia)

MR: Microrred

OTC: Over the Counter

P2P: Peer-To-Peer

PCC: Point-of-common-coupling

REC: Renewable Energy Communities (Comunidades de Energías Renovables)

VPP: Virtual Power Plant

ZNI: Zonas No Interconectadas

4. INTRODUCCIÓN

Actualmente las redes eléctricas están cambiando su forma de operar para atender la creciente demanda de energía; los sistemas de supervisión (SCADA) tradicionales no están preparados para atender estas exigencias y dinámicas que demanda la red eléctrica. Por otro lado, han aparecido nuevos generadores de electricidad en la red eléctrica, de diferentes tamaños y tecnologías, que buscan atender esta creciente demanda de energía.

Todos los aspectos anteriores representan nuevos retos que nos muestran la necesidad de integrar nuevas alternativas para las redes eléctricas. En estos nuevos sistemas eléctricos es necesario tener elementos con mayor capacidad de interacción con los equipos de la red de potencia, es decir que, además de monitorear, supervisar y registrar en tiempo real, puedan interactuar con el sistema de forma inteligente, simulando y prediciendo el comportamiento de los elementos de la red eléctrica a partir de los datos obtenidos a través de los dispositivos electrónicos inteligentes (IED - Intelligent Electronic Device) en tiempo real e informando oportunamente al operador situaciones adversas y peligrosas.

En resumen, para las nuevas configuraciones de las redes eléctricas que integran medidores avanzados, generación distribuida (p.e. co-generación, sistemas solares PV, turbinas eólicas, microrredes, sistemas de almacenamiento de energía, dispositivos de control de carga, entre otros), acompañadas de sistemas de reconfiguración dinámica en la topología de la red para atender la demanda requerida, cumpliendo con las restricciones medioambientales, se hace necesario segmentar y conceptualizar soluciones flexibles para impulsar la transición energética del país de una manera unificada.

5. ESTANDARIZACIÓN DE CONCEPTOS Y DEFINICIONES PARA MICRORREDES

En el siguiente capítulo se introducen conceptos y definiciones afines a las microrredes, los módulos que constituyen estos tipos de sistemas y los elementos principales para la operación y control de la microrred.

5.1 Conceptos y definiciones

El sistema eléctrico de potencia del futuro tiene la necesidad de ser más flexible, confiable, resiliente y sostenible. Con el aumento en la demanda de energías renovables no convencionales, el panorama de operación de los sistemas de potencia tradicionales de generación y distribución ha comenzado a cambiar.

La integración a la red de distribución de fuentes renovables de energía, como la eólica y la solar, está tomando gran importancia, pues aportan a la reducción del impacto ambiental provocado por las fuentes convencionales de energía [1]. Así, el concepto de microrredes

(MR) representa una gran oportunidad para la integración de fuentes renovables de energía de manera distribuida ya que se define a la MR, de manera general, como un conjunto de recursos de energía distribuida, sistemas de almacenamiento de energía, sistemas de control y cargas, el cual le permite a la red eléctrica ser más robusta, confiable, resiliente, segura y flexible que permite hacer un uso cada vez más eficiente de la energía consumida por los clientes y reducir costos de operación, entre otros beneficios.

Este documento técnico de CIGRE COLOMBIA busca homologar el concepto de Microrredes dado que actualmente no se cuenta con una única definición a nivel mundial, entre otras razones por la gran diversidad en los módulos que, de forma general, se compone de tecnologías de generación, almacenamiento y la participación activa de la demanda; esta última hace uso de tecnologías que permiten coordinar y la optimizar los diferentes recursos disponibles de acuerdo con los diferentes elementos que la componen y su función, sus diferentes criterios de clasificación, sus beneficios y aplicaciones y, finalmente, las barreras que aún existen para su desarrollo e implementación.

5.2 Definición de Microrred

Para comprender el concepto de MR, se debe comprender a qué se refieren los términos Red Inteligente o Smart Grid. Una red inteligente es un sistema de distribución de electricidad que integra la generación distribuida (en muchos casos usando tecnologías renovables no convencionales), el control y la gestión de los recursos energéticos y los usuarios, a través de sistemas de comunicación y tecnologías digitales, con el fin de operar de manera eficiente, sostenible y económica, garantizando el suministro de la energía [2]. De acuerdo con lo anterior, se define a continuación el concepto de MR, el cual se encuentra dentro de la definición general de Smart Grid.

El concepto de Micro Red (MR) aún no es un concepto estándar, pues diferentes autores se refieren a él de maneras distintas. Sin embargo, generalmente una MR es descrita como un conjunto de elementos que incluyen microgeneración, sistemas de almacenamiento, cargas y control inteligente, la cual tiene la capacidad de trabajar conectada a la red o de manera aislada. Aun así, dentro de la literatura se encuentran dos definiciones preponderantes; una de ellas es planteada por el Consorcio de Soluciones Tecnológicas de Confiabilidad Eléctrica (por sus siglas en inglés CERTS) de Estados Unidos, el cual define una MR como “Un conjunto de cargas y micro generadores operando como un sistema único que proporciona potencia y calor”; por otro lado, la Unión Europea define una MR como “Una red de distribución de bajo voltaje que comprende generación distribuida, dispositivos de almacenamiento y cargas controlables que pueden operar interconectados o aislados de la red de distribución principal” [3],[4]. Sin embargo, de acuerdo con [1], un sistema que contenga los elementos anteriores pero que no posea la capacidad de funcionar de manera aislada, no se le llama MR; se le conoce como distribución activa.

Una MR se considera también como una porción del sistema de distribución, que se encuentra localizada en la parte de baja tensión de una subestación, en el punto de acoplamiento común (Point-of-Common-Coupling PCC). Este punto PCC es a través del cual la MR se conecta o desconecta a la red principal o a la red del operador de red [5].

La importancia de contar con una MR recae en la integración fuentes renovables de energía al sistema de distribución tradicional, reduciendo el impacto ambiental y emisiones causadas por las fuentes tradicionales de generación; por otro lado, permite maximizar el uso y la capacidad de los recursos de generación existentes, costos de reforzamiento o reposición, entre otros.

La característica más relevante del concepto de MR, es su capacidad de funcionar en modo isla, es decir, de desconectarse de la red principal en diferentes situaciones, tales como una falla permanente en la red principal o una desconexión intencionada por motivos de mantenimiento de elementos en la red principal. Así, la puesta en modo isla puede ser planeada o no planeada, en ambos casos la transición del modo conectado a la red al modo isla, puede ocurrir una falla y una salida total del sistema o blackout, razón por la cual es recomendable que la MR cuente con la capacidad de restaurar rápidamente el servicio, sin ayuda de fuentes externas y de manera aislada, a lo cual se le llama black start [6].

Las MR no tienen un tamaño específico debido a que los recursos energéticos, económicos y técnicos de cada lugar son diferentes, razón por la cual las arquitecturas, topologías y tamaño en potencia eléctrica de las MR varían ampliamente de un proyecto a otro. De esta manera el tamaño o capacidad de una MR se basa en el pico de potencia que demandan las cargas, dato con el que se configura el mínimo pico de potencia que debe ser suplido por las unidades de generación y almacenamiento (por sus siglas en inglés Distributed Energy Resources - DER); también la capacidad la define el tipo de recurso energético con el que se cuente, ya que los recursos renovables de energía se caracterizan por ser intermitentes [1], [7].

De esta forma, dentro del alcance de este documento técnico y de los diferentes análisis realizados en Colombia, entre ellos los desarrollados por **Colombia Inteligente** y la UPME en el ámbito de Microrredes Sostenibles, el concepto de Microrredes se puede resumir como [8]-[10]:

“Una Microrred se define como una parte del sistema eléctrico de potencia, la cual se compone por fuentes de generación distribuida, sistemas de almacenamiento, cargas controlables y un sistema de control inteligente que permite la gestión e interoperabilidad, la cual pueden operar en modo conectado a la red o en modo aislado garantizando siempre el suministro de energía eléctrica a los usuarios” [11]-[14].

5.3 Componentes de una Microrred

Se presentan a continuación los componentes que constituyen una MR de manera general dado que, como se mencionó anteriormente, no existe un único modelo o topología, debido a sus aplicaciones difieren en tamaño y función. Eso se explica por las diferentes situaciones sociales, económicas, geográficas y climáticas, entre otras condiciones, donde se implementan las MR.

En la [5], se presentan los recursos de generación distribuida y su posible clasificación, los diferentes sistemas de almacenamiento, tipos de carga, electrónica de potencia y el sistema control que hacen parte de una MR.

- **Generación Distribuida (GD)** [6]-[11]. De acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía de México, la generación distribuida, es la generación de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de consumo, que tiene la opción de interactuar con la red eléctrica, comprando o vendiendo energía [2]. Las tecnologías de generación que se aplican con más frecuencia en MR son las celdas de combustible o fuel cells, turbinas eólicas, sistemas solares, microturbinas, sistemas de cogeneración (CHP - Combined Heat and Power) donde se produce energía y calor, incluyendo uso de máquinas de combustión interna como máquinas diésel o que trabajan con gas natural [5].
- **Almacenamiento de energía:** Los sistemas de almacenamiento de energía son un elemento clave para la operación de una MR. Existe una amplia variedad de elementos almacenadores de energía, entre cuales se destacan las baterías, los supercapacitores y los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción. Las primeras son usadas principalmente como elementos operativos mientras que los dos últimos son usados como elementos para mantener la estabilidad.
- **Demanda activa:** La demanda activa hace referencia a la demanda que puede modificar sus patrones de consumo, independientemente de que tenga o no generación local.
- **Sistema de medición avanzada:** La medición inteligente es uno de los habilitadores de las redes eléctricas inteligentes (Smart Grid), por lo tanto, las microrredes eléctricas deben estar integradas con este tipo de infraestructuras, armonizando todas las potencialidades de las tecnologías que componen una microrred.

- **Sistema de gestión y operación:** Las microrredes eléctricas deben estar constituidas por sistemas de gestión y operación que permitan controlar, supervisar, monitorear y operar de manera oportuna cada uno de los recursos distribuidos que componen la microrred, esto hace que se tenga un mejor uso de los recursos al igual que se gestione mejor la energía para todos los actores que componen la microrred. En el mercado existen varias soluciones como ADMS, DMS, DERMS, que permiten al operador tomar las mejores decisiones dentro de la microrred.

- **Otros componentes de una Microrred**

Las unidades de generación se pueden clasificar en dos tipos: unidades despachables y no despachables. Las unidades despachables o aquellas son aquellas que comprenden máquinas rotativas, cuya inercia es considerablemente alta, siendo capaz de responder de manera adecuada ante cambios en la carga.

Estas unidades normalmente están equipadas con un sistema de control AVR (Automatic Voltage Regulation), que se encarga de controlar el voltaje interno; también cuenta con un gobernador para control de velocidad y ajuste del flujo de combustible. Esos controlan la potencia activa y reactiva que entrega el generador teniendo en cuenta la estrategia de despacho determinada por el MGCC (Microgrid Central Controller), encargado del control general de la MR [11], cuya definición se presenta en las secciones siguientes.

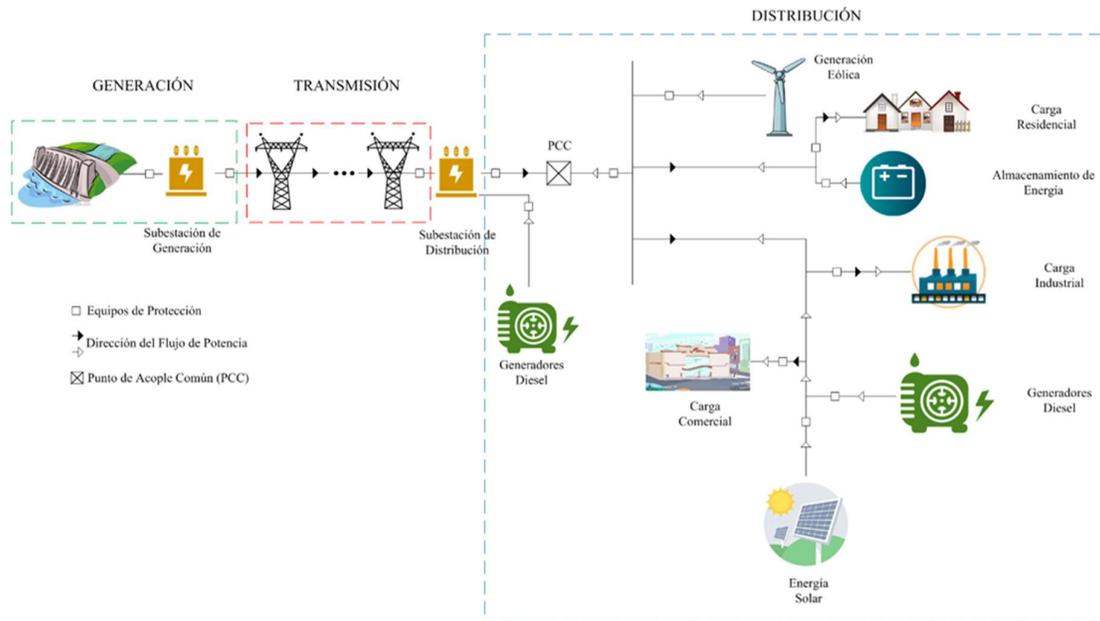


Figura 1. Composición general de una MR [creación propia].

Dentro de las unidades no despachables se encuentran los recursos renovables como lo son el sol y el viento, los cuales se caracterizan por ser intermitentes, volátiles y con una inercia muy baja, es decir, limitadas ante cualquier cambio en su recurso de energía o en los requerimientos de la carga. La intermitencia indica que este tipo de generación no está disponible todo el tiempo, mientras que lo volátil hace referencia a que estas fuentes fluctúan en diferentes escalas de tiempo [12]. Es necesario que estas fuentes se vuelvan despachables para no afectar el funcionamiento óptimo de la MR, por lo cual necesitan sistemas de almacenamiento y circuitos inversores [14].

Finalmente, el control de salida de estas unidades está comúnmente basado en el concepto Maximum Power Point Tracker (MPPT), el cual tiene como objetivo extraer la máxima potencia posible de acuerdo con las condiciones del recurso. Por ejemplo, de acuerdo con [12], en los sistemas PV (Photovoltaic) o sistemas fotovoltaicos, a cualquier nivel de radiación solar, existe un único punto en la característica de voltaje vs corriente de los paneles, en el que se genera la máxima potencia; ese es el punto donde el control basado en MPPT desea trabajar para generar energía.

En la TABLA 1 se compara el concepto de MR con el concepto de generación distribuida que en algunas veces es confundido o mezclado.

TABLA 1. Comparación entre MR y generación distribuida

Característica	Microrred	Generación distribuida
Tipo de recursos	Varios tipos de recursos de generación y almacenamiento.	Un solo tipo de recurso (granja solar, granja eólica, etc.).
Tipo de operación	Operación tanto en isla como en forma interconectada.	Operación básicamente interconectada o individual.
Control	Estructura de control coordinado que le permite actuar como una entidad única.	Estructura básica de control.
Almacenamiento de energía	Requiere de elementos almacenadores de energía para permitir la operación aislada.	Puede tener o no elementos almacenadores de energía.
Control primario	Requiere de convertidores formadores de red que hagan control primario para operar en isla.	Puede tener o no, capacidad de control primario de frecuencia.
Gestión	Requiere de un algoritmo de gestión/optimización de los recursos (control terciario), tanto localmente (operación en isla) como en una etapa superior (agregadores en los alimentadores).	Puede participar o no, en una etapa superior de gestión/optimización (agregadores, planta de potencia virtual, etc.).



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
 Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
 Join Group – JWG C6.C5.4.

Comunicaciones	Requiere de comunicación bidireccional entre los componentes principales para hacer gestión/control.	Puede tener o no, comunicación unidireccional o bidireccional de acuerdo con las necesidades.
----------------	--	---

Las características mostradas en esta tabla son típicas de las MR, pero no excluyentes. Un proyecto puede iniciar como un proyecto de generación distribuida para más adelante convertirse en una MR. Igualmente, un alimentador primario o un sistema de subtransmisión puede contener tanto MR como generación distribuida. No obstante, la estructura interna de control es clave para diferenciar una y otra. Cada uno de los agregadores ubicados en los alimentadores primarios pueden interactuar tanto con las MR como con los sistemas de generación distribuida.

5.4 Operación y Control de Microrredes

Las microrredes van más allá del concepto clásico de generación distribuida, pues una microrred permite coordinar múltiples recursos operando tanto en modo aislado como en modo interconectado. Lograr altos estándares de eficiencia y confiabilidad solo es posible mediante dos elementos tecnológicos clave: los convertidores tipo formadores de red y los sistemas de operación y control. A continuación, se describe cada uno de estos elementos [12], [13]:

- Convertidores formadores de red: Elementos distribuidos tales como paneles solares y sistemas de almacenamiento de energía requieren de un convertidor de potencia que cumple varias funciones: primero, transformar las variables DC en corrientes y tensiones AC; segundo, controlar el recurso primario, por ejemplo, la carga y descarga de la batería o extraer máxima potencia de los paneles solares; tercero, sincronizarse con el sistema trifásico.

No obstante, el convertidor es un elemento altamente versátil que puede realizar múltiples acciones adicionales, como compensación de potencia reactiva, filtrado armónico, entre otros. Una de las acciones más importantes que puede cumplir estos convertidores es estabilizar el sistema, especialmente cuando la microrred pasa a modo isla. Los convertidores con esta característica son llamados convertidores **formadores de red**, para diferenciarlos de los convertidores convencionales o **seguidores de red**. Los convertidores formadores de red pueden generar un control primario local, emulando la estructura de control primario de frecuencia en sistemas de potencia.

Por el contrario, los convertidores seguidores de red solo se sincronizan a la frecuencia dada por la red principal. Como consecuencia de lo anterior, una microrred no puede operar en isla a menos que cuente con uno o varios convertidores formadores de red.

Sin la capacidad de operar en isla, el sistema es simplemente un sistema de generación distribuida convencional que no presenta grandes ventajas en términos de confiabilidad.

- El sistema control y gestión de la microrred puede ser integrado con otros elementos de las redes de distribución inteligentes, tales como los agregadores de cada alimentador primario, las plantas de potencia virtual y los sistemas V2G (*vehicle to grid*). Este sistema permite coordinar los recursos de generación y almacenamiento para alcanzar altos estándares de eficiencia tanto en forma interconectada como en forma aislada.

Este tipo de sistemas se constituye usualmente como un control terciario en la jerarquía de control y por tanto es un problema de estado estacionario que requiere comunicaciones al menos entre los elementos clave de generación y almacenamiento de la microrred [14].

5.5 Ambientes de simulación en tiempo real de acuerdo con la Normativa IEEE 2030.7 e IEEE 2030.8

Los sistemas de control deben cumplir con los requisitos de operación de acuerdo a lo que plantea la normatividad al momento del comisionamiento y de acuerdo con lo que se plantea en el estándar IEEE 2030.7-2018 e IEEE 2030.8-2018. Las pruebas realizadas se hacen para verificar el funcionamiento de las funciones de despacho y transición de la microrred, de acuerdo con los siguientes escenarios [15]-[18]:

- a) Definir escenarios de pruebas que permitan probar las funciones centrales en condiciones bien definidas y representativas.
- b) Definir medidas de rendimiento que consideren las normas aplicables existentes relacionadas con los sistemas de distribución eléctrica, los requisitos aplicables de la red de distribución y los códigos de red, y las técnicas de medición e instrumentación relevantes y aplicables.
- c) Definir el entorno de prueba que va desde un entorno completamente simulado hasta equipos instalados en el campo. Un entorno de simulación aceptable es un entorno de simulación en tiempo real con un Hardware-In-the-Loop (HIL), el cual es un enfoque para probar todos los elementos del Micro Grid Control System (MGCS).

La cobertura de pruebas hace referencia a una medida, la cual dice qué tanto se examina un sistema con las pruebas bajo algún criterio. Si bien todos los bancos de pruebas pueden manejar condiciones de estado estable, es más difícil probar fallas y protección, resincronización y reconexión, y otras situaciones que requieren controles de respuesta rápida en el sistema real. Por ello son esenciales los bancos de pruebas que operan a voltajes y

niveles de potencia controlados, emulando el sistema real (gemelo digital), tal como se presenta en la [15]-[18].

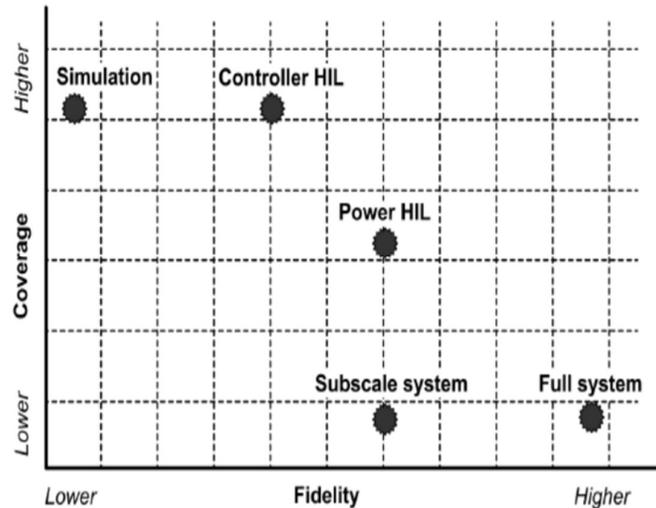


Figura 2. Comparación entre tipos de bancos de pruebas de potencia y la fidelidad del sistema [19].

6. GENERACIÓN DE NUEVOS MERCADOS ANTE LA PENETRACIÓN DE LOS DER Y LAS MICRORREDES

Los Recursos Energéticos Distribuidos, las Microrredes y por supuesto las FNCER que se incluyen allí, traen consigo nuevos retos, desafíos y, por tanto, grandes oportunidades para ir desarrollando y perfeccionando los mercados de energía con el fin de continuar garantizando la confiabilidad y suministro de energía eléctrica a precios eficientes.

Ante la necesidad de la mejora continua y el desarrollo del mercado dadas las nuevas tendencias del sector energético que se han evidenciado a nivel internacional, para el caso particular del mercado eléctrico colombiano, su sector y especialmente su regulador se han apoyado en la experiencia y conocimiento de expertos en el diseño de mercados, con el fin de construir propuestas que permitan cerrar las brechas identificadas.

Las nuevas fuentes de generación traen consigo una alta incertidumbre en el sistema y especialmente en la variabilidad en los precios de la energía, lo que crea la necesidad de desarrollar un mercado completo para poner a disposición de los agentes diferentes mecanismos que les permitan gestionar sus riesgos por medio de instrumentos para la contratación de la energía eléctrica, desde el corto, mediano y largo plazo de acuerdo con sus necesidades.

La propuesta de un desarrollo de mercado completo en Colombia abarca desde los mercados de capacidad/confiabilidad, pasando por los mercados a plazo con contratos negociados en el OTC o en mercados organizados (derivados), además de tener mercados Day Ahead para el corto plazo, un mercado intradiario o de tiempo real, hasta llegar a los mercados de balance y servicios complementarios, ver Figura 3. En esta estructura de mercado surge la posibilidad de participación de las DER y microrredes, las cuales no solo podrían participar en el mercado minorista y en las transacciones dentro de un esquema P2P, sino también en otras estructuras de mercado como los servicios complementarios.



Figura 3. Estructura de mercado completo de energía eléctrica para Colombia.

Para comenzar a describir la generación de éstos nuevos mercados completos, ante la penetración de las DER y las FNCER, es necesario empezar con la descripción de los elementos principales que han evolucionado con el desarrollo de las nuevas tecnologías y esquemas transaccionales que habilitan nuevos mercados, entre ellos se destacan las comunidades energéticas ya que las cuales propician la implementación y gestión de microrredes y DER. En el presente documento se estudian las comunidades energéticas desde el marco regulador europeo.

También se presentan otros conceptos de gran importancia que precisamente salen o son habilitados para los nuevos mercados de energía como son: microrred aislada, microrred conectada a la red, prosumidores, agregadores, desarrollo conceptual de agregadores de energía bajo la figura de Virtual Power Plants (VPP) y participación activa de la demanda. Dentro de algunos de los conceptos previos se describen casos de estudio y sus avances en Colombia.

6.1 Agentes involucrados e interacciones

6.1.1 Microrred aislada

Una microrred aislada es aquella que estará disponible para aquella zona que carecen o se les dificulta conectarse a una red principal STN, STR o SDL, la función principal es lograr atender aquellas zonas desatendidas y poder generar los nuevos mercados.

6.1.2 Microrred conectada a la red

Una microrred conectada a la red será aquella que aportará a la confiabilidad, seguridad y resiliencia a la red eléctrica ya sea el STN, STR o SDL; de igual manera proporcionará las referencias de tensión y frecuencia necesarias para que el resto de elementos de generación de la microrred funcionen sin ningún problema. Así pues, no existirán problemas de estabilidad en la microrred cuando ésta funcione conectada a la red principal.

En este modo de funcionamiento, la microrred funciona como un gestor de mercado realizando el despacho económico de la generación de la microrred. Para ello deberá tener en cuenta las siguientes entradas:

- Precios del mercado
- Ofertas de las fuentes de generación
- Ofertas del lado de la demanda para cargas de alta y baja prioridad

6.1.3 Prosumidores

En los años 80, las marcas concebían a los consumidores como masas homogéneas cuya función era consumir, ahora ese concepto ha sido modificado, por tal motivo, la palabra prosumidor es un acrónimo formado por la fusión original de las palabras productor y consumidor, que ahora se convierte en un agente muy importante en los nuevos mercados de electricidad que se dan gracias a la descentralización de los sistemas de generación.

6.1.4 Agregadores

Son los agentes que permite representar a los DER, por ejemplo, a un conjunto de generadores distribuidos, o un conjunto de cargas, o en su conjunto con otras tecnologías como el almacenamiento de energía, son quienes van a despachar y definir los precios de participación en el mercado y estarán en constante comunicación con cada uno de los generadores distribuidos, serán otro actor importante dentro de la cadena tradicional de energía eléctrica la cual está conformada por el generador, transmisor, distribuidor y comercializador.

6.1.5 Comunidades energéticas

Las comunidades de energía desarrolladas desde el marco europeo son un gran referenciamiento sobre el tema, como consecuencia del avance en los conceptos, sus implicaciones y temas regulatorios que allí se evidencian, además, poner la vista en Europa resulta crucial al ser líder en acción energética y climática en el mundo. Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta una síntesis realizada a partir de referencias emanadas por instituciones europeas para comprender cómo allí se desarrolla el concepto de comunidad de energía y su relación con los nuevos mercados energéticos, los sistemas de distribución y las MR.

Las referencias están ligadas al conjunto de normas denominado “Energía Limpia Para Todos los Europeos”, utilizado para determinar la política energética más ambiciosa de Europa hasta el año 2030 presentado por la Unión Europea (UE). En este reporte se determinaron los conceptos de Comunidades Ciudadanas de Energía y Comunidades de Energía Renovable (CEC y REC por sus siglas en inglés) acogidos de forma respectiva por la Directiva del Mercado Eléctrico y la Directiva de Energías Renovables, Las cuales fueron establecidas en el mismo paquete de normas. Se destaca que las Directivas son actos legislativos que son registrados en el Diario Oficial de la UE.

Las comunidades de energía, término mediante el cual se generalizan los conceptos CEC y REC, han tenido un fuerte impulso y se están formalizando y propagando por el territorio europeo. La evolución del sistema de energía eléctrica hacia una generación descentralizada, los desarrollos tecnológicos relacionados con la energía renovable e incluso la misma conciencia de las personas con temas de energía como los costos y las implicaciones ambientales, convierten a las comunidades de energía en proyectos cada vez más asequibles para que los usuarios finales promuevan la actividad energética local y reduzcan costos de red.

Se debe adicionar que los estados miembros de la UE junto con sus entidades regulatorias están promoviendo estos proyectos de comunidades, pues son proyectos propicios para acercar al consumidor final al sector de energía eléctrica, son proyectos con un papel importante para darle flexibilidad al mercado y a las operaciones de red, y ayudan a promocionar el uso de tecnologías verdes apostando a la descarbonización del sector eléctrico mitigando con esto el impacto negativo ambiental [22].

En las Directivas se pueden leer los conceptos de cada tipo de comunidad, donde se encuentra en común que son entidades legales basadas en la participación abierta y voluntaria, cuyos socios o miembros son personas físicas, autoridades locales, incluyendo municipios o pequeñas empresas, son los que tienen el control efectivo sobre la comunidad; donde el objetivo es proporcionar beneficios a los participantes en torno a lo ambiental, económico o social, más no en lo relacionado con lo financiero.

Sin embargo, cada definición contenida en las Directivas cuenta con aspectos que marcan diferencias entre los dos tipos de comunidades, mientras que las REC se enfocan en proyectos de energías renovables, en las CEC no es necesario delimitar los proyectos a este tipo de energías.

Otro aspecto diferenciador es que en la definición de las CEC se menciona que pueden tener participación en procesos de generación, distribución, suministro, consumo, agregación, almacenamiento, servicios de eficiencia energética o servicios de carga de vehículos eléctricos, mientras que en las REC solo se define que pueden producir, consumir o vender energía renovable [23].

Esto permite comprender que la diferencia entre los tipos de comunidades de energía se debe al marco directivo y regulatorio en el que se encuentre asociado, además, las diversas iniciativas que se llevan a cabo por los ciudadanos también son influyentes para la delimitación del concepto de comunidad de energía, dado que no siempre las iniciativas o proyectos de las comunidades que emergen se pueden abordar desde alguna de las definiciones reconocidas [23]-[24].

En la siguiente figura, se evidencian las características similares y diferentes de cada tipo de comunidad según las Directivas, donde se destaca que en cada caso se busca una finalidad diferente: los proyectos CEC busca propiciarlos como un nuevo actor del mercado y los proyectos REC busca apostar a la descarbonización fomentando el uso de tecnologías verdes.

<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras legales bajo una identidad comunitaria. • La participación debe ser voluntaria y abierta. • No deben buscarse beneficios financieros en las comunidades. • Deben contar con un sistema de gobierno. • Las actividades deben desarrollarse de forma colectiva. 	CEC Y REC
<ul style="list-style-type: none"> • Sin limitación geográfica para realizar el control efectivo del proyecto. • Las grandes y medianas empresas no pueden ejercer control efectivo. • No se limitan a un tipo de energía en específico. • El propósito principal es crear un campo de juego nivelado para las CEC como nuevo actor del mercado. 	CEC
<ul style="list-style-type: none"> • Hay un requisito de proximidad al proyecto. • Las grandes empresas se excluyen de la posible participación. • Abierto a todas las fuentes de energía renovable. • El propósito principal es promocionar el crecimiento de las REC como una forma de propiciar el uso de energía renovable en el país. 	REC

Aspectos en Común
 Diferencias en los Conceptos

Figura 4. Tabla de similitudes y diferencias en las definiciones de comunidades [20].

Para comprender mejor la relación entre los dos tipos de comunidades, si se analizan los conceptos de ambas Directivas, ambos casos describen una forma de estructurarse y hacer

una cooperación ciudadana para llevar a cabo actividades en relación con el sector eléctrico, en una propiedad específica, mediante la autogestión y teniendo un propósito no comercial.

En una revisión general, las REC pueden verse como un proyecto con características particulares de las CEC, pero no se debe dejar de lado los detalles que marcan diferencia en torno a la autonomía o el control efectivo como se muestran en la Figura 4 [25].

Interesa resaltar que las comunidades de energía tienen una implicación en el mercado por todas las cadenas del sector en las que pueden participar según lo argumenta su concepto, indicando que las comunidades de energía están en tendencia de convertirse en un nuevo actor del mercado europeo que ha venido emergiendo. Este reconocimiento conlleva a una etapa de regulación que debe evitar que se vulneren los principios establecidos en el mercado actual, ni que se creen barreras o distorsiones indebidas.

En relación con la regulación sobre las comunidades, el Consejo Regulador Europeo de Energía en [26] manifiesta que se deben revisar temas como:

- Los derechos del consumidor, dado que son usuarios finales los que participan en las comunidades y se les debe seguir considerando bajo esta naturaleza.
- El equilibrio y la flexibilidad en estos proyectos donde se transmite o comparte energía.
- El diseño efectivo de este nuevo mercado ante la presencia de estos nuevos agentes.
- La propiedad, la operación y el desarrollo de redes que pueden operarse en las comunidades.

Para comprender cómo las comunidades de energía se asocian y requieren de una revisión regulatoria en los temas relacionados con los recursos energéticos distribuidos y las MR, se deben desglosar las posibles arquitecturas en que los proyectos concebidos por las Directivas se pueden establecer. Estas arquitecturas son el autoconsumo individual, el autoconsumo colectivo y las comunidades de energía [26].

El autoconsumo individual se aborda y define desde ambas Directivas: la Directiva de Mercado Eléctrico define a el autoconsumo como “clientes activos”, mientras que la Directiva de Energías Renovables los denomina autoconsumo de energías renovables. Para ambos casos, se concuerda que los consumidores finales tienen derecho a consumir, almacenar y vender la energía que logran producir desde sus unidades residenciales, o en caso de permitirlo la regulación, desde otras instalaciones. Se resalta que estas actividades no pueden conformar la actividad comercial profesional principal. Cabe destacar que los “clientes activos” dentro de su concepto pueden participar en esquemas de flexibilidad o eficiencia energética y los consumidores de energía renovable enfocan su actividad en este tipo de energías.

En relación con el autoconsumo colectivo, la Directiva de Mercado eléctrico extiende el concepto de “clientes activos” a un trabajo grupal de clientes, en cambio, la Directiva de

Energías Renovables desarrolla este concepto como un conjunto de al menos dos o más clientes autoconsumidores de energías renovables que trabajan en conjunto, pero se encuentran ubicados en un mismo edificio o conjunto residencial, indicando que no debe de haber una extensión geográfica entre clientes en diferentes residencias.

Ahora bien, ya se mencionó que las comunidades de energía son una cooperación energética comunitaria, pero se adiciona que en estos proyectos se puede compartir energía a través de la operación de una MR para lograr con esto un alcance geográfico más amplio que el de algún tipo de autoconsumo.

El autoconsumo individual o colectivo no es una estructura independiente de las comunidades de Energía, como son conceptos que se definen por separado en las Directivas puede causar una impresión de ser proyectos delimitados y apartes. Sin embargo, el autoconsumo es una actividad que puede ser desarrollada dentro de algún tipo de comunidad, pero también, puede desarrollarse sin la necesidad de estar ligado a este tipo de estructuras.

En [25] se presenta un análisis interesante sobre la asociación entre estas dos arquitecturas, allí se muestra que el autoconsumo es una forma de desarrollar una actividad concreta, mientras que las comunidades son una forma de organización y trabajo donde el autoconsumo es una actividad potencial que se puede implementar.

La relación entre las comunidades de Energía y los sistemas energéticos locales se encuentra en que las Directivas brindan oportunidades para que en las comunidades se pueda concebir, mantener y operar una “red comunitaria” que se describen como redes de distribución pública y sistemas de distribución cerrados.

La administración dentro de una comunidad de una red o sistema de energía local depende de las actividades que se desarrollen, en [27] se identifican cuatro arquetipos de estructuras que se pueden llevar a cabo en las comunidades, estos son la inversión cooperativa, la plataforma energética, la agregación y las MR. Estos arquetipos ayudan a medir el impacto de la comunidad en el mercado, la capacidad de desarrollo oportuno y la actuación consistente con el sistema eléctrico.

En lo que respecta con la operación de MR o sistemas para compartir energía que se pueden llevar a cabo en las comunidades, se considera un ámbito esencial que debe abordarse en la regulación.

6.1.6 Desarrollo conceptual de agregadores de energía bajo la figura de Virtual Power Plants (VPP)

Las tendencias mundiales por el uso de DER y las fuentes de generación renovables no convencionales están fomentando el nacimiento de figuras como es la de agregadores de



energía o los conceptos de VPP, cuyo objetivo principal es permitir la integración de DER haciendo su gestión e impulsarlas en el mercado de energía mayorista.

Una VPP es básicamente es un servicio de coordinación virtual de recursos que se encuentran distribuidos en el sistema, basado en aplicativos de software que pueden optimizar la demanda o la generación de los recursos bajo su control, usando para ello una conexión a internet con atributos escalables de seguridad, que incluso pueden llegar a ser de tipo Blockchain. Las VPP reciben señales en tiempo real del Operador del Sistema, recolectan información de las DER asociadas y de forma autónoma realizan despachos en cada DER buscando maximizar los ingresos por concepto de servicios como la respuesta a la demanda, regulación de frecuencia, reserva de potencia, compra y venta de energía y gestión de picos de demandas.

Las VPP ofrecen otro beneficio potencial para el sistema, al ofrecer una gestión conjunta de diversos DER de diferentes naturalezas se puede reducir la incertidumbre e intermitencia de la generación de recursos renovables, dado que tienen en cuenta las variaciones climáticas que influyen en cada tipo de generación.

Con las VPP se observan oportunidades de ofrecer plataformas que permitan ofrecer servicios de gestión de energía que permite a usuarios realizar transacciones entre ellos, además, las VPP permite transformar el concepto actual de demanda de usuarios consumidores a usuarios prosumidores. Actualmente, está en proceso de implementación un piloto de una VPP en el proyecto iSAAC como potencial agente nuevo que, además de poder participar en el mercado de oferta de energía, lo puede hacer en servicios complementarios.

Con el proyecto iSAAC se desea evaluar el potencial de las VPP como impulsores de DER y de las nuevas oportunidades del operador del sistema como proveedor de la plataforma tecnológica para permitir la integración de estos nuevos agentes al sector eléctrico y la conceptualización de nuevos modelos de negocio, derivados de la prestación directa de este nuevo servicio bajo un escenario de alta integración de DER a la matriz energética nacional. La información contenida en esta sección fue sintetizada de [28].

6.1.7 Participación Activa de la Demanda

En relación con la transformación del mercado con la implementación de DER y microrredes en Colombia se destaca el rol que debe jugar la demanda. En la IV Jornada de Demanda Activa realizada por Colombia Inteligente y el Clúster Energía Inteligente (antes Suroccidente) se menciona que el tema de la respuesta a la demanda se viene trabajando con anterioridad en la CREG. Dentro de los programas regulados que se encuentran en relación con la respuesta a la demanda son la Demanda Desconectable Voluntaria con las resoluciones CREG 063 de 2010 y 098 de 2018, el Programa Apagar Paga con las resoluciones CREG 029 de 2016 y 051 de 2016 y el Programa Respuesta a la Demanda con la resolución CREG 011 de 2015 [29].



Este tema tiene especial interés dentro de la regulación por los diferentes beneficios y sinergias que presenta para el sistema energético:

- Mejor formación de precios y mayor eficacia en el funcionamiento del mercado eléctrico.
- Optimización en las inversiones en generación y redes de transporte de energía.
- Empoderamiento de los usuarios en la toma de decisiones con respecto a su consumo.
- Promueve la implementación de tecnologías de smart grids (medición avanzada, autogeneración, analítica de datos).
- Maximiza la utilización de los sistemas de información del sector eléctrico.

En relación con el tema de la infraestructura de medición avanzada (AMI) se tiene la resolución de consulta CREG 131 y 219 de 2020: “por la cual se establecen las condiciones para la implementación de la infraestructura de medición avanzada en el SIN”. La Comisión de regulación está dando pasos necesarios para implementar las condiciones que sean necesarias para asegurar los beneficios de las AMI en los usuarios y la operación del sector.

Avanzar en la etapa de diseño e implementación de programas específicos de recursos distribuidos en el país hace parte de la visión de la regulación, por esto, dentro de la agenda regulatoria se tienen dos direcciones de trabajo: establecer esquemas de recursos distribuidos que permitan su incorporación en el mercado, y programas de uso permanente dado que hoy son enfocados netamente al mercado de confiabilidad como respaldo o ante condiciones críticas.

En la intervención del Ministerio de Minas y Energía se menciona que la evolución de los sistemas de distribución se visualiza en tres etapas: la primera es la modernización de la red, la segunda es la integración de los recursos distribuidos al sistema y la tercera la conformación de mercados distribuidos. Colombia se encuentra en la primera etapa, y el Ministerio resalta la emisión de la resolución CREG 131 y 219 de 2020 (AMI) en este sentido. Se han detectado buenas condiciones en el sistema para incorporar Generación Distribuida, pero altas barreras del mercado, lo cual se ha venido trabajando de la mano con la CREG.

El establecimiento del mapa de ruta del sector está enmarcado en la Misión de la Transformación Energética, y en lo relacionado a la respuesta de la demanda se encuentra la: Descentralización, digitalización y gestión eficiente de la demanda. Al respecto se establecen las siguientes recomendaciones: establecer tarifas horarias, incorporar AMI, generar mecanismos de interacción de la demanda, valorar servicios complementarios que

genere la demanda, establecer mecanismos donde la remuneración de la distribución cubre todos sus costos, entre otros.

6.2 Objetos transaccionales - Flexibilidad y servicios auxiliares

Con una tasa creciente de penetración de recursos energéticos distribuidos y fuentes no convencionales de energía renovable, el sistema eléctrico se enfrenta a los desafíos de intermitencia que la naturaleza misma de este tipo de recurso trae consigo. Sin embargo, estos desafíos pueden convertirse en oportunidades, tanto para el sistema, como para los agentes que participan en el mercado. Dentro de estas oportunidades, en el marco de este estudio, se destaca la oportunidad de ofrecer servicios auxiliares y flexibilidad, dos conceptos que se estudian en esta subsección.

A la fecha, no existe un consenso en cuanto al concepto de flexibilidad; sin embargo, hay concordancia en que dicho concepto está ligado a la habilidad que tiene un generador (o un grupo, independientemente de su tecnología) o una carga para modificar su patrón de inyección o consumo, de acuerdo con una señal externa o una necesidad de naturaleza técnica o económica, con el objetivo de proveer servicios de balance o manejo específico de restricciones en el sistema [30]. Aunque esta definición se limita a la entrega o consumo de energía desde y hacia la red, la flexibilidad también puede extenderse a los denominados servicios complementarios o auxiliares, los cuales están orientados a mantener el sistema operando en condiciones deseables, principalmente respecto a parámetros de voltaje y frecuencia.

Los servicios auxiliares son definidos como los mecanismos asociados a la operación y control de los sistemas eléctricos, que permiten que el sistema opere dentro de unos parámetros óptimos de seguridad, confiabilidad y eficiencia. Estos mecanismos, ofrecidos por agentes del sector bajo un esquema de remuneración, permiten mantener el balance en el sistema eléctrico y la operación segura y confiable acorde con los criterios operativos del sistema.

La Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) [31], menciona que, para afrontar los problemas que surgen al integrar las fuentes de energía renovables, es necesario, en primera instancia, que el mercado facilite la entrada de nuevos participantes, como los generadores de energía renovable, las baterías de almacenamiento y los operadores DER.

En segunda instancia, se deben evaluar los esquemas de servicios auxiliares existentes, rediseñando de modo tal que generen los incentivos necesarios para que los mecanismos DER obtengan un mejor desempeño y optimicen la prestación de sus servicios. De este modo, se obtienen dos esquemas: por un lado, los nuevos participantes del mercado que proveen servicios auxiliares existentes, como las turbinas eólicas que pueden ser utilizadas para proporcionar inercia, o la energía solar que ofrece soporte de potencia reactiva.



Por otra parte, están los nuevos servicios auxiliares que emergen, tales como los proporcionados por los sistemas de almacenamiento mediante baterías, los cuales tienen la capacidad de ofrecer respuestas muy rápidas en frecuencia y potencia, facilitando la oferta de servicios de rampa (ramping) y respuesta en frecuencia.

Durante su operación, el sistema puede llegar a requerir respuestas rápidas para subir o bajar la generación y/o consumo de energía. Sin embargo, el término “rápido” puede llegar a ser muy relativo. Cuando se trata de rangos de segundos o minutos, el servicio auxiliar que se emplea es la respuesta en frecuencia. Para este caso, las baterías están en la capacidad de ofrecer un servicio de respuesta rápida que permite contribuir en la estabilización de la frecuencia de la red.

Este tipo de tecnología de almacenamiento tiene capacidad de responder en fracciones de segundo, haciendo de las baterías un método eficaz que los operadores del sistema pueden implementar para crear una reserva y dar respuesta rápida a la frecuencia. Cuando los tiempos de reacción son mayores a los rangos de segundos y los requerimientos de potencia son grandes, las baterías pueden proveer también el servicio de ramping, el cual está orientado a resolver problemas de balance.

Ahora bien, para lograr una integración óptima de los recursos distribuidos es necesario realizar un análisis y diseño del mercado de energía que contribuya a un uso eficiente de los mismos. Es importante tener en cuenta que, como mercado de energía no se entiende únicamente al mercado mayorista, sino también involucra mercados de capacidad y servicios auxiliares. En estos casos, los DER ofrecen beneficios no solo al sistema, sino también a los prosumidores, quienes se espera que, en la mayoría de los casos sean sus propietarios.

De hecho, en este punto es relevante mencionar que, con una implementación masiva de recursos energéticos distribuidos es posible la incorporación de nuevos agentes al mercado de energía mayorista, tales como los agregadores, que pueden operar desde el lado de la oferta, así como desde el lado de la demanda.

Los agregadores podrían desempeñar un papel fundamental en el mercado en cuanto pueden pasar a ser la representación de la demanda en el mercado de energía mayorista, papel que actualmente es inexistente en el mercado colombiano. De este modo, se podría obtener múltiples beneficios a la hora de implementar masivamente la incorporación DER en la red, tales como: mayor competencia, nuevas oportunidades de negocio y participación de la demanda [32].

Los agregadores también pueden ofrecer sus servicios desde el lado de la oferta, bien sea agregando excedentes de pequeños recursos de generación tan pronto como la energía es generada, o bien se utilizando recursos de almacenamiento para entregar la energía durante los picos de consumo del sistema, para lo cual se podría hacer uso de plantas eléctricas



virtuales. Al agregar estos recursos de generación y entrar a competir en el mercado de energía mayorista se puede generar una formación más eficiente de los precios de bolsa de la electricidad, dado el despacho por orden de mérito que emplea el operador del sistema eléctrico en Colombia para programar el despacho diario.

En mercados en los que los precios horarios entre picos y valles presentan grandes diferencias, los agregadores que utilizan sistemas de almacenamiento podrían ofrecer servicios de arbitraje, almacenando la energía, bien sea generada por los DER o tomada de la red, durante las horas en que el precio de la electricidad es bajo y vendiéndose cuando este es alto. De manera similar, las señales económicas de precios diferenciados podrían incentivar a los prosumidores a modificar sus patrones de generación y consumo de energía según los precios que refleja el mercado. Esta capacidad de los agentes de modificar sus patrones de consumo y generación refleja precisamente la flexibilidad que pueden ofrecer los agregadores al sistema, los cuales son necesarios puesto que los cambios que producen los DER de manera individual no pueden influir en el sistema por sí solos.

En un sistema eléctrico como el colombiano, donde la dependencia a un solo recurso de generación es muy alta, la incorporación DER y FNCER puede ser fundamental para contribuir a la diversificación de la canasta de generación, pues, haciendo uso de recursos que, en términos de estacionalidad son complementarios a los existentes, además de recursos de almacenamiento y la participación de agentes agregadores, se podría hacer frente a situaciones críticas del sistema, como las que se presentan durante los periodos de escasez hídrica [33].

Como se mencionó inicialmente en este apartado, los DER pueden traer problemas de intermitencia a la red, pero también traen consigo oportunidades que pueden impactar positivamente a la misma, las cuales van desde servicios de balance y desconexión, hasta servicios auxiliares como regulación de frecuencia y ramping. De este modo, una óptima incorporación de recursos distribuidos y fuentes no convencionales de energía renovable puede conducir a la implementación de un mercado de servicios auxiliares donde, por ejemplo, los operadores del sistema recurren a DER agregados para obtener reservas primarias y secundarias de frecuencia. Alta participación de DER en el sistema permite tener mayor oferta de servicios auxiliares, con mayor flexibilidad y en tiempos deseados.

Ya se habló de DER como recursos individuales que aportan beneficios y flexibilidad al sistema, pero la flexibilidad puede ser aún mayor cuando se ofrece desde un conjunto de dispositivos de red que conforman una MR, tal y como se describe en [33] donde se hace énfasis en las MR renovables. Los avances en este tipo de MR están demostrando que, además de mejorar la calidad del servicio para los usuarios de su propia MR, pueden proporcionar servicios auxiliares a la red principal, incorporando control de frecuencia, haciendo gestión en la estabilidad del voltaje, restaurando el sistema y mejorando la calidad de la energía.



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group – JWG C6.C5.4.

Las MR, dependiendo de su tamaño, pueden ser de utilidad para las redes de transmisión o distribución. Las grandes microrredes pueden ofrecer a los operadores del sistema de transmisión (TSO's) servicios de regulación de frecuencia; mientras que las pequeñas microrredes pueden ofrecer servicios de control de voltaje a los operadores de los sistemas de distribución (DSO's).

Un beneficio que tienen las microrredes es su escalabilidad, pues pueden agregarse varias para ofrecer una mayor cantidad de servicios al sistema o vender unos excedentes mayores a la red principal. De este modo, la agregación de MR puede contribuir a la descongestión de la red principal durante picos de carga, actuando como un agregador que produce servicios auxiliares.

Adicionalmente, las MR pueden ayudar a la red principal cuando hay problemas de racionamiento, desconectándose de esta y siendo abastecidas por los recursos de generación distribuida que la conforman.

Finalmente, las microrredes también traen consigo beneficios económicos para los usuarios finales, pues la venta de excedentes puede alivianar sus facturas e incluso llevarlos a percibir ingresos. Esto es importante si se tiene en cuenta que, las microrredes no solo pueden ser implementadas agregando usuarios finales residenciales, sino también comunidades, instituciones, industria, etc; lo que puede ayudar a dinamizar la economía.

Sintetizando, se pueden ver los beneficios de las MR renovables a modo de esquema: los usuarios locales producen energía renovable para la MR mediante recursos distribuidos, estas MR ofrecen servicios auxiliares o excedentes de energía a la red principal, por lo cual reciben una remuneración de parte de esta, los cuales terminan de forma parcial en los usuarios locales productores de energía, donde inicia el esquema.

6.3 Arquitecturas de mercado para las DER y MR

6.3.1 Esquemas peer to peer

Los mercados “Peer-to-Peer” responden a la misión de la transformación energética hacia la descentralización, digitalizado y con atención al manejo de la demanda del sector energético que se propuso en el Ministerio de Minas y Energía, ya que aportan a la transformación del sistema donde el usuario toma un papel central y crean oportunidades de negocio.

En adición, los mercados “Peer-to-Peer” son una buena propuesta para mejorar los indicadores financieros de proyectos rurales mediante tecnología renovable. Estos indicadores reflejan el crecimiento en la riqueza y desarrollo económico en zonas vulnerables del país. Para que los mercados “Peer-to-Peer” sean viables en Colombia deben evaluarse tres tópicos [34]:

- Generar incentivos para que los usuarios puedan obtener excedentes más allá del balance neto, que ayuden a aumentar las posibilidades de los proyectos “Peer-to-Peer”.
- Los mercados “Peer-to-Peer” requieren de medición inteligente, en Colombia se busca que para el año 2030 el 95% de los usuarios cuenten con medición inteligente.
- Aumentar las alternativas para que los usuarios regulados decidan qué proveedor de energía les brinde sus servicios, para que no se limiten los comportamientos de los usuarios y se aprovechen diferentes cifras de costos.

Para aprovechar las alternativas para el sector y mercado de energía la CREG, la UPME y la Superservicios, deben crear escenarios regulatorios para que se puedan experimentar en Colombia con las nuevas propuestas de negocio y obtener aprendizajes para el sistema. La Interacción con los escenarios internacionales sirve para enfrentarse a los nuevos escenarios cambiantes, si bien cada país es diferente, los retos regulatorios y técnicos son similares [34].

6.3.2 Transacciones de energía - Comunidades de Energía

En cuanto a las transacciones de energía, continuando con la revisión del desarrollo de comunidades de energía en los mercados europeos, en el [26] se realizó una revisión de proyectos en Europa que se pueden identificar como esquemas de comunidades potenciales, donde se encontraron proyectos como iniciativas del sector eléctrico desarrolladas como pruebas piloto y otros proyectos impulsados por la participación ciudadana. Tres conjuntos fueron conformados según las características de los proyectos revisados:

- El primer conjunto consiste en una estructura muy común donde la energía generada es un activo de la comunidad que no es usada para el autoconsumo sino para la venta a un proveedor. El ingreso percibido se reinvierte en proyectos energéticos o se reparte entre los miembros de la comunidad. Si es el segundo caso, varían las formas de definir cómo se distribuirá el valor entre los miembros, ya que se puede usar una repartición mediante la equitatividad o la proporcionalidad, pero se pueden utilizar reglas económicas o incluso aplicar modelos matemáticos. Para realizar la formulación del precio debe tener en cuenta la estructura de la comunidad para recuperar los costos que implica el sistema de distribución para alcanzar la independencia energética [27].
- El segundo conjunto está relacionado con la posibilidad de compartir la energía por la red que se gestiona en la comunidad, donde se poseen y administran activos de generación cuyas ganancias son repartidas o reinvertidas, en estos escenarios se puede lograr un equilibrio entre la demanda y generación local. La coordinación del intercambio de energía puede estar a cargo de un proveedor común que da correspondencia entre producción y consumo, a su vez, el proveedor en los casos necesarios suministra energía adicional.

- El último conjunto nace habitualmente por la necesidad de poblaciones distanciadas de una red principal, de compartir la producción local a través de las redes de distribución que se operan en la zona de las comunidades, donde la energía se comparte de forma física. Estas iniciativas pueden llevar la conexión entre redes locales a redes ya existentes.

Si la actividad de la comunidad no se restringe a la generación y venta de energía generada, sino que esta energía es utilizada para el propio autoconsumo colectivo de los miembros, se debe contar con algún sistema que permita el intercambio de energía en la comunidad. La administración y gestión de una red de distribución utilizada para tal fin puede ser por parte total o parcial de la misma comunidad, sin embargo, un proveedor de servicios de distribución también puede tomar la operación de la red comunitaria. La regulación es la encargada de definir el alcance que puede tener la comunidad sobre la red que utiliza y cómo es la interacción con el agente usual que presta servicios de operación de red.

En general, las comunidades siguen conectadas a una red principal para utilizarla de respaldo en casos que la energía generada no alcanza para satisfacer la propia demanda, cuando esto suceda, se deben asumir los costos en proporción al consumo y capacidad de conexión.

Algunos estados miembros de la UE permiten en su regulación que algunos prestadores de servicios con condiciones particulares asuman ciertas responsabilidades como proveedores de servicios de distribución para dar apoyo a las comunidades de energía, dichos prestadores de servicios van de la mano con un proveedor autorizado para garantizar su correcta labor. La regulación puede permitir que los proveedores realicen tareas de servicios públicos en las comunidades como cobrar tarifas de red o gravámenes en función del consumo de energía. Lo anterior ayuda a dinamizar el mercado permitiendo que más actores participen con un portafolio de servicios más amplio.

Las comunidades de energía deben cumplir con los deberes y responsabilidades según las funciones ya definidas en el mercado actual que desempeñen, por ejemplo, en los trabajos relacionados en darle equilibrio al sistema cuando se operan redes: si se encuentra un operador del sistema de distribución apoyando a la comunidad de energía, este puede tomar la responsabilidad del equilibrio del sistema, en caso contrario, la comunidad debe responder por la implementación de estrategias de equilibrio y asumir gastos financieros en casos de presentarse desequilibrios.

Otro de los aspectos en que las comunidades de Energía participan es en los esquemas de flexibilidad y eficiencia energética, aspectos relevantes para la innovación del nuevo mercado, ya que con este ejercicio se contribuye a reducir pérdidas locales, se mejora la capacidad de red y se da flexibilidad local [22], [25]-[27].

Las compañías del sector eléctrico pueden beneficiar mucho las comunidades de energía con temas de inversión y conocimiento técnico, para que se puedan sacar adelante los proyectos

cumpliendo con todas las características asociadas. Cabe destacar que la participación de estas compañías no debe comprometer la autoridad o autonomía de las comunidades. Además, según las definiciones de cada tipo de comunidad hay unos requisitos de participación, por ejemplo, recordando el caso de las REC, las compañías no deben ser más que pequeñas o medianas empresas [35].

7. ESTADO ACTUAL EN LA INTEGRACIÓN DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUIDOS EN COLOMBIA

Desde hace unos años de la mano de Colombia Inteligente se ha venido realizado un trabajo importante en el seguimiento e investigación sobre la penetración de las DER en Colombia, en su último reporte presenta los avances o el estado de adopción que ha tenido Colombia en la adopción de cada una de las tecnologías, la Figura 5 presenta un resumen al respecto.

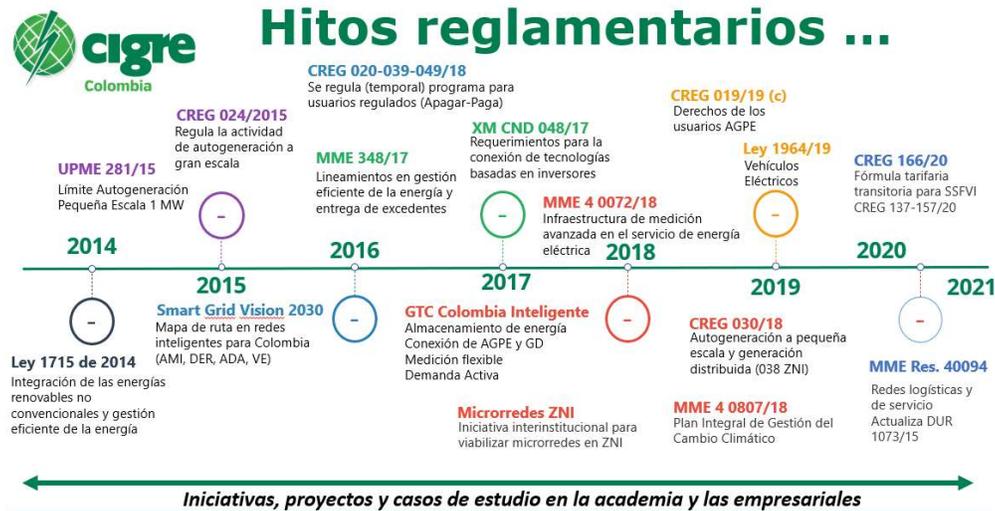


Figura 5. Iniciativas, Proyectos y Casos de Estudio en la Academia y Empresariales.

Paralelo a esto, Colombia Inteligente, en su ejercicio constante ha adelantado acciones con el ánimo de acelerar la inserción de los sistemas inteligentes en el sistema eléctrico colombiano, focalizándose en lo relacionado a los DER.

En el contexto colombiano la integración de los recursos energéticos es bajo, aunque se destaca que en el país se han realizado importantes esfuerzos para el desarrollo de tecnologías que son componentes fundamentales de una MR. El desarrollo de la autogeneración y generación distribuida, el despliegue de la infraestructura de la medición avanzada. Así como el fomento de la movilidad eléctrica y los sistemas de almacenamiento de energía, aunque de forma inicial a solo uno de sus potenciales servicios.



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group – JWG C6.C5.4.

Por tanto, en el país es importante generar un ecosistema alrededor de los recursos energéticos distribuidos que pueda llevar el nivel de adopción desde el estado actual (política pública, regulación económica, normativa técnica y aplicaciones focalizadas a nivel académico o empresarial) hacia una integración masiva y en el que se fomenten los módulos fundamentales de las microrredes y se incentive la integración de los DER para lograr la transformación del sector eléctrico.

En la TABLA 2, se describe los avances en el país respecto a la política y reglamentación por cada uno de los tópicos discutidos en este documento. A nivel de desarrollo de la temática de redes inteligentes, se han desarrollado pilotos para la evaluación de tecnologías en la reconfiguración de circuitos, en autogeneración a pequeña escala (≤ 1 MW) se han instalado más de 23 MW; en los programas de respuesta de la demanda como “Apagar Paga” se lograron ahorros de más de 500 GWh y en el mecanismo de demanda desconectable voluntaria, una disponibilidad de entre 6 a 11 GWh-día.

A nivel del almacenamiento se está impulsando el desarrollo de un proyecto que oscilaría alrededor de 50 MW (UPME), pero también existen proyectos empresariales para proveer soluciones de almacenamiento a plantas térmicas y renovables. En el ámbito de la movilidad eléctrica y la medición avanzada, se cuenta con alrededor de 7.000 vehículos eléctricos y 400.000 medidores avanzados en el país.



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
 Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
 Join Group – JWG C6.C5.4.

TABLA 2. Panorama político, regulatorio y normativo en Colombia ante la adopción de cada una de las tecnologías DER

Requerimiento	Política Pública	Regulación Económica	Regulación Técnica	Estándares (referentes) Mejores prácticas
Red de distribución / Grid	Ley 143 - 1994 MINENERGÍA DUR 1073 - 2015 / Res. 40094	Res. CREG 015, 085 - 2018 Res. CREG 015, 036, 199 - 2019	Res. CREG 024, 025 - 1994 Res. CREG 015, 085 - 2018 Res. CREG 036 -2019 Res. CREG (C) 170 - 2020	NTC 2050 - 2020 ISO 55001 IEEE 2030.7 IEEE 2030.8
Autogeneración / Distributed generation	Ley 1715 - 2014 Dec. MME 2469 - 2014 Dec. MME 348 - 2017 Res. MME 4 0807 PIGCCme - 2018 Res. MME 4 029 - 2021	Res. CREG 030, 038 - 2018 Res. CREG 002 - 2021 Res. CREG (C) 166 - 2020 Res. CREG (C) 137- 157 - 2020 Cir. UPME 018 - 2019	Res. UPME 281- 2015 Res. CREG 02 - 2015 Cir. CREG 037, 108 - 2018 Cir. CREG 103 - 2019 Res. CREG 200 -2019 Acuerdo CNO 1258 - 2019 Acuerdo CNO 1322 - 2020 Res. CREG (C) 019 - 2019 Res. CREG (C) 170 - 2020 RETIE	NTC 2050 - 2020 IEEE 1547 - 2018
Respuesta a la Demanda / Demand Response DDV	Ley 1715 - 2014 Dec. MME 348 - 2017 Res. MME 4 0807 PIGCCme CONPES 3934	Res. CREG 203 - 2013 Doc. CREG 077 - 2014 Res. CREG 011, 012 - 2015 Res. CREG 029, 039, 049 - 2016	Res. CREG 098 -2018 Res. CREG 069, 117, 117A - 2020 Acuerdo CNO 1303, 1305 - 2020 RETIE Circular CREG 113- 2020 Circular CREG 001- 2021 Circular CREG 008- 2021	NTC 2050 - 2020 IEC 62746-10 OpenADR 2.0 IEEE 1547 - 2018



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
 Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
 Join Group – JWG C6.C5.4.

Requerimiento	Política Pública	Regulación Económica	Regulación Técnica	Estándares (referentes) Mejores prácticas
Almacenamiento / Energy Storage	Res. MME 4 0807 PIGCCme CONPES 3934 - 2018	Res. CREG 098 – 2019 UPME STR 01-2021	Res. CREG 098 -2019 Res. CREG 030 -2018 Acuerdo CNO 1255 - 2019 Acuerdo CNO 1300, 1354 - 2020 Documento CND 020 - 2019 RETIE / UPME STR 01 - 2021	NTC 2050 - 2020 IEEE 1547 - 2018
Movilidad eléctrica Electric Vehicle	Ley 1819 - 2016 Ley 1955 - 2019 Ley 1964 - 2019 CONPES 3934 - 2018 Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica - 2019	Dec. MINCIT 1116 - 2017 Dec. MINCIT 2051 - 2019 Res. MINAMBIENTE 2000 - 2017 Res. MINAMBIENTE 509 - 2018 Res. UPME 463 - 2018	RETIE	NTC 2050 - 2020 ISO/IEC 15118 SAE J2847-1 (*) Requerimientos OR
Medición Avanzada AMI	Res. MME 4 0072 - 2018 Res. MME 4 0483 - 2019 Res. MME 4 0142 - 2020	Res. CREG 038 - 2014 Doc. CREG 077 (Cir. 54) - 2018 Res. (C) 131-219 - 2020 Cir. CREG 010-011- 2021	Res. CREG 038 -2014 Cir. CREG 035 - 2018 Res. CREG (C) 2019 - 2020 Cir. CREG 098 - 2020 Res. (C) 131-219 - 2020	NTC 6079 - 2014 (2021)
Ciberseguridad Cybersecurity	CONPES 3701 - 2011 CONPES 3854 - 2016 MINDEFENSA Plan Sectorial de Protección y Defensa para el Sector Electricidad - 2018 Cir. 072 - 2019 Estrategia integral de seguridad digital en el sector eléctrico	-	Acuerdo CNO 788/1241/1347 - 2020 Acuerdo CNO 1043	NERC-CIP v06 ISO/IEC 27001 ISO 27002 ISO 27019 IEC 62443 NISTIR 7628

8. INVESTIGACIÓN SECTORIAL

El estado actual de la implementación de Microrredes en Colombia es insipiente, sin embargo vemos como en esta etapa inicial está creciendo la implementación de recursos distribuidos, lo que se convierte en una gran evidencia para conocer la opinión de las distintas empresas y agentes que intervienen en los procesos de implementación de este tipo de sistemas en el sector eléctrico nacional, con el fin de identificar las brechas, dificultades, falencias u otros factores que limitan el proceso de transición de las redes eléctricas a estas nuevas tecnologías.

8.1 Metodología de la encuesta

La realización de la presente encuesta se fundamentó principalmente en conocer las experiencias, requerimientos y desafíos que actualmente está enfrentado la industria nacional, donde se realizaron alrededor de 26 preguntas, dirigida a expertos y líderes en la implementación de este tipo de sistemas, la encuesta fue socializada con todos los actores y participantes en la implementación de recursos distribuidos como fueron: Operadores de red, consultores, integradores, fabricantes, academia y gobierno.

8.2 Análisis de la encuesta

Se recopiló el estado actual sobre los requerimientos, necesidades y desafíos ante la implementación tecnológica de Microrredes en Colombia, cumpliendo con la regulación, normativa y reglamentación. Por tanto, lo invitamos a realizar una corta encuesta, la cual presentamos a continuación y agradecemos su respectivo diligenciamiento.

Con el objetivo de recopilar las experiencias del país en la implementación de microrredes, se diseñó un cuestionario en línea, el cual estuvo disponible en los meses de septiembre y octubre de 2020. Se obtuvieron 49 respuestas, distribuidas como se observa en la Figura 6, donde cabe resaltar la participación de diferentes actores en el proceso de implementación de microrredes tales como la academia, consultores, operadores de red, fabricantes, entre otros.

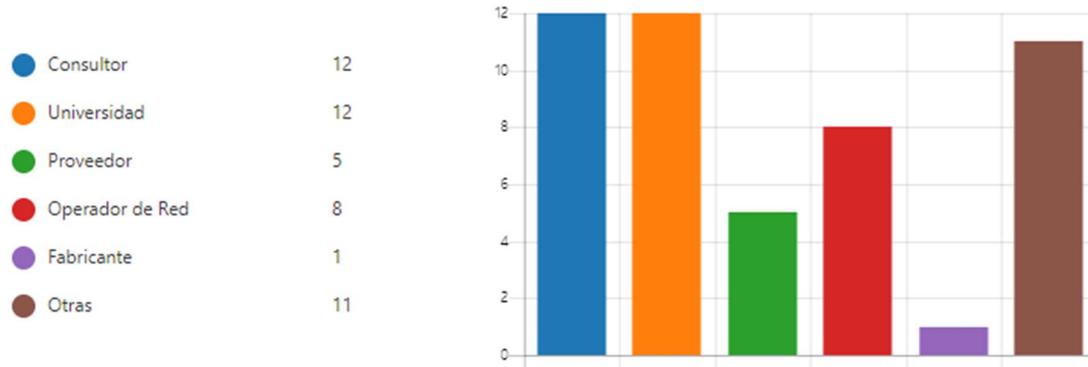


Figura 6. Actores en el proceso de implementación de las microrredes.

De la Figura 6 puede observar que el 33% de los encuestados han realizado o realizarán algún tipo de implementación de microrredes mientras que el 67% no tiene en sus planes realizar ningún tipo de implementación de este tipo de tecnologías. Lo anterior nos lleva a concluir que en Colombia hay un número importante de actores que están interesados en la implementación de microrredes.

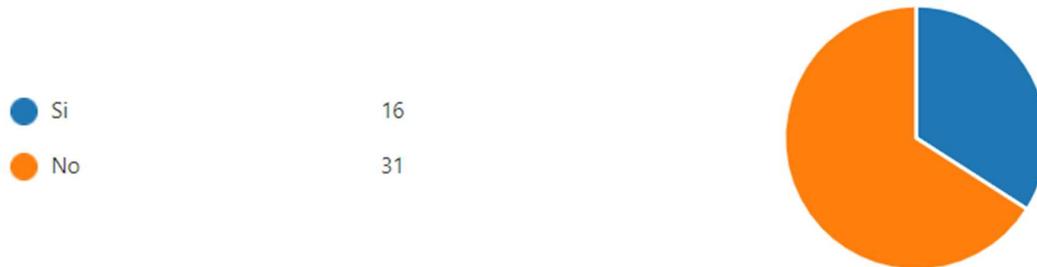


Figura 7. Proyectos de Microrredes.

De las respuestas obtenidas, en la Figura 8 se muestra que en Colombia hay 16 proyectos de microrredes en procesos de implementación y en diferentes fases. De estos proyectos, seis microrredes se encuentran en fase de operación, cuatro en fase de construcción y seis más, en ideación y planeación; se observa que el 37,5% de los proyectos se encuentran en fase de operación exitosa, lo que significa que hay un gran interés en llevarlos hasta esta fase.

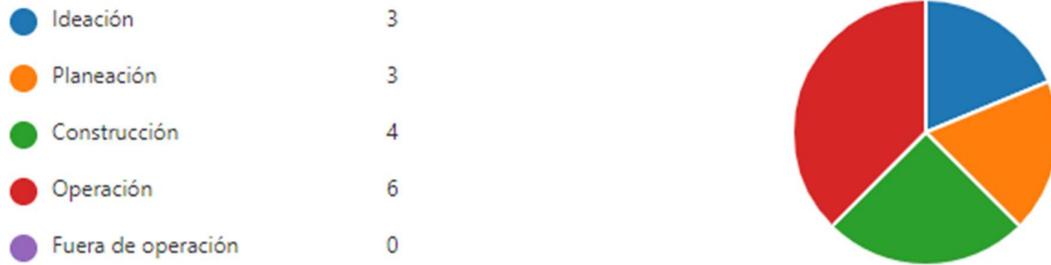


Figura 8. Estado de Avance de las Microrredes.

De acuerdo con la Figura 9, el 47% de las microrredes se encuentran en Antioquia, el 27% en Bogotá y el restante se encuentran distribuidos en Cundinamarca, Ginebra - Valle del Cauca, Quimbaya y San Andrés Islas. Esto nos permite concluir que hay un interés general en diferentes regiones de Colombia para implementar y poner en servicio este tipo de tecnologías.

¿Dónde por ¿Dónde esta ubicada o se ubicará la microrred? (Municipio/Departamento)

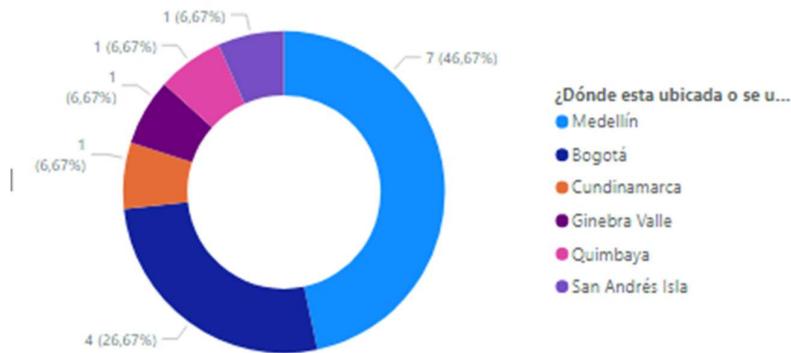


Figura 9. Ubicación geográfica de las Microrredes en Colombia.

En Figura 10 se muestra el año de entrada en operación de las microrredes, tanto de las instaladas como las que se instalarán en los próximos años. Se debe hacer un mayor énfasis en las ventajas de la implementación de microrredes, mostrando las oportunidades que brindan estas nuevas tecnologías en la operación de las redes eléctricas (autonomía en generación, gestión de la demanda, retraso en proyectos de reforzamiento de infraestructura, entre otras).



Figura 10. Año de entrada en Operación de las Microrredes.

Como se ha dicho anteriormente, una microrred está compuesta por varios elementos como se observa en la Figura 11; de acuerdo con los encuestados, el elemento más común es la generación con fuentes no convencionales de energía, seguida por el sistema de monitoreo y control, y el control de cargas eléctricas. Otros elementos considerados son el sistema de gestión energética, el almacenamiento de energía y el control inteligente.

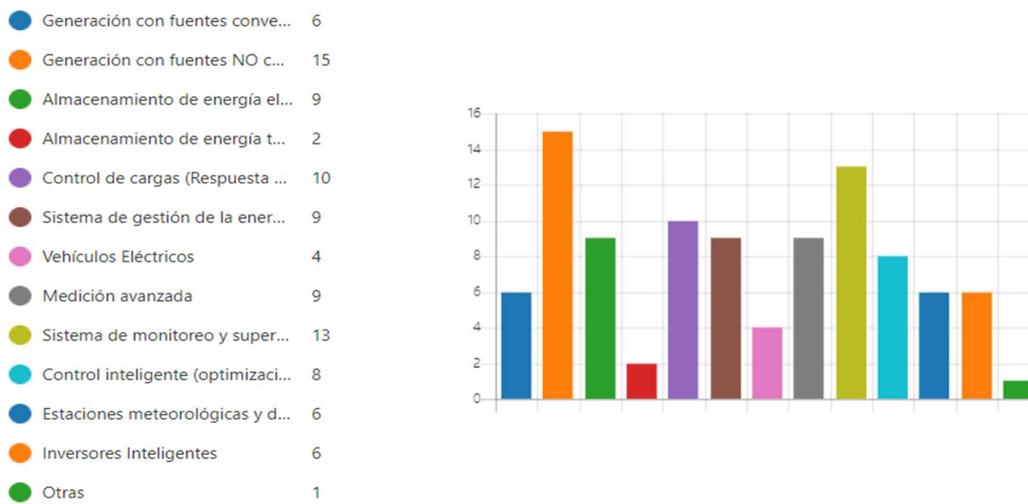


Figura 11. Otros elementos a considerar en las Microrredes.

De acuerdo con las respuestas, la mayoría de las microrredes se encuentran conectadas a una red principal (SDL o STR), sin inyectar excedentes a la misma, como se muestra en la Figura 12 se puede observar que actualmente el 40% de las microrredes conectadas a la red, inyectan excedentes a la misma.



Figura 12. Conexión de las Microrredes.

Respecto a la normatividad en la cual se ha fundamentado el desarrollo de las microrredes, se puede observar en la Figura 13 que se han utilizado como referentes los requisitos y Normas Técnicas Colombianas, el RETIE y la NTC 2050. Otros referentes utilizados son el estándar IEEE 1547 y el IEC 62548.

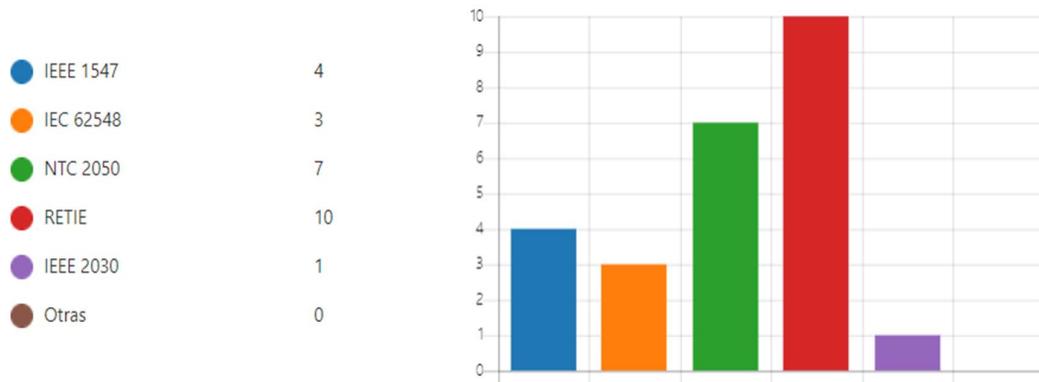


Figura 13. Normatividad de las Microrredes.

En la Figura 14, se puede observar como la mayoría de los desarrollos se han elaborado al interior de las empresas interesadas en estas tecnologías, especialmente las especificaciones, la ingeniería y el diseño; también se han encargado de la operación y mantenimiento, así como de la gestión comercial de la energía, mientras que el montaje y la puesta en servicio se realiza a través de terceros.

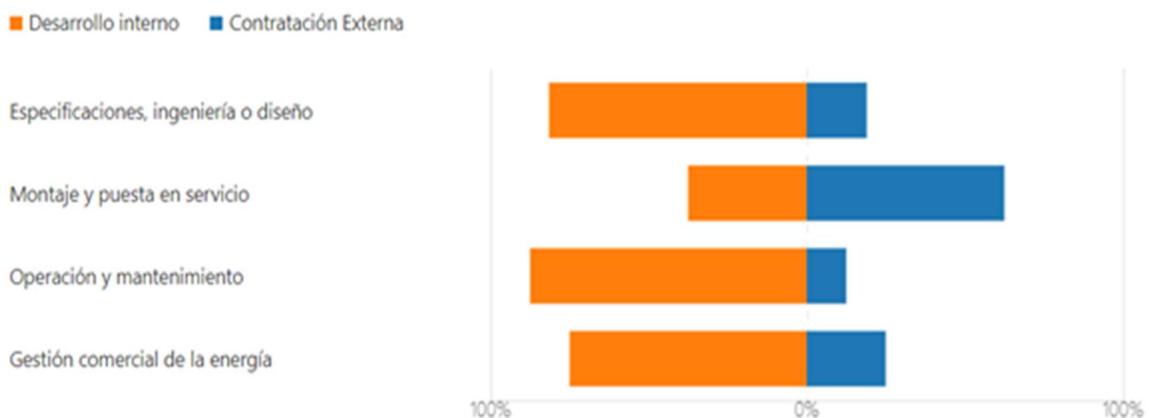


Figura 14. Impulsores de las Microrredes.

Los principales motivadores para la implementación de la microrred han sido la investigación y el desarrollo tecnológico, seguido de la necesidad de optimizar el uso de los recursos energéticos y el suministro autónomo tal como se indica en la Figura 15



Figura 15. Opciones de Microrredes.

Las principales barreras encontradas por los encuestados para el desarrollo de las microrredes en el país son de carácter legal, seguida de las barreras económicas y ambientales como se muestra en la Figura 16.

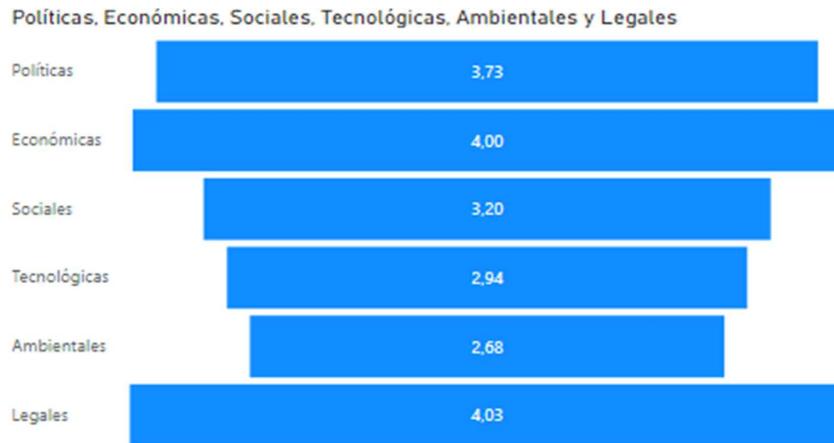


Figura 16. Barreras en la implementación de Microrredes.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ❖ Dentro de los retos en materia social, económica y ambiental, las microrredes deben desarrollar cada uno de estos aspectos, con el fin de contar con soluciones sostenibles y necesarias para aportar a la transformación energética actual de Colombia, enmarcadas en Descentralización, Descarbonización y Digitalización, articulado con lo se plantea en el PEN 2030.
- ❖ De acuerdo con el análisis y revisión realizada para el caso colombiano en relación con la implementación de microrredes eléctricas, se hace necesario avanzar en temas regulatorios y técnicos con el fin de incentivar el desarrollo de estas soluciones, logrando unas redes eléctricas confiables, seguras y resilientes.
- ❖ Con el fin de que las microrredes atiendan de manera adecuada las necesidades y requerimientos de los OR, se busca que estas soluciones tengan en cuenta lo siguiente:
 - Adquirir tecnologías de analítica, nuevos esquemas de control de las redes y sistemas de control más eficientes.
 - Digitalización con el fin de incrementar la visibilidad de los activos para cada uno de los actores: Fabricante, operador del sistema, dueño del activo, usuario final.
 - Uso de herramientas de tiempo real para optimizar la gestión de las redes eléctricas usando gemelos digitales.
 - Integración de tecnología IT&OT para una operación segura, eficiente y confiable de los activos de la microrred.
- ❖ En Colombia se deben adoptar nuevas tecnologías para validar microrredes antes de su puesta en operación tales como:
 - Implementar Laboratorios de tiempo real, que permitan validar el control, la protección y las comunicaciones de manera integrada, con el fin de lograr un adecuado funcionamiento del sistema antes de su puesta en operación.
- ❖ En la actualidad, la regulación ha avanzado con actualizaciones transitorias que se han focalizado en ciertas tecnologías, como la solar fotovoltaica y la eólica. Por tanto, se requiere actualizar la regulación técnica y económica para fomentar la integración de las diferentes tecnologías que componen una microrred y sus funcionalidades para proveer el servicio de energía eléctrica.

- ❖ Se deben adoptar los estándares internacionales (normas y mejores prácticas IEEE/CIGRE) mínimos necesarios para la planeación y operación de una microrred que deberán ser incluidos dentro de las regulaciones técnicas nacionales, en particular lo referente a la operación coordinada con redes existentes para su funcionalidad en isla con topologías embebidas o con otras microrredes, articulado con lo que plantea el RETIE y la NTC facilitando el desarrollo de estas soluciones inteligentes, acelerando su implementación en el mercado eléctrico Colombiano.

- ❖ Habilitar la implementación de esquemas del tipo comunidades de energía para fomentar el desarrollo de modelos de negocio por parte de los usuarios tanto en el sistema interconectado como en las zonas no interconectadas para proveer su servicio de energía eléctrica.

- ❖ Es muy probable que se deriven en Colombia mercados descentralizados en donde contemos con nuevos e importantes actores como: MR, prosumidores, agregadores, comunidades energéticas, baterías y VPP. Todo lo anterior exige un diseño efectivo de estos mercados descentralizados que permitan una integración eficiente de las nuevas tecnologías y de estos nuevos participantes. Lo anterior se traduce en importantes retos regulatorios para permitir la correcta incorporación de DER's y MR al mercado colombiano. Por tal motivo, la regulación debe anticiparse a promover la integración de estos elementos de manera eficiente, ágil y que facilite que los usuarios finales participen de la mejor manera en los mercados de energía, aprovechando las nuevas tecnologías como son: energías renovables, almacenamiento, medidores inteligentes, tecnología blockchain, etc.

- ❖ Será clave la participación activa de los usuarios en todos los ámbitos del mercado, en donde se destacan sus aportes en flexibilidad, respuesta de la demanda, o eficiencia energética. Para ello es necesario identificar y remover las barreras existentes.

- ❖ Frente al mercado de servicios complementarios, para dinamizar su implementación, es necesario mejorar su diseño, incorporando y aprovechando los beneficios que pueden aportar a este mercado los nuevos actores, buscando generar mayor flexibilidad y confiabilidad al sistema. Para ello se deben diseñar las condiciones de mercado que generen los incentivos suficientes para incorporar estos nuevos elementos al mercado (DER, MR, almacenamiento, renovables, respuesta de la demanda, entre otros.)



Comité de Estudios C5 Mercados de Electricidad y Regulación
Comité de Estudios C6 - Sistemas de Distribución y Generación Dispersa
Join Group – JWG C6.C5.4.

- ❖ Las tecnologías de comunicación y los sistemas de control/supervisión son elementos clave para la operación eficiente y confiable de las MR. Por ello se requiere generar regulación asociada a las necesidades de estos sistemas. Así mismo, el Gobierno debe liderar el fortalecimiento de un ecosistema de investigación-innovación que permita generar esta tecnología de forma nacional, acorde al contexto y las necesidades del país, integrando de manera adecuada la industria con la academia, como fue realizado en el presente reporte técnico por parte del Grupo de trabajo JWG C6.C5.4 de CIGRE Colombia.

10. REFERENCIAS

- [1] M. Soshinskaya, W. H. J. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, barriers and success factors," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 659–672, 2014.
- [2] J. L. de la Rubia, "Estudio sobre el estado actual de las Smart Grids," *Univ. Carlos III Madrid*, 2011.
- [3] C. Marnay and S. Chatzivasileiadis, "Microgrid Evolution Roadmap," no. August 2010, pp. 6–11, 2015.
- [4] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier, "A literature review of Microgrids: A functional layer based classification," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1133–1153, 2016.
- [5] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, "Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, 2011.
- [6] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management - Part II: System operation, power quality and protection," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 440–451, 2014.
- [7] F. J. Lanas Montencinos, "Desarrollo y validacion de un modelo de optimizacion energetica para una microrred memoria para optar al título de ingeniero civil electricista," 2011.
- [8] Colombia Inteligente, "Recuerdos Energéticos Distribuidos Acciones para su integración," Colombia, 2020.
- [9] Colombia Inteligente. (2019). Microrredes sostenibles en ZNI - Lineamientos Estratégicos. Colombia Inteligente, 2019.
- [10] Microgrids I engineering, economics, & experience in cigre, report, cigre, 2015, cigre. 2015.
- [11] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrid Management," *IEEE power energy Mag.*, vol. 6, no. june, pp. 54–65, 2008.

- [12] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [13] CIGRE Colombia "Reporte Técnico 2020", Control en Microrredes de A.C: Control Jerárquico, Tecnologías y Normativa. 2020
- [14] P. Krömer, V. Snášel, J. Platoš, A. Abraham, L. Prokop, and S. Mišák, "Genetically evolved fuzzy predictor for photovoltaic power output estimation," *Proc. - 3rd IEEE Int. Conf. Intell. Netw. Collab. Syst. INCoS 2011*, pp. 41–46, 2011.
- [15] E. Gómez-Luna, L. Palacios, R. Franco, "Monitoring and Control System Using ETAP Real-Time on Generation Plant Emulation using OPAL-RT", IEEE Andescon, 2018.
- [16] E. Gómez-Luna, L. Palacios, R. Manrique, "Reliability, safety and efficiency in the integration of micro-grids using real-time simulation", *Mundo Eléctrico* No. 116, pp. 96, 2018.
- [17] E. Gómez-Luna, J. Candelo, E. Marlés, "Current Status and Future Trends in Protection, Control and Communications Testing in Electrical Grids using Real-time Simulation", *Journal of Science Engineering and Technology Review* 11 (4) pp. 204 - 215, 2018.
- [18] PTI-SA, "Laboratorio en tiempo real," 2020. [Online]. Available: www.pti-sa.com.co/laboratorio-rt.
- [19] IEEE Standard 2030.8 "IEEE Standard for the Testing of Microgrid Controllers" IEEE Power and Energy Society Sponsored by the Transmission and Distribution Committee, 14 June 2018.
- [20] D. Frieden, A. Tuerk, J. Roberts, S. D'Herbemont, A. Gubina. "Compile .Collective self-consumption and energy communities: Overview of emerging regulatory approaches in Europe," Jun, 2019.
- [21] Unión Europea, "Energía limpia para todos los europeos" Luxemburgo. May 2019.
- [22] Eurelectric, "Citizens Energy Communities: Recommendations for a successful contribution to decarbonisation," Union of the Electricity Industry - Eurelectric aisbl, Brussels, Belgium. May, 2019.
- [23] Directivas UE, "Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo, 5 de junio de 2019, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE," Rep. Regulatorio, Diario Oficial de la Unión Europea, 2019.

- [24] Directivas UE, “Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables,” Rep. Regulatorio, Diario Oficial de la Unión Europea. 2019.
- [25] J. Roberts, D. Frieden, and S. D’Herbemont, “Energy Community Definitions,” Integrating community power in energy islands. Explanatory Note. May 2019.
- [26] Council of European Energy Regulators, “Regulatory Aspects of Self- Consumption and Energy Communities CEER Report,” Customers and Retail Markets and Distribution Systems Working Groups. Jun, 2019.
- [27] Project Asset - Advanced System Studies for Energy Transition, “Energy Communities in the European Union - Revised final report,” May, 2019.
- [28] XM S.A. E.S.P – Proyecto iSAAC “Plantas Virtuales – (VPPs) Virtual Power Plants” Sep 2019.
- [29] Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. Resolución 098 de 2018 por la cual se adoptan las normas para regular las pruebas de disponibilidad de la demanda desconectable voluntaria y se adoptan otras disposiciones relativas a los anillos de seguridad del cargo por confiabilidad (2018).
- [30] A. Ramos, C. D. Jonghe, V. Gómez, and R. Belmans, “Realizing the smart grid’s potential: Defining local markets for flexibility,” Utilities Policy, vol. 40, pp. 26 – 35, 2016.
- [31] IRENA, “Innovate Ancillary Services innovation landscape brief,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019.
- [32] IRENA, “Innovation landscape brief: Market integration of distributed energy resources,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019.
- [33] IRENA “Innovation landscape brief: Renewable mini-grids,” International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi 2019.
- [34] Ercoenergía, “¿Puede Colombia liderar la revolución de la Energía P2P?,” Blog Virtual de Ercoenergía, <https://www.ercoenergia.com.co/blog/energia-p2p>. Nov, 2019.
- [35] Rescoop, “Q&A: What are ‘Citizen’ and ‘renewable’ energy communities?,” 2019.

- [36] Comisión de Regulación de Energía y gas-CREG. Resolución CREG 030 de 2018 por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional, (2018).
- [37] Comisión de Regulación de Energía y gas-CREG. Resolución 038 de 2018 por la cual se regula la actividad de autogeneración en las zonas no interconectadas y se dictan algunas disposiciones sobre la generación distribuida en las zonas no interconectadas. 2018.
- [38] Comisión de Regulación de Energía y gas-CREG. Resolución 098 de 2019 por la cual se definen los mecanismos para incorporar sistemas de almacenamiento con el propósito de mitigar inconvenientes presentados por la falta de suficiencia de redes de transporte de energía en el Sistema Interconectado Nacional (2019)
- [39] Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. Resolución 054 por la cual se ordena hacer público un proyecto de resolución “por la cual se adoptan medidas regulatorias para la comercialización de GLP de comisionamiento de la planta de estabilización de condensados de Cupiagua.” (2019).