

**MODELO DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA MICRO REDES
RESIDENCIALES EN EL MARCO DE LAS *SMART GRID* EN COLOMBIA**



Luis Daniel Baos Muñoz

Maria Virginia Guzmán Alarcón

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, julio de 2016

**MODELO DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA MICRO REDES
RESIDENCIALES EN EL MARCO DE LAS *SMART GRID* EN COLOMBIA**



Documento Final de Trabajo de Grado
Candidatura para el título,
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Luis Daniel Baos Muñoz
Maria Virginia Guzmán Alarcón

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Popayán, julio de 2016

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS	5
LISTADO DE TABLAS	6
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	7
1. GENERALIDADES.....	9
1.1. REDES INTELIGENTES.....	9
1.1.1. REDES INTELIGENTES EN EL MUNDO	9
1.1.2. REDES INTELIGENTES EN COLOMBIA	13
1.2. MODELO DE NEGOCIO DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO.....	18
1.3. ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA	22
1.3.1. LEY 1715 DE 2014 [38]	24
1.4. MICRO REDES.....	25
1.4.1. GENERACIÓN	28
1.4.2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	29
1.4.3. INVERSORES	31
1.4.4. MEDIDORES INTELIGENTES.....	32
1.4.5. CONTROL Y COMUNICACIÓN.....	32
1.5. ESTADO DEL ARTE	33
2. ESPECIFICACIONES DE LA MICRO RED	39
2.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE MICRO REDES.....	40
2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA UNA MICRO RED.....	41
2.2.1. EJEMPLOS COMERCIALES DE DISEÑO DE UNA MICRO RED	42
2.2.1.1. MICRO RED <i>GRIDZ</i> [90].....	42
2.2.1.2. MICRO RED <i>GRIDLOGIC</i> [92]	44
2.2.2. ESPECIFICACIONES DE MICRO RED COMPLETA	48
2.2.3. ESPECIFICACIONES MICRO RED REDUCIDA.....	54
3. MODELO DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	58
3.1. VARIABLES DE MODELOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	58
3.2. ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DE LA MICRO RED.....	62

3.3. VARIABLES DE LA MICRO RED.....	66
3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES ENTRADA.....	68
3.3.2. DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE DE SALIDA	70
3.4. FILTRADO DE LAS VARIABLES DE LA MICRO RED.....	73
3.5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES	74
3.6. REGLAS DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES	75
3.7. PREDICCIÓN DE MODOS Y REGLAS PRESENTADOS	80
3.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES.....	81
4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES	82
4.1. TIEMPO DE SIMULACIÓN	82
4.2. GRANULARIDAD DE LOS DATOS.....	83
4.3. VALORES DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES	83
4.3.1. VARIABLE CONSUMO DEL HOGAR	84
4.3.2. VARIABLE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	85
4.3.3. VARIABLE PRECIO DE ENERGÍA.....	85
4.3.4. VARIABLE CARGA DE LA BATERÍA	88
4.4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA.....	89
4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	91
4.5.1. COMPORTAMIENTO DE RADIACIÓN SOLAR	91
4.5.2. COMPORTAMIENTO VARIABLES DE ENTRADA (1 DÍA)	94
4.5.3. COMPORTAMIENTO VARIABLES DE SALIDA E INDICADORES (1 DÍA).....	96
4.5.4. SIMULACIÓN PARA UNA SEMANA	99
4.5.5. SIMULACIÓN PARA UN AÑO	102
4.6. REGLAS PRESENTADAS EN LA SIMULACIÓN	104
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	107
5.1. CONCLUSIONES.....	107
5.2. TRABAJOS FUTUROS.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	110

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Nuevo ambiente de negocio, sector eléctrico Colombiano.	16
Figura 2. Estructura de mercado del sector eléctrico colombiano.....	20
Figura 3. Estructura institucional del sector eléctrico colombiano.....	21
Figura 4. Ejemplo de micro red integrada con fuentes de energía renovable y microturbina de gas.	27
Figura 5. Curvas de generación de energía fotovoltaica según predicción de [76].	37
Figura 6. Comportamiento de la demanda según predicción de [76].	37
Figura 7. Consumo de energía eléctrica según estratos, para diferentes ciudades de Colombia.	39
Figura 8. Diagrama en bloques de la micro red Gridz de JLM Energy.....	44
Figura 9. Diagrama eléctrico de un Gridz de JLM Energy.....	44
Figura 10. Diagrama de arquitectura de la micro red GridLogic de SolarCity.	45
Figura 11. Configuración general del sistema Powerwall de Tesla Energy.....	51
Figura 12. Diagrama eléctrico de la micro red reducida.....	57
Figura 13. Entradas y salidas de los sistemas de toma de decisiones reportados.	59
Figura 14. Curvas explicativas de la variable consumo del hogar.	60
Figura 15. Diagrama eléctrico de la micro red propuesta con sistema de toma de decisiones.	71
Figura 16. Modos de la variable de salida configuración micro red del sistema. ...	72
Figura 17. Diagrama de flujo del sistema de toma de decisiones.	81
Figura 18. Comportamiento del consumo de energía en Colombia del año 2007.	84
Figura 19. Precio variable del mercado de energía de España y Portugal.	85
Figura 20. Circuito simplificado equivalente de la batería para la simulación.	88
Figura 21. Gráficas de radiación solar en Popayán, semana del 7 al 13 de septiembre de 2015.....	91
Figura 22. Comportamiento de las variables de entrada, día 1 (7 de septiembre de 2015).	95
Figura 23. Gráficas de las variables de salida del sistema, día 1 (7 de septiembre de 2015).	98
Figura 24. Resultados de simulación para la semana del 7 al 13 de septiembre de 2015.	101
Figura 25. Reglas presentadas en la simulación, día 1, 7 de septiembre de 2015.	105

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los principales tipos de micro redes.....	26
Tabla 2. Descripción de los tipos de sistemas de almacenamiento.	29
Tabla 3. Descripción de los módulos de la micro red GridLogic de SolarCity.	45
Tabla 4. Número de paneles requeridos para una micro red en Colombia, dividida por estratos.	49
Tabla 5. Especificaciones para la micro red modelo completo.	53
Tabla 6. Especificaciones de la micro red modelo reducido.	55
Tabla 7. Modos de operación como salida de los modelos de gestión de energía reportados.	63
Tabla 8. Variables de entrada del sistema de toma de decisiones propuesto.	66
Tabla 9. Variable de salida y estados para el sistema de toma de decisiones propuesto.	67
Tabla 10. Reglas con acrónimos del sistema de toma de decisiones.	78
Tabla 11. Descripción de las reglas del sistema de toma de decisiones.	78
Tabla 12. Valores de las variables de salida para la simulación del sistema de toma de decisiones.....	86
Tabla 13. Indicadores para la validación del sistema de toma de decisiones.	90
Tabla 14. Resultados de simulación para una semana (7 al 13 de septiembre de 2015).	100
Tabla 15. Resultados de simulación para el año 2015.....	102

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

A	Amperio.
AC	Corriente Alterna.
AEP	Potencia Eléctrica Americana (<i>American Electric Power</i>).
CAC	Comité Asesor de Comercialización.
CAES	Sistema de almacenamiento de aire comprimido (<i>Compressed Air Energy Storage</i>).
CO₂	Dióxido de carbono.
CNO	Consejo Nacional de Operación.
CSMEM	Comité de Seguimiento del Mercado de Energía Mayorista.
DC	Corriente Directa.
DER	Respuesta a la demanda eléctrica (<i>Demand Electric Response</i>).
ERDF	Red Francesa de distribución Eléctrica (<i>Électricité Réseau Distribution France</i>).
FEM	Foro Económico Mundial.
GW	Giga Vatios.
GREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas.
IEA	Agencia Internacional de Energía (<i>International Energy Agency</i>).
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
ISGAN	Red de Acción Internacional en Smart Grid (<i>International Smart Grid Action Network</i>).
kW	Kilo Vatio.
kWh	Kilo Vatios Hora.
MEM	Mercado de Energía Mayorista.
MinMinas	Ministerio de Minas y Energía.
PIB	Producto Interno Bruto.

SMES	Sistema de almacenamiento en Superconductores Magnéticos (<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>).
SSP	Superintendencia de Servicios Públicos.
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación.
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética.
WEC	Consejo Mundial de la Energía (<i>World Energy Council</i>).
Xm	Compañía Expertos en Mercados.
\$	Pesos Colombianos.
€	Euros.

1. GENERALIDADES

Se presenta la temática de redes inteligentes, abarcando aspectos generales de desarrollo, investigación, proyectos y normativas, según reportes nacionales e internacionales. Se presenta el modelo de negocio en el sector eléctrico colombiano, el estudio de eficiencia energética y energías renovables en el país. Se realiza una introducción a las micro redes y finalmente a través de un mapeo sistemático se muestran las alternativas o soluciones que existen en los diferentes modelos de gestión de energía eléctrica reportados.

1.1. REDES INTELIGENTES

A nivel mundial el despliegue de *smart grid* se hace imprescindible debido a las nuevas ideas ambientalistas que buscan la reducción de los niveles de contaminación en todos los aspectos, las redes inteligentes implican nuevas capacidades de control y comunicaciones, fuentes de energía renovables, modelos de generación y estructuras regulatorias. El desarrollo exitoso de estas redes demandará colaboración, integración e interoperabilidad interdisciplinar, incluyendo sistemas de control, comunicación y computacionales, para el correcto funcionamiento de las áreas de generación, transmisión, distribución y mercado de energía [1]. Las redes inteligentes buscan aprovechar los recursos energéticos, de esta manera integran detección avanzada, funciones de control y comunicación en la operación de la red eléctrica, con el propósito de mejorar la eficiencia, fiabilidad, seguridad y la reducción de emisiones de dióxido de carbono [2]. Estas redes inteligentes tienen como objetivo aumentar la eficiencia energética mediante la integración de energías renovables a la red tradicional, empleo de gestión de la demanda y mediante la adopción de técnicas, reducir las pérdidas de las líneas [3].

Uno de los objetivos de este proyecto es mejorar la seguridad, disminuir los costos del usuario final y los impactos ambientales, mientras se maximiza la fiabilidad, resistencia y estabilidad del sistema. Muchas regiones ya han empezado a modernizar su sistema eléctrico, con grandes inversiones y programas de planificación. Promoviendo de esta manera el ahorro y la eficiencia energética con un desarrollo económico ambiental sostenible; las redes inteligentes han evolucionado a ritmos diferentes en una variedad de entornos alrededor del mundo [4].

1.1.1. REDES INTELIGENTES EN EL MUNDO

Agencias y organizaciones internacionales son las encargadas de dirigir los diferentes avances y proyectos energéticos con diversos propósitos. El tema en

común de estas entidades es *smart grid*, anualmente analizan y exponen al público todo tipo de datos e índices, sobre el consumo, mejoramiento, reducción de emisiones de dióxido de carbono, entre otros, de las redes inteligentes.

La Agencia Internacional de Energía (IEA), busca integrar la seguridad y sostenibilidad en todos los aspectos concernientes al uso y generación de energía, cuenta con 29 países miembros, los cuales invierten en investigación y desarrollo de proyectos para alcanzar una construcción sostenible de la estructura energética en cada país. Estos países utilizan las redes inteligentes para lograr la sostenibilidad, estos son: Australia, Dinamarca, Francia, Alemania, España y también otros países europeos, Canadá y Estados Unidos representantes de América y finalmente en representación de Asia y Oceanía están Japón, República de Corea y Nueva Zelanda [5].

Existe ISGAN referente a la Agencia Internacional de Energía, al implementar acuerdos para programas de cooperación en *smart grid*. ISGAN creó un mecanismo de colaboración bilateral de gobierno a gobierno, para el avance del desarrollo e implementación de las redes tecnologías inteligentes. ISGAN tiene como objetivo mejorar el entendimiento de las tecnologías de *smart grid*, su práctica y sus sistemas, como también promueve la adopción de nuevas políticas gubernamentales acordes a las redes inteligentes.

ISGAN se puso en marcha como la Red de Acción Internacional en Smart Grid, al realizarse una reunión internacional entre ministros y partes interesadas de energía y medio ambiente de 23 países junto con la unión Europea, con el fin de establecer políticas y programas para lograr una transición hacia energías más limpias, enfocándose así en cinco áreas principales: (1) políticas de estandarización y regulación, (2) finanzas y modelos de negocio, (3) desarrollo de tecnología de los sistemas, (4) grupos de trabajo para obtención de habilidades y conocimientos, finalmente (5) compromiso de usuarios y consumidores [6].

Para realizar un análisis de la situación actual en el mundo con respecto a la implementación y desarrollo en *smart grid*, cada año se realizan reportes que arrojan los resultados, tras inversiones e investigaciones en las respectivas temáticas. En el mundo existen 30 proyectos representativos para el desarrollo de *smart grid*, representando 24 millones de usuarios en 16 países en 5 continentes diferentes, pero son 11 proyectos los cuales representan al continente europeo y tan solo el 1 % del total de los usuarios, lo que demuestra la gran escala de los proyectos en Norteamérica y Asia. Estados Unidos cuenta con cerca del 69 % de los 24 millones de usuarios involucrados en los proyectos, mientras que Asia abarca el 30 % y el resto de continentes tan solo 1% [7].

Estados Unidos cuenta actualmente con tres importantes proyectos que involucran el desarrollo e implementación de redes *smart grid*, el primero desarrollado por la empresa eléctrica AEP (American Electric Power), busca crear un sistema de comunicación bidireccional entre la empresa y el consumidor, durante el proceso del proyecto se debió adecuar la red tradicional, mediante el cambio de medidores inteligentes y con una inversión total de cerca de 149 millones de dólares. El segundo proyecto denominado “Pacific Northwest Division Smart Grid Demonstration Project” realizado por el Battelle Memorial Institute con una inversión de 178 millones de dólares busca validar las nuevas tecnologías en cuanto a generación distribuida, almacenamiento y manejo activo de la demanda, a la vez que crea nuevos modelos de negocio para el nuevo tipo de *smart grid* [8]. El tercer y último proyecto de 330 millones de dólares de inversión, denominado “Smart Grid Project” intenta integrar, las mejoras en cuanto a distribución, transmisión y gestión del sistema. Automatizando la mayor parte de los elementos de distribución del sistema y dotando a las sub-estaciones de nuevos y mejores equipos, para que la selección de las líneas de transmisión sea automática [9].

Esto demuestra la importancia dada por Estados Unidos hacia la implementación de *smart grid*. A su vez genera indicadores favorables, para el año 2015 se registraron índices altos en cuanto a reducción de emisiones de CO₂, como también mejores aspectos en planeación, análisis, predicción, gestión, monitoreo y control de las redes inteligentes implementadas. Esto en conjunto tiene un impacto socioeconómico favorable sobre los usuarios finales.

Europa por su parte, cuenta con una comunidad de 27 países que trabajan para establecer normas de trabajo a nivel macro, para permitir el libre desarrollo y uso de *smart grid*, la expectativa es colocar sus indicadores a nivel de los de Estados Unidos o Asia. Los miembros de la unión europea suman esfuerzos para llevar a cabo el denominado “REScoop 20/20/20” para el año 2020 [10], en el cual buscan un 20 % de eficiencia energética, promover las energías renovables hasta un 20 % y un 20 % de reducción de gases de efecto invernadero, sin embargo los índices de producción de CO₂ en Europa disminuyen paulatinamente. Estos esfuerzos tienen países destacados como Dinamarca, que cuenta con una empresa que ha establecido una infraestructura con base en *smart grid*, alrededor del 30 % de la electricidad de todo el país es generada mediante turbinas eólicas [11], lo que ubica a Dinamarca como el mayor productor de energía de este tipo, a su vez para el año 2025 se espera aumentar la generación de energía eólica hasta el 50 % de generación total del país.

En Francia por su parte, se desarrolla el proyecto GreenLys realizado por ERDF (Électricité Réseau Distribution France), este es un proyecto sistemático de red inteligente que incluye: respuesta a la demanda eléctrica (DER), consumo y

utilización de *smart grid*. El objetivo es reducir la cantidad de gases invernaderos, controlar el costo de la factura eléctrica, introducir y permitir el control DER, y finalmente aplicar los aspectos fundamentales de una *smart grid* (auto sostenibilidad, medición inteligente mediante la red ya estructurada, etc.) [12].

El continente asiático tiene tres grandes representantes interesados en el desarrollo de redes inteligentes, China, Japón y Corea son los países líderes, los cuales registran mejores índices comparados con Norteamérica en cuanto a integración de la matriz energética en Asia. También se tienen buenos niveles de voltaje presente en la fiabilidad del sistema eléctrico, bajos niveles de pérdidas en transmisión y poca constancia de interrupciones del sistema. La reducción de los niveles de emisión de CO₂ por parte del continente asiático son los más altos y de mayor impacto positivo.

El Gobierno chino aplica estímulos de inversión a largo plazo (se estima que se invertirán 96 billones de dólares para el año 2020), para la construcción de infraestructuras rurales, sistemas hidráulicos e investigaciones sustanciales en *smart grid* [4]. De esta forma en China una *smart grid* es tomada como una forma para reducir el consumo de energía, aumentar su eficiencia y gestionar la generación eléctrica. Por otra parte, la Federación de Compañías de Potencia Eléctrica de Japón, desarrolla una *smart grid* incorporando la generación fotovoltaica para el 2020 con una inversión por parte del gobierno de 100 millones de dólares, el mismo gobierno ha anunciado la iniciativa de medición inteligente nacional y programas *smart grid*. En Corea el gobierno lanzó un proyecto en la isla de Jeju, con el fin de implementar una *smart grid* para suplir y optimizar la demanda, mediante tecnología de comunicación bidireccional entre consumidores y proveedores [13].

En Oceanía, Australia invirtió cerca de 100 millones de dólares en el programa denominado *Smart Grid, Smart City*. Ya que este programa inició en el año 2009, los indicadores de reducción de gases, el aplanamiento de la curva de la demanda y la reducción de consumo tienen indicadores notables, en ocasiones superando a Europa y Estados Unidos [14].

Al realizar una recapitulación de las principales ideas y proyectos concernientes a *smart grid* alrededor del mundo, se observa que muchas de las tecnologías de este tipo de redes se encuentran disponibles para mejorar el rendimiento de las redes y permitir una alta introducción a los niveles de energía renovables. Además, la instalación de las redes inteligentes lleva a un aumento en la relación costo-beneficio y permite mejoras en todas las actividades de la cadena de energía [15]. Es cierto que agrada mucho la implementación de estas redes, ya que suplen los problemas de abastecimiento energético a través de una red

completamente integrada, las emisiones de carbón disminuyen notoriamente, mejoras en la regulación del mercado y se acotan los precios de la energía. Sin embargo aún quedan muchos aspectos a tener en cuenta para mejorar y desarrollar mayores beneficios tanto a los consumidores como a todos actores involucrados en el mercado energético mundial [16].

1.1.2. REDES INTELIGENTES EN COLOMBIA

El propósito de las redes inteligentes en el mundo, es generar un retorno rápido en beneficio del consumidor final, bien sea en servicios, tarifas, calidad y/o en continuidad del suministro. A través del uso de este sistema de energía sostenible, se busca reducir los cortes de electricidad y disminuir la vulnerabilidad de las redes ante daños o ataques, realizando las funciones de detección, aislamiento de las fallas y reconfiguración de la red de distribución, para llegar a minimizar el número de clientes afectados y la vulnerabilidad de las redes de transmisión [17].

El crecimiento de la tecnología junto con la búsqueda de la mejora en la prestación del servicio eléctrico, han impulsado a la evolución del sistema eléctrico como tal. Las tecnologías a implementar pueden diferir de un país a otro, de acuerdo a las necesidades y expectativas que tenga cada uno de ellos. Con el ánimo de identificar las necesidades y expectativas propias en Colombia que impulsen el despliegue de la tecnología de redes inteligentes y así mismo, ayuden a seleccionar los medidores inteligentes acorde a cada necesidad, se han realizado una serie de reflexiones por parte del Comité de Seguimiento del Mercado de Energía Mayorista (CSMEM), el cual presenta mensualmente los análisis de desempeño del Mercado de Energía Mayorista (MEM), donde se cuestiona en particular si Colombia debería tomar medidas similares a las implementadas por Europa y Estados Unidos, en un contexto diferente [18].

Aunque en el sistema colombiano ha habido una reducción importante de las pérdidas eléctricas, aún existe un margen considerable para reducirlas, principalmente en los sistemas de distribución. Por lo anterior, un aspecto de gran importancia en el desarrollo de las redes inteligentes en Colombia está relacionado con la necesidad de mejorar la eficiencia energética y reducir las pérdidas técnicas y no técnicas. De esta manera se encuentra en primera instancia el nacimiento de las redes inteligentes para Colombia [18].

Los sistemas de distribución en Colombia se han caracterizado por poseer pérdidas eléctricas significativas, dentro de las cuales se encuentran las pérdidas no técnicas, asociadas con el fraude de energía o las conexiones ilegales por parte del usuario. Estos sistemas se han visto afectados por el robo de energía e

incluso por el hurto de algunos elementos de la infraestructura de servicios públicos como medidores de energía, cables de energía, lámparas de alumbrado público, transformadores de potencia, entre otros. Esta situación no sólo genera importantes pérdidas para las empresas prestadoras de servicios públicos sino que también afecta la prestación del servicio y, por ende, al usuario. Además, la calidad de vida de la población se ve deteriorada en eventos concretos tales como la privación del servicio y riesgos de cualquier tipo de accidente [19].

De esta manera se realiza la introducción a las redes inteligentes para detectar la manipulación de un medidor, detectando situaciones anormales dentro de un hogar. Ante la automatización de los sistemas de distribución eléctricos, con los que se ejerce el control y la supervisión en tiempo real del sistema eléctrico, se ha hecho necesaria la sustitución de los medidores de energía convencionales por los “medidores inteligentes”, pues los primeros carecen de funciones que permitan transmitir frecuentemente información de la energía consumida por el usuario, así como la tensión, corriente, factor de potencia, frecuencia, entre otras variables que pueden ser de interés. Además, los medidores convencionales no cuentan con la detección y notificación automática de fallas, así que ante una interrupción en el suministro de energía, el usuario requiere comunicarse con la empresa prestadora del servicio. Esto implica que no existe una comunicación en tiempo real entre el usuario y la red eléctrica, aumentando así el tiempo de respuesta de la red y dificultando el control del sistema eléctrico [20].

Como pilotos de medidores inteligentes se tienen las empresas colombianas Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P (EPSA), Electrificadora del Caribe (ELECTRICARIBE), Empresas Municipales de Cali (EMCALI), Empresas públicas de Medellín (EPM), Empresa de Energía de Bogotá (CODENSA) y Electrificadora de Santander S.A. (ESSA), entre otras, las cuales han realizado despliegues iniciales con diferentes niveles de desarrollo de infraestructura de medición avanzada que han logrado buenos resultados en reducción de pérdidas de energía (y consecuentemente de emisiones de dióxido de carbono), además de la adopción de modelos que aseguran la interoperabilidad de tecnologías y sistemas de información. Igualmente han trabajado en el desarrollo de soluciones virtuales para los clientes y exploración de alternativas de vehículos eléctricos y de generación distribuida a partir de energía solar para clientes finales, siempre con énfasis en eficiencia energética [21].

A los visionarios del sector eléctrico colombiano los ha impulsado durante la última década el propósito que Colombia se consolide como el proveedor y operador de energía eléctrica del continente y como el referente latinoamericano en generación limpia, movilidad eléctrica, además de productividad y calidad. Empezando en el

2010 con el objetivo de hacer uso de sistemas de energía inteligentes y eficientes, permitiendo integrarlos como parte del sector colombiano y buscando para el 2030 una cultura energética en el país orientada a sistemas amigables con el medio ambiente de una manera más notoria [22]. La proyección nacional está orientada a que el país se convierta en protagonista de una revolución en el uso de la electricidad, que le permita alcanzar altos consumos per cápita de consumo eficiente de energía eléctrica que posibiliten altos niveles de competitividad industrial. La investigación y despliegues innovadores en *smart grid* son el medio para acelerar el logro de estos propósitos en Colombia [23]. Es por esto que nace como iniciativa el proyecto nacional “Colombia Inteligente” que tiene como objetivo desarrollar prácticas en el sector eléctrico relacionadas con eficiencia energética y tecnología buscando beneficios al país.

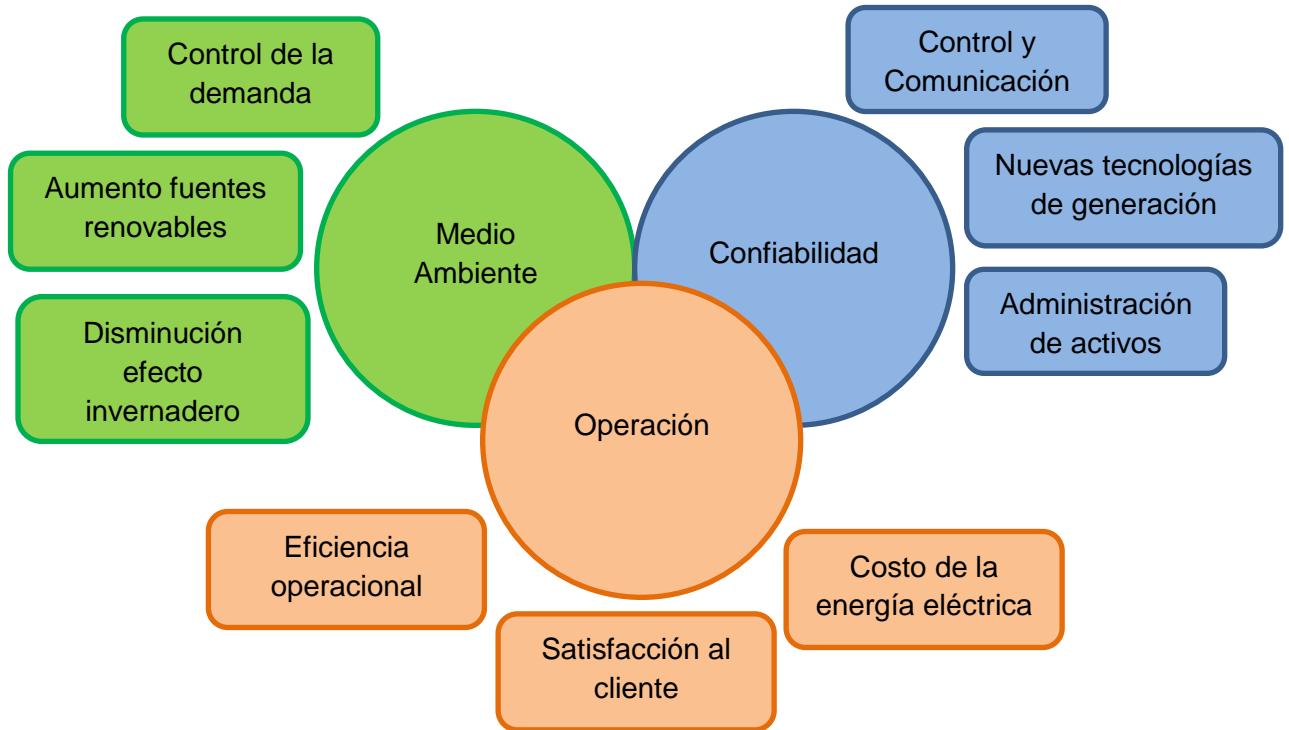
Colombia Inteligente, como iniciativa sectorial, se formuló como un foro de discusión amplio que promueve la búsqueda de soluciones de redes inteligentes para toda la cadena, desde la generación hasta el consumidor final, basadas en la búsqueda de nuevas herramientas y propuestas tecnológicas que superen los beneficios de las tecnologías convencionales [24]. Se evidencia el compromiso de Colombia con un programa de energía sostenible, donde todos los sectores utilizan de manera eficiente los recursos energéticos preservando el medio ambiente. Esto en concordancia con las políticas, estrategias, planes, acciones y servicios que integren diferentes fuentes de energía, redes eléctricas, tecnologías de información y comunicaciones con una participación activa de la demanda.

En Colombia se crea un nuevo ambiente de negocio donde se realiza el modelo que busca integrar con las redes inteligentes, muestra los parámetros más globales a tener en cuenta, que son el medio ambiente, la confiabilidad y la operación. Donde en el sector ambiental al realizar un control de la demanda se reduce la energía que se debe producir, se reduce también la utilización de fuentes de energía no limpias, a su vez se emplean más fuentes de energía renovable, haciendo una disminución del efecto invernadero. En cuanto a confiabilidad las redes inteligentes buscan realizar mayor comunicación entre sus componentes, controlando cada actividad de manera adecuada, con nuevas tecnologías y de esta manera lograr una red más segura. Finalmente, en el área de operación se busca la eficiencia, reduciendo el costo de la energía eléctrica para una satisfacción del usuario final. Con las redes inteligentes en Colombia se busca la integración de nuevas tecnologías y la descentralización de las actividades del sector energético (ver figura 1) [22].

La red eléctrica debe estar preparada para la introducción de nuevas cargas, ya que se hace más evidente la utilización de nuevos tipos de demanda, como carros eléctricos híbridos recargables (PHEV) donde se incrementa el consumo de

energía y se requiere de la implementación de redes inteligentes con el fin conjunto de reducir las emisiones contaminantes [25].

Figura 1. Nuevo ambiente de negocio, sector eléctrico Colombiano.



Fuente: Modificada de [22], noviembre de 2015.

Entre los proyectos desarrollados, universidades como la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), la Universidad Nacional y la Universidad de los Andes, en conjunto con empresas como CODENSA han desarrollado micro redes inteligentes que se han convertido en laboratorios para la evaluación de aplicaciones de generación distribuida y almacenamiento de energía, respuesta de la demanda, eficiencia energética, medición avanzada e integración de vehículos eléctricos [23].

La energía colombiana es de las más limpias del mundo según el mismo World Energy Council (WEC), sin embargo no aprovecha de manera correcta todas las características con las que cuenta (recursos naturales), debido a esto se debe destinar un mayor tiempo al estudio y desarrollo de las redes inteligentes. Una ciudad o territorio puede ser calificado como sostenible en la medida que las inversiones que se realicen en la gente, en infraestructura de energía, TIC y en los sistemas de transporte y movilidad, logren una calidad de vida elevada, un desarrollo económico-ambiental sostenible y una gobernanza participativa.

Además del aseguramiento de la sostenibilidad de las ciudades, las tecnologías *smart grid* son una alternativa para asegurar el suministro de electricidad en el largo plazo. En el sector de generación, por ejemplo, se han visto múltiples dificultades para el desarrollo de proyectos, sobre todo por restricciones de origen ambiental y social. En este sentido, las tecnologías de las redes inteligentes, pueden posibilitar proyectos grandes de generación con otras fuentes, prestando especial consideración a las energías limpias según el potencial energético además de la vocación productiva en cada región del país. Otras tecnologías, pueden ser opciones costo-efectivas para mitigar los riesgos económicos, ambientales, sociales y prediales que los actores del mercado eléctrico colombiano han empezado a percibir con respecto a los proyectos de transmisión que actualmente están en desarrollo o por iniciarse [26].

Las tecnologías *smart grid* también tienen un papel muy importante en los esquemas de suministro de electricidad en comunidades vulnerables o aisladas en Colombia [23]. En este caso se deben desarrollar pilotos para plantear nuevos modelos sostenibles de negocio y no tan solo para probar, adaptar y apropiar tecnologías. En este sentido lo importante no es solo el acceso mismo a la electricidad, sino a aplicaciones productivas que utilicen o se mejoren por contar con electricidad gracias a una red inteligente. Es muy importante la educación y consideración de las heterogeneidades de los usuarios finales, además de la socialización masiva de beneficios y el involucramiento de la comunidad en el mismo diseño de la red como en su modelo de negocio.

Es urgente que en Colombia se inicie la discusión sobre la consideración de activos *smart grid*, que agregan valor a toda la cadena de suministro de electricidad y que abren nuevas posibilidades y mejoras en la eficiencia y el costo de la energía, reduciendo el impacto ambiental. Las tecnologías de *smart grid* son la clave para el logro de mayores niveles de eficiencia energética en la industria y hogares, habilitando lo que se ha denominado “consumo inteligente”, esto es, ajuste y balanceo de carga, nivelación de picos de consumo, motivado mediante tarifas por tiempo de uso para el consumidor [23].

En Colombia, se vienen desarrollando estas tecnologías y son importantes los esfuerzos que han realizado las entidades públicas y privadas del sector eléctrico colombiano, pero aún son discretos. Aunque se dispone de leyes, decretos, resoluciones, estudios, desarrollo de proyectos pilotos, iniciativas y experiencias puntuales, aún no hay lineamientos, estrategias, ni definición de criterios específicos para establecer prioridades estratégicas para el país. No basta con incorporar nuevas tecnologías y expedir la norma, se requiere también de un programa de carácter nacional que adopte y/o ajuste el marco normativo y legal,

que articule y/o reoriente la experiencia de los últimos años, defina estrategias claras, responsables y prioridades para la ejecución de programas, proyectos y acciones de impacto guiados hacia los ciudadanos, para cumplir los objetivos propuestos por Colombia en el sector eléctrico nacional [27].

1.2. MODELO DE NEGOCIO DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO

Las tarifas de la energía en Colombia no son las más altas en comparación con otros países como sugieren algunos, ni tan bajas como lo desearían otros. Se tiene que contextualizar la problemática de la formación de las tarifas y los precios de la energía en Colombia [28], para esto se analizan los componentes de la estructura de mercado del sector eléctrico colombiano, se entiende la forma de facturación del costo unitario de la energía consumida y las instituciones influyentes del sector eléctrico en Colombia.

En Colombia las leyes 142 y 143 de 1994 marcan una diferencia entre la historia y la actualidad del servicio público de energía, las cuales recogen las lecciones aprendidas debido a los 14 meses de racionamiento del servicio de energía eléctrica en el territorio nacional, representando un total de punto y medio del Producto Interno Bruto (PIB) a la economía nacional. Hasta entonces la prestación de este servicio era exclusivo del estado y las tarifas que se cobraban eran administradas por este, primando el criterio político, a partir de la entrada en vigencia la Ley Eléctrica quedó establecido que la prestación de este servicio se rige por los principios de “eficiencia, calidad, continuidad, adaptabilidad, neutralidad, solidaridad y equidad”. Con la nueva Constitución Política de 1991 y estas leyes que la desarrollaron se estableció una nueva arquitectura institucional, en la cual la iniciativa privada tiene un amplio campo de acción en toda la cadena, desde la generación hasta su distribución [29].

La unión entre el sector público y privado ha permitido que el país cuente con un sistema de energía robusto que le ha garantizado a Colombia confiabilidad y firmeza en la prestación del servicio. Durante los últimos 20 años de vigencia de este nuevo modelo se han registrado tres episodios del fenómeno del Niño, el mismo que colapsó el sistema eléctrico entre 1992 y 1993, sin que se tuviera que racionar la prestación del servicio, como sí ocurrió en otros países de la región. En gran medida ello se debe al cargo por confiabilidad, un seguro que ha hecho posible la ejecución de los proyectos contemplados en el plan de expansión eléctrica. Gracias a este cargo, el país cuenta con una capacidad instalada de generación que supera los 14.4 GW de potencia (69.9% hidráulica, 29.7% térmica) [30]. Sin embargo a inicios del año 2016 se presentó otra vez un fenómeno del Niño, y junto a un daño en una de las hidroeléctricas más importantes del país,

Colombia se vio al borde de un nuevo racionamiento de energía, esto debido a que en los momentos pico de demanda no se disponía de la potencia necesaria, a pesar de los esfuerzos del sector eléctrico y el propósito del cargo de confiabilidad, la única solución fue el ahorro energético por parte de los hogares y empresas en un 5 %, generando mejores hábitos de consumo de energía [31].

Todas las mejoras de los últimos años en el sector eléctrico Colombiano, llevan a catalogarlo en el índice de desempeño de las arquitecturas energéticas del Foro Económico Mundial (FEM) en el puesto 7 entre 124 países evaluados y según el índice de sostenibilidad energética del World Energy Council, ocupa el puesto 24 entre 129. Colombia ha mejorado sucesivamente su seguridad y equidad energética, manteniendo una apropiada sostenibilidad ambiental, siendo un país que produce la mayor parte de su energía a través del agua, de esta manera se tiene ventajas al ser una fuente renovable, de alto rendimiento energético y al ser una energía limpia no produce emisiones tóxicas, el problema en construcciones tan grandes para una hidroeléctrica pueden inundar importantes extensiones de terreno, cambiar los ecosistemas o modificar el caudal de los ríos. Cuando se presenta el fenómeno del Niño, los recursos disminuyen significativamente, causando aumento en el costo de la energía del país y daño ambiental, por las fuentes de energía que deben ser utilizadas [28].

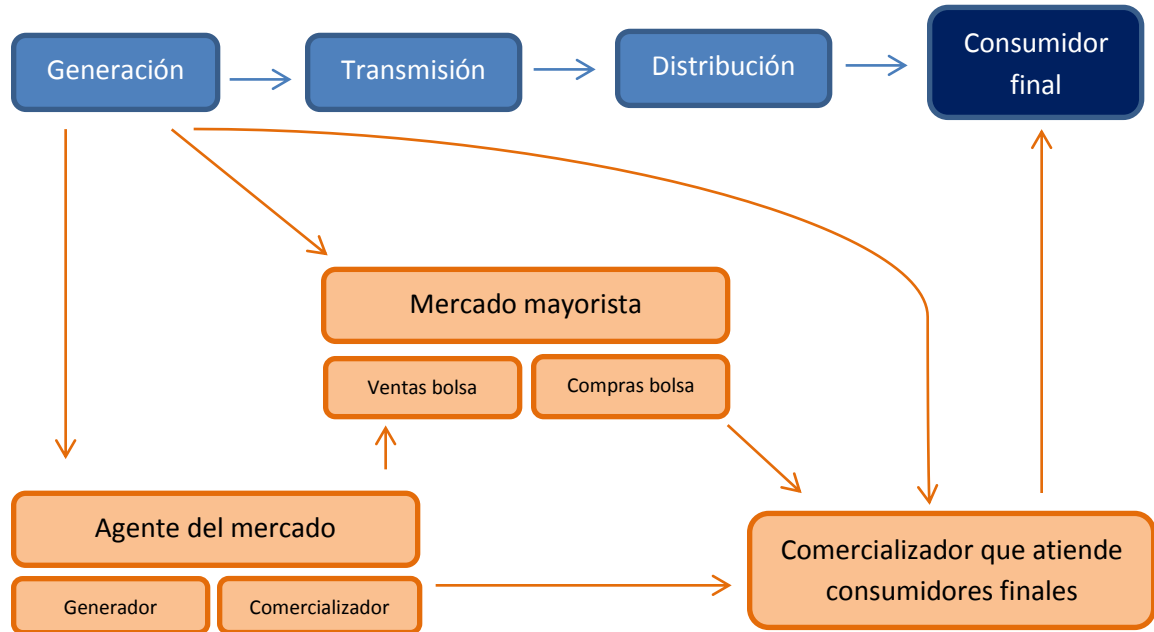
Con el fin que el sector funcione y se desarrolle de la mejor forma posible, se tiene un esquema que involucra a las entidades que producen la energía, las que la transportan, las que la venden, las que coordinan a todas las anteriores, las que establecen las políticas generales, las que hacen las normas y las que vigilan que todos cumplan las normas existentes [32] (ver figura 3). La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) tiene como objetivo entregar productos de buena calidad a un precio razonable para los usuarios finales, es por esto que tiene como función fijar las normas que deben seguir las empresas de servicios públicos [33].

En este nuevo esquema el precio de la energía se forma en un mercado abierto en el que interactúan diversas variables, entre ellas el comportamiento de la hidrología, la cual es muy cambiante ya que depende del clima, que determina a su vez la composición de la energía ofertada, ya sea aquella de origen hídrico y la que tiene origen térmico, siendo esta última más costosa. La energía eléctrica se transa a través del mercado mayorista, mediante contratos bilaterales de compraventa entre oferentes y demandantes a través de los cuales se fija el precio de la energía [28].

Para la formación del precio de energía en Colombia, se aprueba la fórmula tarifaria general mediante la resolución 119 de 2007 de la CREG, la cual permite a

los comercializadores minoristas de electricidad establecer los costos de prestación del servicio a usuarios regulados en el sistema interconectado nacional. El costo unitario de prestación del servicio consta de un componente variable de acuerdo al nivel de consumo, expresado en kWh y un componente fijo, expresado en pesos colombianos, según se indica en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, donde el costo unitario total corresponde a la suma de los costos eficientes de cada una de las actividades de cadena eléctrica (ver figura 2).

Figura 2. Estructura de mercado del sector eléctrico colombiano.



Fuente: Modificada de [34], noviembre de 2015.

$$CUv_{n,m,i,j} = G_{m,i,j} + T_m + D_{n,m} + Cv_{m,i,j} + PR_{n,m,i,j} + R_{m,i} \quad (1)$$

$$CUf_{m,j} = Cf_{m,j} \quad (2)$$

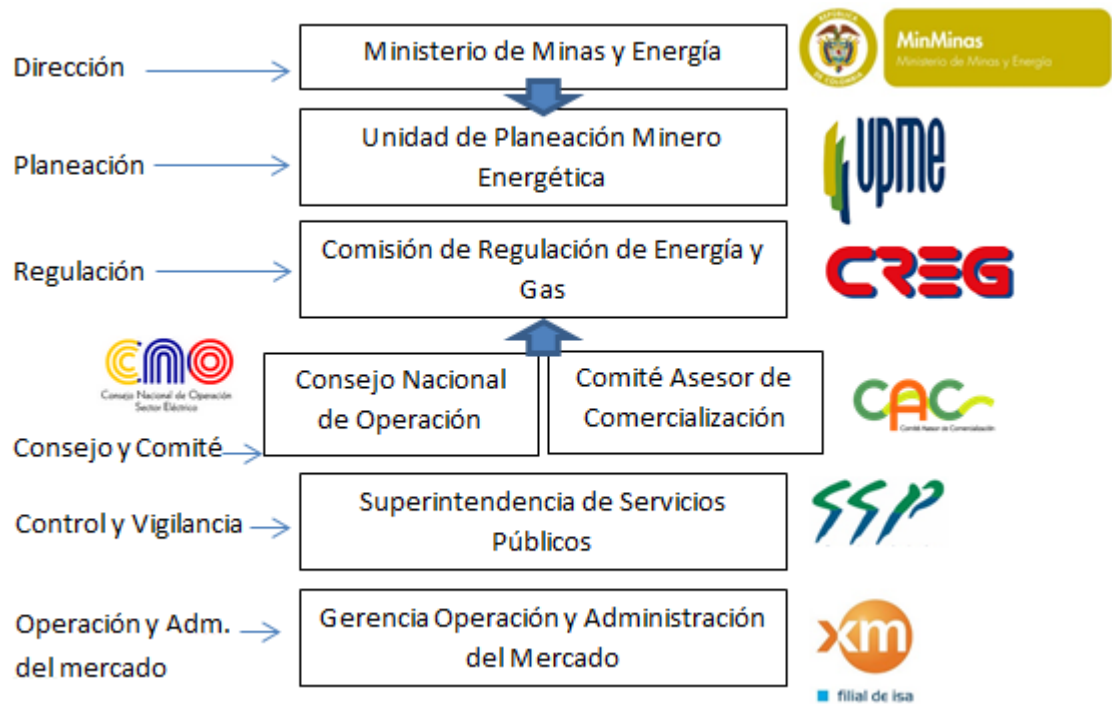
Dónde los subíndices corresponden n al nivel de tensión de conexión del usuario, m es el mes para el cual se calcula el Costo Unitario de Prestación del Servicio, i el Comercializador Minorista y j es el Mercado de Comercialización.

En la fórmula tarifaria se tiene, el costo unitario (CU) que es el valor de la factura que recibe el usuario final, junto con el componente de la generación (G), contempla también el costo de la transmisión (T), el costo por uso de los sistemas de distribución (D), el de la comercialización (Cv), el de las pérdidas reconocidas (PR) y el de las restricciones (R) [35]. Se recomienda leer el Anexo Digital A (RESOLUCIÓN No. 119 DE 2007 DE LA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE

ENERGÍA Y GAS) para mayor nivel de detalle de la formación del precio de la energía eléctrica en Colombia.

De los componentes de la fórmula, el de mayor variabilidad del CU , tanto para el mercado regulado, comprendido básicamente por los usuarios residenciales, como para el no regulado, los grandes consumidores, es el componente de la generación (G). No obstante, mientras que en el mercado no regulado el precio de generación es el promedio de los contratos de largo plazo, en el mercado regulado el factor G depende no sólo del precio de los contratos de largo plazo sino también del precio en bolsa (spot), ya que cuando se acaba el contrato y es necesario comprar energía desde la bolsa [28].

Figura 3. Estructura institucional del sector eléctrico colombiano.



Fuente: De los autores, Diciembre de 2015.

En el caso de la generación en Colombia, el 70 % de la producción se realiza a través de hidroeléctricas donde el costo de la energía es bajo de \$40 pesos el kWh, el problema radica en el momento que se debe recurrir al mercado *spot* [36]. Cuando se analiza el comportamiento del precio de la energía en bolsa, en el intervalo entre 2010 y 2015 el precio *spot* osciló entre los \$150 y \$200 pesos por kWh, “El precio de la electricidad para el mercado regulado se ha mantenido relativamente estable entre 2011 – 2015, en las vecindades de \$135 pesos”. Es así como el precio de la energía vendida en contratos de largo plazo para este mercado pasó de un menor valor por kWh en 2010 a un valor mayor en 2013, para

luego reducirse en el año 2015, pero esto solo es atribuible en gran medida a la acelerada devaluación del peso con respecto al dólar [28].

Durante un periodo invernal el precio cayó por debajo de los \$100 y se mantuvo en estos niveles todo el año 2011. Pero, desde enero de 2012 dicha tendencia se revirtió y empezó a aumentar el precio hasta alcanzar el máximo valor entre mayo y junio de 2014 superando el límite de los \$200 pesos el kWh. Hacia julio de 2014 descendió nuevamente hasta situarse en diciembre de 2015 en el rango \$160 y \$200 pesos el kWh, lo cual sigue siendo relativamente alto, explicable porque desde el año 2014 viene rondando de nuevo el fantasma del fenómeno del Niño. Todo esto llevó a aumentar la participación de la generación térmica, al punto que entre abril y junio de ese año esta llegó a representar el 35 %. Justamente para evitar este tipo de presiones sobre el precio, hacia el futuro el sector eléctrico se dispone a garantizarles a los particulares la disponibilidad de energía y se crea el cargo por confiabilidad, haciendo más costosa la facturación de la energía [28].

Gestión de la demanda se entiende como el conjunto de estrategias encaminadas a modificar los patrones de consumo de energía en el usuario final, tanto en el tiempo de uso como en la magnitud del cargo, con el propósito de mejorar diferentes aspectos del sistema de energía de Colombia [37], de esta manera se busca la respuesta a la demanda en el sector eléctrico colombiano aplicando RTP (Real Time Price), lo cual consiste en cambios en el consumo de energía eléctrica por parte del usuario final, con respecto a un patrón usual, en respuesta a señales de precios o incentivos variables con el tiempo, donde la tarifa del consumidor depende del momento en que consume la energía [38]. En esta sección se describe el modelo de negocio del sector energético colombiano actual y el plan que se tiene a futuro, en busca del mejor beneficio posible para el usuario final, teniendo en cuenta también a los operadores o proveedores del servicio eléctrico.

1.3. ENERGÍA RENOVABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

La energía limpia se ha venido desarrollando de manera exponencial durante los últimos años alrededor del mundo, y en años próximos se espera una mayor expansión del mercado energético [39]. La energía renovable es la energía que se obtiene de fuentes naturales, las cuales se pueden reponer constantemente. La producción renovable de fuentes de energía tiene su relevancia en el impacto ecológico, al tener fuentes de bajo impacto ecológico reemplaza industrias como la carbonífera o petrolera. Entre los tipos de tecnología renovable se encuentra la energía solar, del viento, geotermal, hidropónica, bioenergía, entre otras [40].

La energía solar se convierte en energía térmica o eléctrica, el sol es la fuente de energía más limpia y abundante disponible. La tecnología puede aprovechar esta

energía para una variedad de aplicaciones, incluyendo la generación de electricidad, proporcionando luz y calentamiento de agua para el uso doméstico o industrial. La energía solar es flexible, las plantas de poder pueden ser construidas para generación distribuida o centralizada a diferentes escalas [41].

La aplicación más común de la energía solar, es la utilización de paneles fotovoltaicos que convierten la luz del sol en electricidad haciendo uso de semiconductores. Cuando la luz solar es absorbida por estos materiales, la energía solar elimina los electrones sueltos de sus átomos, permitiendo que los electrones fluyan a través del material para producir electricidad [42]. Haciendo uso de las energías renovables se busca maximizar los beneficios en todos los campos del sector eléctrico y reducir los costos, de esta manera se introduce a una eficiencia de la energía.

La eficiencia energética se entiende como la relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, que busca ser maximizada a través de buenas prácticas con la inclusión de nueva tecnológica o sustitución de fuentes de energía no renovables. A través de la eficiencia energética se busca obtener el mayor provecho de la energía, durante cualquier actividad de producción, transformación, transporte, distribución o consumo de las diferentes formas de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre el ambiente y los recursos naturales renovables [38].

Hoy en día se proponen acciones con una fuerte tendencia a hacer un uso más eficiente de la energía, dado que el costo de esta no se reduce a su precio, sino que la factura del servicio depende de las buenas prácticas por parte del consumidor, sea este industrial, comercial o domiciliario. En respuesta a tales recomendaciones, al expedirse la Ley 1715 de 2014, además de “promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía”, buscando contar con un sistema energético más sostenible ambientalmente, se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la gestión de la demanda. De esta manera se da paso a la reglamentación empleando la ley previamente mencionada permitiendo que autogeneradores y cogeneradores puedan comercializar sus excedentes de energía utilizando las redes de transmisión del sistema.

En cuanto a la gestión de la demanda, se están contemplando medidas que den señales e incentivos tendientes a inducir bajos consumos, tales como la medición horaria, cargas interrumpibles, medidas todas que pueden contribuir a reducir el valor de la factura como beneficio al usuario final [28].

1.3.1. LEY 1715 DE 2014 [38]

A principios del año 2010 Colombia da la importancia de empezar a mirar hacia sistemas de energías inteligentes y eficientes. Es por esto que se estudian las tendencias internacionales en este sector y se crean proyectos para incentivar el desarrollo de nuevas tecnologías. De esta manera se crea la ley 1715 de 2014, por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. La ley promueve el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, la integración al mercado eléctrico, busca el aprovechamiento de los sistemas de carácter renovable para el uso en zonas no interconectadas nacionalmente, como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la seguridad del abastecimiento energético. Para cada fuente de energía se deberá estudiar y analizar las condiciones propias de la naturaleza, para crear su reglamentación técnica por parte de la CREG y de esta manera hacer uso adecuado del recurso.

Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. El gobierno busca también la promoción de autogeneración a pequeña y gran escala, donde se puede realizar la venta de excedentes de energía por parte de los generadores distribuidos y obtener créditos negociables. Se crea el fondo de energías no convencionales y gestión eficiente de la energía, con el propósito de financiar programas y proyectos a fin con el tema, dirigidos al sector residencial de estratos bajos, tanto para la implementación de soluciones de autogeneración como para la mejora de eficiencia energética mediante la motivación de buenas prácticas.

La ley aplica a todos los agentes públicos y privados que intervengan en la definición de políticas sectoriales en el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía. La presente ha generado mucha motivación tanto al sector público como a los operadores privados, ya que como fomento a la investigación en el ámbito, se crean incentivos para los establecimientos que realicen directamente inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energía, con el fin de incluir al sector energético colombiano criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económica, con la intención de mejorar la calidad de vida sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta. Se recomienda leer el Anexo Digital B (LEY No. 1715 DE 2014 DEL CONGRESO DE COLOMBIA) para mayor nivel de detalle de la ley 1715 de 2014 de Colombia.

1.4. MICRO REDES

El término micro redes o *microgrid* por su nombre en inglés, se refiere a cualquier grupo localizado de instalaciones cuyas fuentes eléctricas (generación), terminales (cargas), y posiblemente de almacenamiento (tanto eléctrica como térmicas) funcionan simultáneamente con la red eléctrica tradicional centralizada, una micro red es un control local de sistemas que pueden funcionar vinculadas a la red o independiente de ella (modo isla). Los diferentes investigadores en el tema han creado una amplia variedad de definiciones, todas ellas dependiendo del contexto tecnológico y su función, pero son pocas las definiciones formales que existen. Los siguientes son unos esfuerzos de definición:

“Una *microgrid* es un grupo de cargas interconectadas y recursos distribuidos dentro de límites bien definidos que actúan como una única entidad controlable con respecto al sistema. Una *microgrid* puede conectarse y desconectarse del sistema de potencia y funciona correctamente tanto conectada a la red o en modo isla” [43].

“Las *microgrids* son sistemas eléctricos de distribución que contienen cargas y recursos de energía distribuidos (tales como generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento, o cargas controlables) que pueden operar controladamente, y de forma coordinada mientras están conectadas a la red de alimentación principal o de modo isla” [44].

Tanto la primera definición dada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos como la del grupo de trabajo CIGRÉ, contienen dos requerimientos básicos para la clasificación de una *microgrid*, la primera debe contener tanto fuentes de generación como cargas controladas, y la segunda requiere de la funcionalidad de la micro red tanto interconectada con la red principal como en modo autónomo o isla. A menudo las redes remotas que trabajan solamente en modo isla son llamadas *microgrids*, sin embargo, carecen de conexión a la red principal y por tanto no se les puede llamar verdaderamente de esta manera, debido a las dos definiciones dadas anteriormente. Sin embargo muchos de los estudios que se realizan con una micro red trabajando en modo isla son productores de valiosa información y lecciones relevantes para el desarrollo de las *microgrids* [45].

Muchas micro redes no solo operan con algunas diferencias en cuanto a tecnología y objetivos sino que también se ven reguladas por diferentes normas y leyes, dependiendo del país de desarrollo y operación, existen cuatro principales tipos de *microgrids*, con características en específico de hardware y funcionalidad (ver tabla 1).

Tabla 1. Descripción de los principales tipos de micro redes.

<i>Microgrid</i>	Descripción
Utilidad integrada en campus con <i>microgrid</i>	Este tipo de micro red se encuentra totalmente interconectada con una red local prestadora del servicio eléctrico, pero puede también mantener cierto nivel de servicio al realizar trabajo en modo isla, como por ejemplo en un corte de energía. Ejemplos típicos son los campus universitarios y empresariales, e incluso prisiones y bases militares.
<i>Microgrids</i> Comunitarias	Se encuentran integradas a las redes de servicio público. Tales redes sirven o prestan servicios a múltiples clientes dentro de una comunidad establecida, en general, para proporcionar energía de forma flexible para los bienes vitales de una comunidad.
Off-grid <i>microgrids</i>	Incluyen las que operan en modo isla, sitios remotos, y otros sistemas de <i>microgrids</i> no conectados a una red local de servicio eléctrico.
<i>Nanogrids</i>	Servicio único a edificios o lugares específicos, tales como comerciales, industriales o instalaciones residenciales, o sistemas dedicados, como estaciones de tratamiento y bombeo del agua.

Fuente: Modificada de [46], junio de 2016.

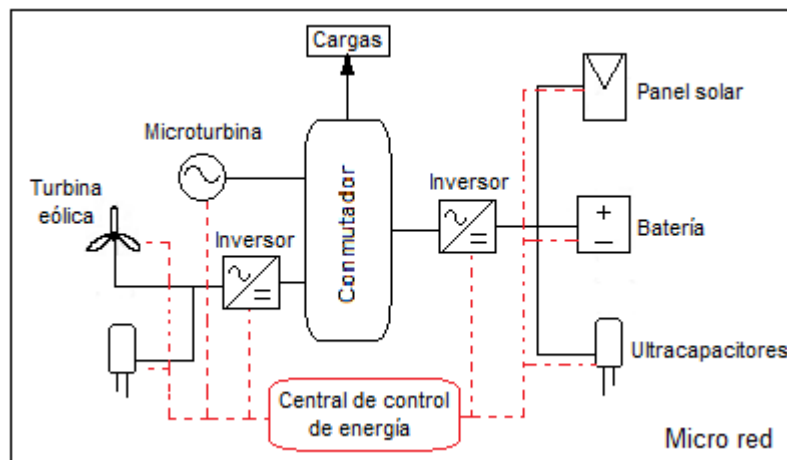
La implementación de las redes inteligentes presenta beneficios, algunos problemas y retos para la solución de los mismos, en aspecto técnico, económico y ambiental. Retos técnicos como el control del voltaje y la frecuencia de operación, el funcionamiento del modo isla y la protección de todo el sistema en momentos de conmutación entre red eléctrica pública y auto abastecimiento, son la clave para poder desarrollar correctamente la implementación hardware de este tipo de redes [47]. La gestión de la energía dentro de la micro red puede integrar los diferentes tipos de energía presentes, procurando tener la mayor cantidad de energía de fuentes de recursos renovables, el mejoramiento activo permite a la *microgrid* realizar procesos de aprendizaje, es decir grabar los puntos de máximo rendimiento energético y menor impacto ambiental, de esta forma la red mejora automáticamente [48]. Aplanar la curva de la demanda se involucra también directamente, donde el objetivo principal, es de brindar energía al sistema en los picos de consumo de energía y en la hora de mayor costo de la misma, obteniendo una respuesta inmediata del sistema, que utiliza energía almacenada y que permite reducir los costos finales del servicio eléctrico [49].

La red convencional eléctrica conecta hogares, negocios y otras construcciones a una fuente de energía central, el cual permite el uso de toda clase de accesorios,

electrónicos, calefacción o sistemas de aire acondicionado. Pero, esto significa que se presentan cortes de energía si la red necesita ser reparada e incluso si se presenta una falla temporal, por tanto todos los usuarios finales se ven afectados. Una *microgrid* generalmente opera mientras está conectada a la red pública eléctrica, pero lo más importante, es la posible desconexión y operación por sí misma mediante el generador de energía local durante tiempos de cortes de la energía que varían de acuerdo al país, en países con presencia de alto número de tormentas y tornados, esta puede reemplazar el servicio eléctrico de inmediato, que por lo general es el más afectado. La red se energiza mediante generadores distribuidos, sistemas de almacenamiento de energía y/o fuentes de energía renovables como paneles fotovoltaicos [50].

Para analizar la arquitectura e implementación de una micro red, se muestra el esquema de la *microgrid* ubicada en los laboratorios de Electrónica y Electricidad de Puissance en Lille, Francia (ver figura 4). En esta *microgrid* se integran dos generadores activos a base de energía renovable y una microturbina de gas. El generador activo está conformado por paneles fotovoltaicos asociados a un sistema de almacenamiento de energía que incluye un conjunto de baterías como un dispositivo de almacenamiento a largo plazo y un conjunto de ultra-capacitores que almacena a corto plazo y se utilizan para la compensación de potencia dinámica. Se hace uso de inversores para la conversión de la corriente directa en alterna, la cual es utilizada por las cargas de la micro red. La microturbina funciona como un generador de respaldo, lo que permite al sistema trabajar en conjunto con la red eléctrica tradicional y al mismo tiempo le permite funcionar en modo isla. La micro red cuenta con un centro de gestión de energía el cual censa y controla cada uno de los dispositivos para un uso eficiente de la energía [51].

Figura 4. Ejemplo de micro red integrada con fuentes de energía renovable y microturbina de gas.



Fuente: Modificada de [51], febrero de 2015.

1.4.1. GENERACIÓN

Las energías renovables son las que se obtienen a partir de los recursos naturales que pueden ser continuamente reemplazados, entre las diferentes energías renovables se encuentran la bioenergía, la energía geotérmica, energía del agua, energía solar y energía del viento. En un país como Colombia se cuenta con tecnologías para la explotación de la energía solar y del viento, para llegar a la generación fotovoltaica y eólica, las otras tecnologías requieren de mayor estudio e inversión [52].

La generación fotovoltaica se realiza mediante la implementación de placas compuestas por módulos y células fotovoltaicas, las cuales están formadas por una o varias láminas de materiales semiconductores y recubiertas de vidrios que permiten el paso de mayor cantidad de radiación solar hacia los mismos y minimiza la pérdida de calor. Estas celdas solares fotovoltaicas se fabrican de silicio los cuales tienen mayor eficiencia, con rendimiento medio de 14–17 %, pero con mayor costo debido a la menor disponibilidad del mismo material, esto lleva a la creación de células con materiales de menor rendimiento (10-12 %) y se denominan “de segunda generación” [53]. Para los sistemas de concentración se usan materiales “multi uniones”, que aumentan en gran medida el rendimiento llegando a 25-30 %.

La luz del sol incide en las células fotovoltaicas de la placa, estos rayos de sol contienen fotones que golpean los electrones fuera de las capas de silicio. Los electrones liberados cargados negativamente son atraídos hacia otro lado de la célula de silicio, creándose tensión eléctrica o campos eléctricos entre capas con flujo constante de esta manera se forma la corriente continua, permitiendo la generación de energía.

La generación eólica convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica, mediante la aplicación de una turbina, sobre la cual las corrientes de aire sufren una desaceleración al fluir a través de las aspas de la misma, el resultado es el impulso suficiente para generar rotación del rotor, que se encuentra conectado a su vez a un multiplicador que aumenta la velocidad de giro del rotor para finalmente llegar al generador eléctrico y producir energía eléctrica. La eficiencia de este tipo de arquitecturas es de un máximo de 59.3 %, y la cantidad de energía eléctrica generada está directamente relacionada con el tamaño del rotor, el cual obedece a explicaciones físicas, y donde el tamaño varía desde pequeños rotores de algunos centímetros para una mínima generación, hasta rotores de 164m que producen 8 MW, por ende se requieren infraestructuras y áreas de instalación de gran tamaño para generación a gran escala [54].

Por otra parte, la generación de energía eléctrica utilizando las turbinas de gas se implementa para darle mayor confiabilidad y un nivel de tensión más constante a la micro red, este tipo de generación funciona al comprimir gas en tres diferentes secciones que giran sobre un mismo eje, (compresor, cámara de combustión y la turbina), las cuales cambian de tamaño y disminuyen el volumen de aire que pasa a través de los mismos generando una mayor presión y temperatura, el aire comprimido es mezclado con el gas o el combustible e ingresados la cámara de combustión, y enviados a la turbina donde el volumen de la cámara es mayor y permite que las aspas expandan el gas y generen una gran fuerza y velocidad de giro del rotor, el cual está conectado al generador eléctrico. Aproximadamente el 55 ó 65 % de la potencia generada es utilizada para el manejo y control del compresor. Si se desea mayor eficiencia se deben conectar múltiples compresores y etapas de turbinas [55].

En cuanto a los sistemas híbridos se refiere a la integración de dos o más tipos de generación de energía renovable, con el objetivo de obtener mayor rendimiento en producción eléctrica. Los modelos híbridos han sido un medio eficaz para producir electricidad alrededor del mundo, se diseñan con el fin de integrar y optimizar el comportamiento del sistema de generación dentro de una micro red [56].

1.4.2. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Los sistemas de almacenamiento de energía han sido reconocidos como foco para el aumento de micro redes en el mundo [57]. Los beneficios se clasifican en dos categorías genéricas. Por un lado, un sistema con alto valor de energía mejora la rentabilidad, es decir, se asegura económicamente. Por otro lado, un sistema con alta potencia proporciona fiabilidad, seguridad y la productividad, es decir, proporciona beneficios técnicos. Además, esta clasificación no es obligatoria en absoluto, siendo posible encontrar una alta rentabilidad en aplicaciones de alta potencia y viceversa [58].

Existen diferentes formas de almacenamiento de energía, como por ejemplo, baterías, biomasa, volantes de inercia, hidrógeno, etc. Estos son necesarios clasificarlos según sus diferentes principios de funcionamiento, capacidad de almacenamiento, tiempo de respuesta en el despacho de energía almacenada, uso más frecuente, entre otros (ver tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los tipos de sistemas de almacenamiento.

Sistema de almacenamiento	Descripción
Almacenamiento de energía en baterías	En las baterías la energía eléctrica es almacenada o liberada mediante reacciones electroquímicas que transportan electrones a los

	<p>electrodos (cátodo y ánodo), conectados por un electrolito, para llevar cabo reacciones específicas de reducción/oxidación (redox). Frecuentemente se utilizan catalizadores para acelerar las tasas de reacción a niveles aceptables. Durante la carga, la energía se almacena químicamente al incrementarse la composición de iones cargados contenidos en el electrolito a través de reacciones redox selectivas en los electrodos que consumen o producen electrones. Durante la descarga, la energía se libera por transporte de iones, causando reacciones redox que ocurren de forma inversa en los electrodos. Luego el ánodo (electrodo oxidante) y el cátodo (electrodo reductor) cambian de posición entre la carga y descarga. La electricidad se produce en corriente continua y para aplicación en centrales de potencia normalmente se convierte a corriente alterna mediante un inversor. Las baterías son generalmente costosas, requieren mucho mantenimiento y tienen vida útil limitada.</p>
Almacenamiento de energía electromagnética	<p>Hay dos mecanismos generales por el cual la energía eléctrica puede ser almacenada: uno involucra capacitores, en el cual la energía puede ser almacenada por la separación de cargas eléctricas positivas y negativas; la otra forma involucra las relaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos.</p>
Almacenamiento de energía mecánica	<p>Resulta de la aplicación de fuerzas a sistemas materiales. Existen dos tipos, uno de estos involucra cambios en la energía potencial y el otro involucra cambios en el movimiento de la masa y por ende de la energía cinética.</p>
Supercapacitores	<p>Almacenan energía eléctrica en forma de cargas electroestáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Los supercondensadores tienen la capacidad de ser cargados y descargados en breves periodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante interrupciones de suministro de poca duración.</p>
Almacenamiento térmico	<p>Consiste en utilizar electricidad remanente para producir hielo y almacenar hasta el día siguiente,</p>

	cuando se utiliza para refrescar el aire en un edificio grande, o el aire producido por un turbogenerador de gas, aumentando la capacidad de generación en momentos pico.
Almacenamiento de Energía con Aire Comprimido	Los sistemas CAES utilizan la energía compresiva asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos consistente en cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos que están geológicamente contenidos. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire durante horas valle, durante horas punta el aire comprimido se utiliza para producir potencia al expandirlo en una turbina de gas con relativamente alta eficiencia.
Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos	Los sistemas SMES almacenan energía electromagnética con pérdidas insignificantes mediante la circulación de corriente continua a través de bobinas superconductoras, enfriadas criogénicamente. La energía almacenada se puede lanzar de nuevo a la red descargando la bobina. El sistema utiliza un inversor/rectificador para transformar energía de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC) o vice versa. Los SMES presentan menores pérdidas de electricidad en comparación a otros métodos de almacenamiento de energía. El alto costo de los superconductores es la limitación principal para el uso comercial de este método de almacenamiento de energía.
Almacenamiento mediante hidrógeno	El hidrógeno también se está desarrollando como medio de almacenamiento de energía. La energía se almacena produciendo hidrógeno, a partir del reformado de gas natural o por electrólisis del agua, en horas valle y se libera en horas punta generando electricidad en alguna celda de combustible.

Fuente: Modificada de [59] y [60], junio de 2016.

1.4.3. INVERSORES

Un inversor es un convertidor estático de energía, que convierte la corriente continua DC en corriente alterna AC, permitiendo alimentar una carga en su salida regulando la tensión y la frecuencia. Dicho de otro modo un inversor transfiere potencia desde una fuente de corriente continua a una carga de corriente alterna.

La normativa establece que los inversores para sistemas con energía solar, deben tener un aislamiento galvánico entre la red y los paneles fotovoltaicos. La mayor parte de los inversores que trabajan en generación fotovoltaica tienen un aislamiento galvánico a tierra y cuentan con dispositivos de protección frente a contactos directos, lo que representa un avance frente a los antiguos convertidores de gran tamaño, pesados, costosos y que generan pérdidas adicionales [61].

Actualmente se utilizan inversores de baja potencia (2-10kW, o incluso inferiores), los cuales son alimentados desde uno o varios *string* (agrupación de módulos fotovoltaicos en serie). Esta topología constructiva, denominada inversores de *string*, divide el conjunto de módulos que forman el generador fotovoltaico en grupos de menor tamaño y realiza el seguimiento del punto de máxima potencia de manera independiente, es decir, la utilización de inversores más pequeños o micro inversores por cada panel o *string*. Esta división mejora enormemente la energía extraída de los módulos, los cuales se encuentran sometidos a diferentes intensidades solares, debido a un fenómeno denominado “sombreado parcial” [15].

1.4.4. MEDIDORES INTELIGENTES

Los medidores inteligentes son un tipo de contador avanzado que calcula el consumo de una forma más detallada que los medidores convencionales. Estos dispositivos ofrecen la posibilidad de comunicar la información a través de alguna red a un centro de control, la cual puede utilizar los datos a efectos de facturación o seguimiento. Así mismo, algunos tienen la capacidad de interrumpir el suministro del servicio. Los medidores inteligentes se integran para supervisar y controlar el flujo de potencia en la red, de esta manera hacer coincidir la cantidad de generación de energía con el consumo total de energía, y así minimizar el costo global de la energía eléctrica entregada a los usuarios finales [62].

1.4.5. CONTROL Y COMUNICACIÓN

Uno de los principales factores dentro de la infraestructura de una red inteligente, son las telecomunicaciones, para tener control del sistema, mejorando la eficiencia y la estabilidad. Son diferentes tipos de comunicaciones tanto alámbricas como inalámbricas que son utilizadas para la comunicación tanto interna como externa, para el control y envío de información remota se implementa la red de internet bajo siguiendo protocolos IEEE, estas redes tienen un respaldo sobre fibra óptica, par trenzado u cable coaxial. Para comunicación entre dispositivos ubicados dentro de una microred se utilizan tecnologías inalámbricas de corto alcance como Bluetooth, WiFi y ZigBee que permiten la construcción de una red de comunicaciones corto alcance con protocolos ya establecidos. Si la micro red funciona gobernada por un controlador central que debe ser capaz de manejar una

amplia casuística de generación y consumo de energía mediante algoritmos avanzados que tengan en cuenta tanto la disponibilidad de generación como las restricciones presentes del sistema [63]. El sistema de control es el dispositivo objetivo para la programación de acuerdo a los requerimientos y objetivos, en este punto se realiza la gestión más adecuada de los múltiples elementos presentes en la micro red.

1.5. ESTADO DEL ARTE

Los modelos de gestión de energía se encargan de supervisar, controlar y optimizar el rendimiento de una micro red, estos modelos se diseñan a partir de sistemas de toma de decisiones, ecuaciones o algoritmos que permiten dar respuesta a la demanda, como también mejorar también la relación costo-beneficio. Se investigan diversos sistemas de gestión reportados para el mejoramiento de la red eléctrica tradicional, buscando la integración con generación fotovoltaica y baterías de almacenamiento.

En el año 2011 en la revista *IEEE Transactions on Industrial Electronics* se publicó el artículo *Energy management and operational planning of a microgrid with a PV based active generator for smart grid applications*, el objetivo global de este consiste en adecuar la producción de energía demandada, de una manera óptima en el marco de las *smart grid*, con la combinación de una red de comunicaciones y un sistema de gestión inteligente. El desarrollo de herramientas de gestión de potencia, para consumidores y productores de energía fotovoltaica junto a unidades de almacenamiento, brinda flexibilidad a la distribución de energía del sistema de los operadores. El diseño se realiza de acuerdo con la predicción de generación fotovoltaica y de la carga de los consumidores, con el fin de reducir la contaminación por emisiones de gas en el mercado energético y realizar de manera automática la administración de la carga con un sistema de gestión de energía controlado en tiempo real a partir del estado de carga de la batería [64].

En el año 2012 en la 38ava edición de la conferencia de especialistas fotovoltaicos se publicó el artículo titulado *PV with Battery in Smart Grid Paradigm: Price-Based Energy Management System* desarrollado por dos universidades de Noruega. En el texto se presenta un sistema de gestión de energía basado en el precio de la demanda adecuado para un panel fotovoltaico, baterías y un controlador local. El modelo de salida de potencia se programa de acuerdo con la variación en el tiempo de las señales del precio de energía correspondientes a la demanda de la red eléctrica. La batería es usada para balancear la generación intermitente del panel guardando el exceso de radiación solar cuando este es abundante o cuando el precio de la energía es bajo, por lo contrario se descarga cuando no hay generación fotovoltaica o el precio de demanda es alto. Se realiza una

programación dinámica para minimizar las transiciones entre el operador teniendo en cuenta la radiación y predicción de la carga. Luego se crea la estrategia de control por medio de un número de ecuaciones que maximizan la suma total de ingresos de la red en un periodo de 24 horas [65].

En el año 2013 en la cuarta conferencia internacional de la ingeniería de potencia, energía y dispositivos electrónicos se publicó el artículo titulado *Energy Management Algorithm for Smart Home with Renewable Energy Sources*, de la universidad Técnica Yildiz en Turquía, en el artículo se imprime el término “Gestión de Energía en Hogares” de sus siglas en inglés HEM. Esto con el fin de desarrollar un algoritmo que permita volver más eficiente el uso de este tipo de energías renovables, el algoritmo hace un seguimiento y control de la energía de acuerdo con varios aspectos, entre ellos el comportamiento de consumo de energía del usuario y las condiciones climatológicas, donde los datos de estos son obtenidos directamente de una plataforma instalada en el laboratorio de la universidad. La variable más relevante y sobre la que se basa el algoritmo es la del estado de carga de las baterías, dependiendo de la cantidad de energía almacenada se realiza una conmutación entre el dispositivo de almacenamiento y la energía procedente de la red pública [66].

En el año 2014 en la revista *IEEE Transactions on Smart Grid* se publicó el artículo *Adaptive control for energy storage systems in households with photovoltaic modules* el cual presenta algoritmos de predicción de la generación fotovoltaica y el perfil del consumo de energía de un hogar. Para una mejor utilización de la energía renovable, se plantea la integración a nivel residencial de la generación de energía fotovoltaica y los sistemas de almacenamiento en el campo de las *smart grid*, con modelos del precio de energía para reducir el costo en la factura y los picos de demanda de potencia. Se cuenta con medidores inteligentes para monitorear y controlar el flujo de la red, también con un dispositivo almacenador para reservar energía durante baja demanda y proporcionarla en periodos de máxima actividad. Se toman cinco periodos de tiempo para realizar el modelo del algoritmo donde se realiza un pronóstico de la demanda y la producción fotovoltaica para controlar el almacenamiento e inyección de energía al sistema por medio de toma de decisiones con condicionales [67].

En el año 2014 en el congreso internacional de electrónica de potencia se presentó el artículo *Versatile Power Transfer Strategies of PV Battery Hybrid System for Residential Use with Energy Management System*, los autores proponen unas estrategias para la variable transferencia de energía en una red híbrida basada en un sistema de gestión energético, el cual cuenta un sistema acondicionamiento para el panel fotovoltaico, un sistema de almacenamiento y un

sistema de control de la batería por medio de comandos. El panel solar y la batería brindan energía al hogar, cuando esta es insuficiente el operador supe la potencia, por otro lado, cuando la red se encuentra estable y en capacidad de compartir la carga, la energía producida se puede vender a la central eléctrica que proporciona los servicios. Se desarrolla un sistema de toma de decisiones a partir de cuatro modos de operación teniendo en cuenta la fluctuación de la energía renovable, la carga de demanda y el estado de carga de la batería, como también el algoritmo tiene en cuenta áreas determinadas solo por el estado de carga, de esta manera, se realiza el control del sistema [68].

En el año 2014 en la conferencia y exposición T&D se presentó el artículo titulado *Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System*, este lo proponen Farideh Doost Mohammadi y Ali Feliachi, miembros de la IEEE, donde presentan un modelo para la optimización y reducción de costos de la energía en una micro red. Primeramente se diseña un gestor que se encarga de manejar el punto de carga/descarga del sistema de almacenamiento dependiendo de la señal de la tarifa o la señal del precio en determinado periodo de tiempo. Después de la creación e implementación del algoritmo gestor, se realiza la simulación en la herramienta PSCAD, donde las variables de las señales se implantan como valores constantes o fluctuaciones en los mismos periodos de tiempo, de esta manera, el algoritmo demuestra ser adaptativo a la fluctuación del precio de la energía y se refleja que se toma la mejor decisión para la reducción del costo de la energía [69].

En el año 2014 en la conferencia de potencia electrónica en India se propone el título *Residential Demand Response from PV Panel and Energy Storage Device*, con el fin de poder atender a la demanda de las cargas de un hogar en este caso, los electrodomésticos y en especial el sistema de aire acondicionado y el sistema de calefacción. A partir de estos dos elementos se desarrolla un modelo para la gestión de la energía que consumen y que provienen ya sea de las baterías o por el contrario de la red pública. El control por parte del HEM, se da mediante el manejo de las señales del precio de la energía por parte del utilitario, así, al ser el sistema bidireccional, permite la importación o exportación de energía. El algoritmo toma decisiones dependiendo de: el análisis del costo de la energía durante un periodo de tiempo o de una técnica de optimización la cual busca la mayor eficiencia posible. Son varias las variables sobre las cuales se efectúan el análisis y se mejora el sistema [70].

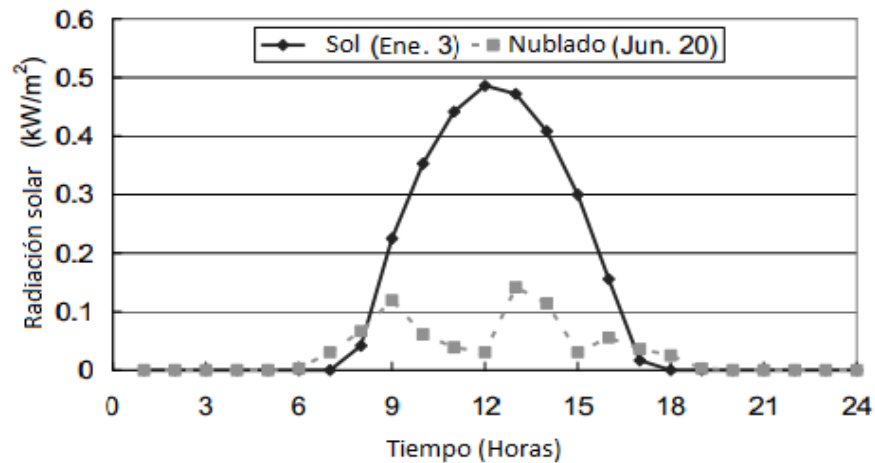
En julio del año 2015 la revista *IEEE Transactions on Industrial Electronics* publicó el artículo *Energy Management Based on the Photovoltaic HPCS With an Energy Storage Device* (HPCS: Hybrid Power Conditioning System), en el cual se investiga y se realiza la implementación *hardware* del sistema propuesto por 4

miembros de la IEEE. El sistema desarrollado trabaja en tiempo real con la información de la variación del precio de la energía y las condiciones meteorológicas determinadas con anterioridad, posterior a esto el sistema de almacenamiento de energía provee la potencia necesaria para lograr la reducción de los picos de la demanda cuando el precio es mayor. Este sistema junto con el gestor de energía, son capaces de mitigar las fluctuaciones de potencia provenientes del sistema de paneles solares. En caso de tener un exceso de energía, esta puede ser exportada hacia la red pero no desde el sistema de almacenamiento. El gestor mantiene una constante comunicación entre el sistema de paneles solares y la red de energía pública teniendo en cuenta ciertas pautas para la toma de decisiones. Esta información es procesada digitalmente por el sistema para tener una comunicación más eficiente y robusta con las bases de datos del precio de la energía [71].

Los artículos anteriormente mencionados aportan al presente proyecto con sus modelos de gestión de energía con fuentes fotovoltaicas y sistemas de almacenamiento, estos algoritmos se planean a partir del pronóstico de generación de energía fotovoltaica como también de la predicción de la carga demandada [70] y se controlan dependiendo del estado de carga de la batería [64][66], otros trabajos se enfocan también en el control dependiendo del precio del servicio energético [67] pero, se realiza de manera más teórica que practica, por otro lado [65] si desarrolla una simulación en tiempo real teniendo en cuenta el precio pero no considera parámetros como el estado de carga de la batería. El apartado [69] involucra todas las variables anteriormente mencionadas aunque la herramienta de trabajo no sea la más favorecida, sin embargo, otro parámetro a valorar es la exportación de energía al prestador de servicios, lo que sí está profundizado en [68]. Finalmente, el artículo [71] involucra los factores deseados para el proyecto con la diferencia de que no se realiza una predicción constante del precio de la energía, la cual varía día a día, sino que se toman en cuenta valores medidos con anterioridad y estos quedan fijos para el sistema de toma de decisiones planteado. A continuación se describen las variables tenidas en cuenta por los distintos modelos de gestión.

Para la gestión del modelo se deben tener en cuenta las variables predicción de generación fotovoltaica, la demanda, el precio de la energía y el estado de carga de la batería. En cuanto a la predicción de la generación de energía fotovoltaica, esta se puede realizar de manera anual o día a día, las condiciones cambian dependiendo de la estación del año en la que se encuentre, de esta manera se realizan gráficos para representar la variación de la radiación solar [65][68]. Se representa el comportamiento que generalmente tiene la energía fotovoltaica, donde en las horas del día presenta un pico de mayor generación (ver figura 5).

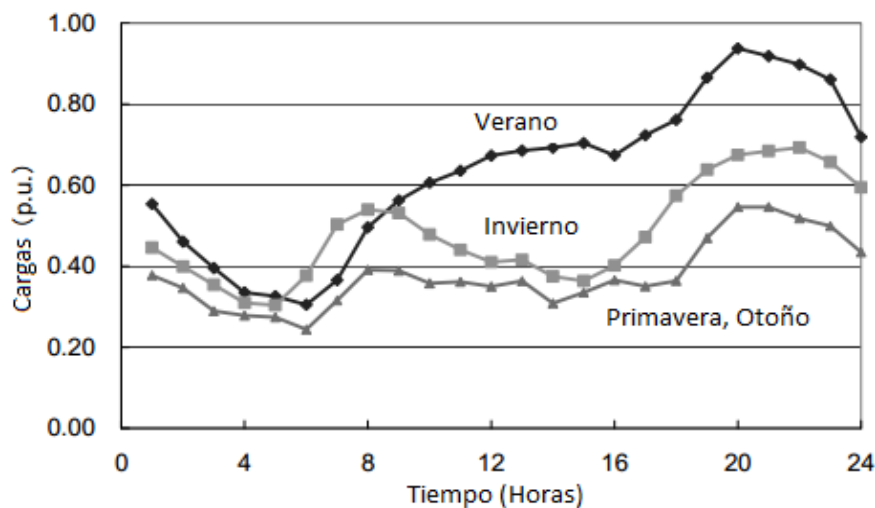
Figura 5. Curvas de generación de energía fotovoltaica según predicción de [76].



Fuente: Modificada de [72], diciembre de 2015.

La variable de la predicción de la carga que se demanda en una determinada residencia ayuda a realizar de una mejor manera el modelo de gestión de energía eléctrica, ya que se toma como parámetro decisivo en el momento de realizar el sistema de toma de decisiones. Este valor depende de diferentes factores como es el clima en el que se encuentra el hogar del estudio, también condiciones culturales de uso de energía, y sobre todo la hora del día, es decir, realmente es un poco impredecible por lo que se requieren de varios datos previos para una solución determinística [73]. Para una mejor comprensión se muestran los datos de carga por hora teniendo en cuenta diferentes estaciones del año para un estudio residencial en Japón, donde existe mayor demanda en las horas de la noche, lo que ocurre de manera general (ver figura 6) [72].

Figura 6. Comportamiento de la demanda según predicción de [76].



Fuente: Modificada de [72], diciembre de 2015.

La variación del precio de la energía, se rige en por una bolsa de energía representativa, sistema de información donde los generadores y comercializadores ejecutan actos de intercambio de ofertas y demandas de energía, hora a hora, para que el administrador del sistema de intercambios comerciales ejecute los contratos resultantes en la bolsa de energía [74]. Depende de la hora de demanda y es realmente efectiva para realizar el modelo de gestión, debido a que ayuda a reducir el precio de la factura de energía del usuario final, ya que se determina el punto de ajuste de almacenamiento basándose en las señales de la tarifa en la que se encuentra la energía, con el fin de tomar la mejor decisión de solo consumir en el menor precio para el sistema de toma de decisiones dentro del modelo de gestión de energía eléctrica [69].

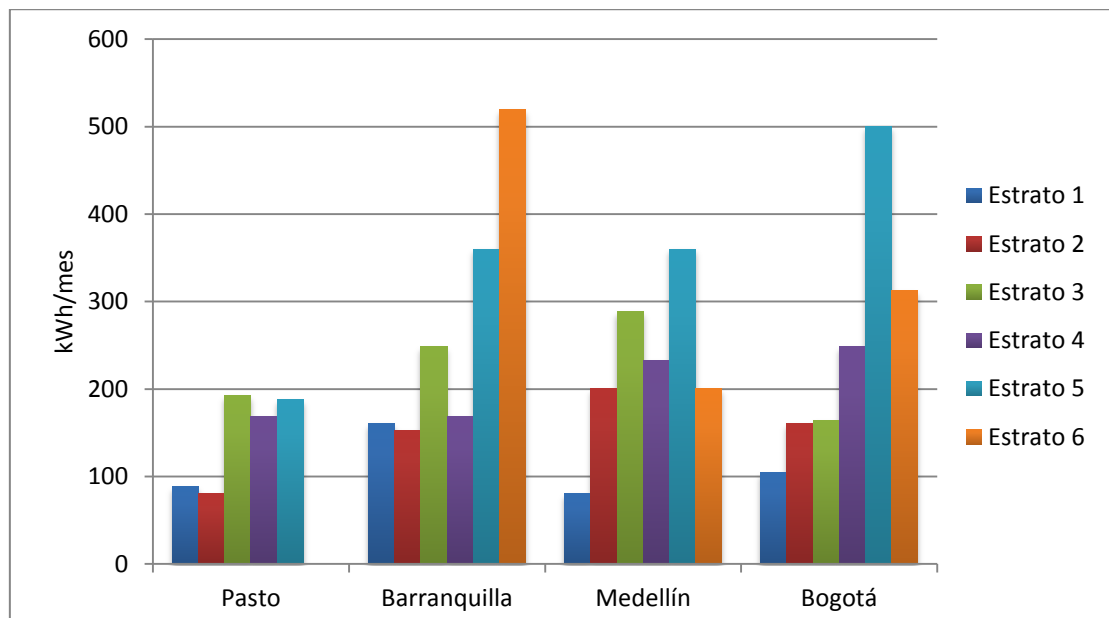
Finalmente, otra variable a tener en cuenta dentro de los sistemas de almacenamiento es el estado de carga de la batería, conocido como *SOC (State Of Charge)*. Los sistemas deben contar con esta medida para evitar daños significativos en los dispositivos y una operación segura en caso de que la carga se encuentre en algún extremo, ya sea alta o baja [75]. Los sistemas de gestión de energía eléctrica utilizan este parámetro para realizar el control y la toma de decisiones, de esta manera optimizar las aplicaciones y disminuir el pico de carga de la demanda [68].

2. ESPECIFICACIONES DE LA MICRO RED

Después de plantear aspectos generales de las redes inteligentes, el modelo de negocio del sector eléctrico colombiano y las micro redes en general, en el presente capítulo se presentan los aspectos metodológicos más relevantes a tener en cuenta en el diseño de una micro red, también se describe una micro red no híbrida de manera más específica, señalando los diferentes componentes y funcionalidades. Estas descripciones se tienen en cuenta a partir de micro redes comerciales de donde se obtiene una micro red fotovoltaica completa con un rendimiento sobresaliente, como también se especifica una micro red fotovoltaica reducida y adaptada a requerimientos determinados. A partir de este momento cuando se haga referencia a una micro red se debe entender que es de generación fotovoltaica.

La micro red se diseña para el sector residencial en Colombia, por lo que requieren datos específicos de las necesidades en un hogar colombiano. El piso térmico característico de Colombia es el cálido, correspondiente al 80 % del territorio nacional, con una temperatura alrededor de los 24°C donde el sol permanece casi constante durante todo el año, sin variaciones de estaciones. Para determinar la arquitectura de la micro red, también se cuenta con los datos del consumo promedio de energía al mes por estrato para algunas ciudades de Colombia (ver figura 7). El consumo varía entre 80 y 520 kWh/mes, se aumenta generalmente por estrato y varía con las diferentes ciudades del país [76].

Figura 7. Consumo de energía eléctrica según estratos, para diferentes ciudades de Colombia.



Fuente: Modificada de [76], Enero de 2016.

2.1. ASPECTOS METODOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE MICRO REDES

Cuando se aborda el diseño de una micro red se debe tener en cuenta una variedad de aspectos para garantizar un óptimo rendimiento del sistema, en este orden se describen a continuación los aspectos más importantes a tener en cuenta para el diseño de una micro red residencial.

- El correcto desempeño de los paneles fotovoltaicos depende de la temperatura ambiente donde se encuentren ubicados, cuando los dispositivos se calientan disminuyen su rendimiento de generación de energía, por otro lado cuando se mantienen refrigerados tienen una mejor productividad [77].
- Dentro de los aspectos a considerar, se tiene en cuenta el nivel de polución de la ciudad donde se desea ubicar la micro red, ya que este puede determinar el rendimiento de los dispositivos, donde la polución es menor, se requiere de menos mantenimiento y los dispositivos trabajan mejor, mientras en ciudades con altos niveles ocurre lo contrario [77].
- El rendimiento del panel fotovoltaico varía dependiendo del ángulo de inclinación, el cual para Colombia no es un requisito al no verse afectado el sistema debido a la ubicación cerca de la zona ecuatorial, donde el ángulo puede variar alrededor de los $\pm 10^\circ$ [78].
- La ubicación de la micro red también es un aspecto a tener en cuenta, cuando se tiene una elevada altitud sobre el nivel del mar, los paneles fotovoltaicos se encuentran más cerca al sol, aunque sea unos kilómetros de diferencia, es posible aprovechar de una mejor manera la radiación solar mejorando el rendimiento y generando más energía [79].
- Existen dos tipos de paneles fotovoltaicos, mono y poli cristalinos, donde los formados por celdas mono cristalinas tienen un mejor rendimiento, ocupan áreas más pequeñas y tienen mayor vida útil, sin embargo representan un mayor costo [80].
- Dentro de los inversores se tienen colectivos e individuales llamados micro inversores, donde los primeros convierten la corriente continua a alterna o viceversa, de varios paneles fotovoltaicos al tiempo, pero la capacidad se ve limitada en caso de un factor de sombra (reducción del rendimiento de un panel fotovoltaico debido al bloqueo de sol directo), donde todos los paneles se verían afectados, por lo cual se deben considerar los inversores

individuales, ya que permiten la conexión entre un micro inversor y un único panel fotovoltaico, construyendo un sistema más productivo, porque en caso de falla en un solo panel, no se reduce el rendimiento de todo el sistema sino solamente del panel fotovoltaico conectado directamente al micro inversor [81].

- Es posible considerar varios tipos de almacenamiento de energía, mediante hidrogeno, aire comprimido, baterías, de manera térmica, entre otros. Cuando existe generación de energía en exceso dentro una micro red se requiere tanto de almacenamiento como inyección de energía, considerando esto, el mejor sistema de almacenamiento es una batería, debido a sus características de trabajo con alta potencia, alto valor de capacidad, vida útil y sobretodo rápida respuesta al sistema, teniendo en cuenta que las tecnologías varían dependiendo del fabricante. También se pueden considerar por su fácil instalación dentro de los hogares [70].
- Para medir el número de kWh consumidos dentro de una micro red se requiere de medidores, existen electromecánicos donde su funcionamiento se basa un número determinado de giros sobre un disco por cada kWh consumido, también se tienen medidores electrónicos donde una pequeña luz parpadea con velocidad directamente proporcional a la cantidad de energía consumida, este segundo tiene mayor precisión al medir, debido a sus características digitales más precisas y las cuales no varían con el paso del tiempo [82].
- Se debe sincronizar de manera correcta el valor de trabajo de cada una de las medidas de frecuencia, tensión y corriente de cada uno de los elementos de la micro red, esto se realiza al tener valores parecidos, para no causar daños eléctricos dentro de la micro red y funcionar adecuadamente con la red proveedora de servicios [83].

2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA UNA MICRO RED

Con el fin de cumplir el primer objetivo específico del presente trabajo de grado se diseña una micro red residencial compuesta principalmente por una fuente de energía renovable, en este caso un grupo de paneles fotovoltaicos. Cada panel se conectará a un micro inversor permitiendo así la correcta conversión de la corriente directa a alterna dentro del sistema, también se hará uso de un dispositivo de almacenamiento como medio para proporcionar servicios de valor agregado la micro red, las baterías son un soporte para el funcionamiento del sistema, permitiendo la creación de un sistema en modo isla en caso de que esto sea necesario, o conectarse a la red tradicional para proporcionar energía

continúa en un caso crítico, aumentando la fiabilidad de la micro red. Para realizar de manera correcta las conexiones de los componentes, es necesario calcular medidas físicas, de tensión y de la potencia de entrada y salida de cada uno de los dispositivos, de esta manera demostrar su compatibilidad para la operación dentro del sistema. Para realizar el control de la micro red se requiere de un modelo de gestión de energía con un módulo de supervisión y control, de esta manera permitir la comunicación interna y externa del sistema [84]. Teniendo en cuenta los aspectos metodológicos previamente mencionados, se listan a continuación las características de manera general de cada uno de los aspectos metodológicos de la micro red.

- Temperatura ambiente promedio: 24 °C.
- Nivel de polución: Bajo.
- Altitud sobre nivel del mar: 1.700 m.
- Ubicación geográfica: zona ecuatorial.
- Sistema de generación: paneles fotovoltaicos poli cristalinos.
- Tipo de inversores: micro inversores.
- Manejo de la energía en exceso: baterías.
- Tipo de medidores: medidores digitales inteligentes.

Todos los componentes mencionados previamente deben contar con sus características y debidos cálculos con el fin de proporcionar un beneficio al usuario de manera económica y ambiental. Para tal finalidad en la sección siguiente se cuenta con dos ejemplos reales comerciales de diseño de micro redes, con el fin de determinar cómo se especifican las características de cada uno de los elementos de una micro red.

2.2.1. EJEMPLOS COMERCIALES DE DISEÑO DE UNA MICRO RED

Para encontrar las funcionalidades y especificaciones de la micro red completa y reducida a diseñar, se analizan dos micro redes previamente implementadas en dos empresas, las cuales cuentan con sus respectivas especificaciones, componentes y funcionalidades, cada uno de estos aspectos es mencionado a continuación, permitiendo así conocer datos que sirven de guía para el diseño de la micro red propia.

2.2.1.1. MICRO RED *GRIDZ* [85]

La empresa JML Energy de Estados Unidos, se dedica a la investigación, desarrollo y fabricación de productos, ofrece varios productos y soluciones energéticas como *Energizr*, producto que reúne energía renovable, la red utilitaria y el almacenamiento de energía en un hogar, para ayudar a las viviendas a conseguir su independencia energética. Más allá de este producto, se crea *Gridz*,

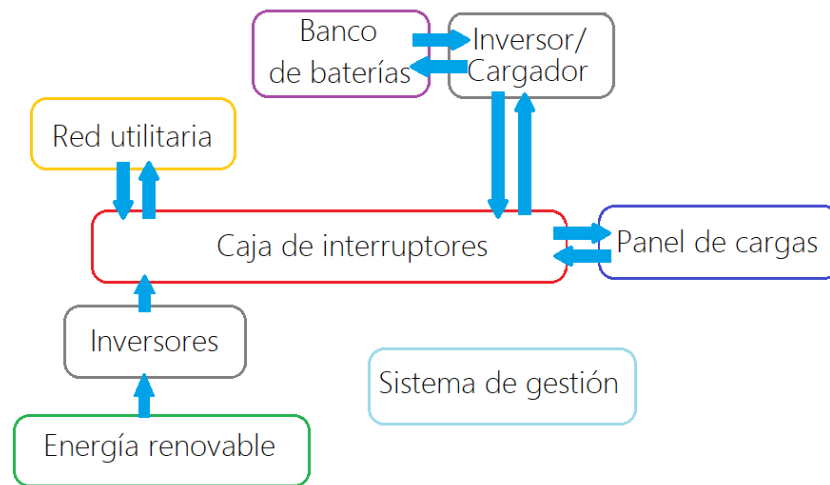
una micro red que permite obtener una utilidad a escala con un sistema distribuido de monitoreo constante, es capaz de optimizar la abstracción de la energía proveniente del panel fotovoltaico y la red tradicional para después almacenar esta energía en una batería, de esta manera redistribuirla a las cargas específicas y optimizar el sistema.

La empresa cuenta con tres tipos de micro red, donde la más cercana al presente proyecto es el modo “Utility Grid Mode”, donde se utiliza la energía renovable cuando esta esté disponible, de lo contrario se hace uso del almacenamiento local de las baterías para suministrar energía a la vivienda, en caso de que ninguno de los dos suministros esté disponible, se sincroniza con la red proveedora de servicios la cual abastecerá el hogar; si la batería se encuentra llena, es decir, la micro red tiene excesos en generación, estos se exportan a la red de suministro eléctrico.

En una micro red en general, según JLM Energy, cada generador fotovoltaico está conectado a un inversor pasando a través de un interruptor de desconexión de capacidad adecuada y una detección de fallo de tierra especial, característica que protege al sistema contra el riesgo de la degradación no deseada o gradual de aislamiento de los cables o sistema. También se cuenta con un sistema de almacenamiento con una batería la cual se puede cargar desde el generador de energía renovable o desde la red proveedora de servicios, la cual también se encuentra conectada a la micro red a través de un interruptor de control. La batería también se descarga para abastecer las cargas, proporcionando una metodología flexible para controlar el flujo de energía. Se cuenta con un sistema de control elaborado para dar respuesta a la demanda y suavizar los picos, estas decisiones se realizan a partir de las medidas tomadas por el sistema a través de los medidores inteligentes los cuales la envían información requerida, de esta manera se gestiona el flujo de energía desde el panel, la batería o la red utilitaria con el fin de lograr los objetivos monetarios y ambientales del propietario de la micro red (ver figura 8).

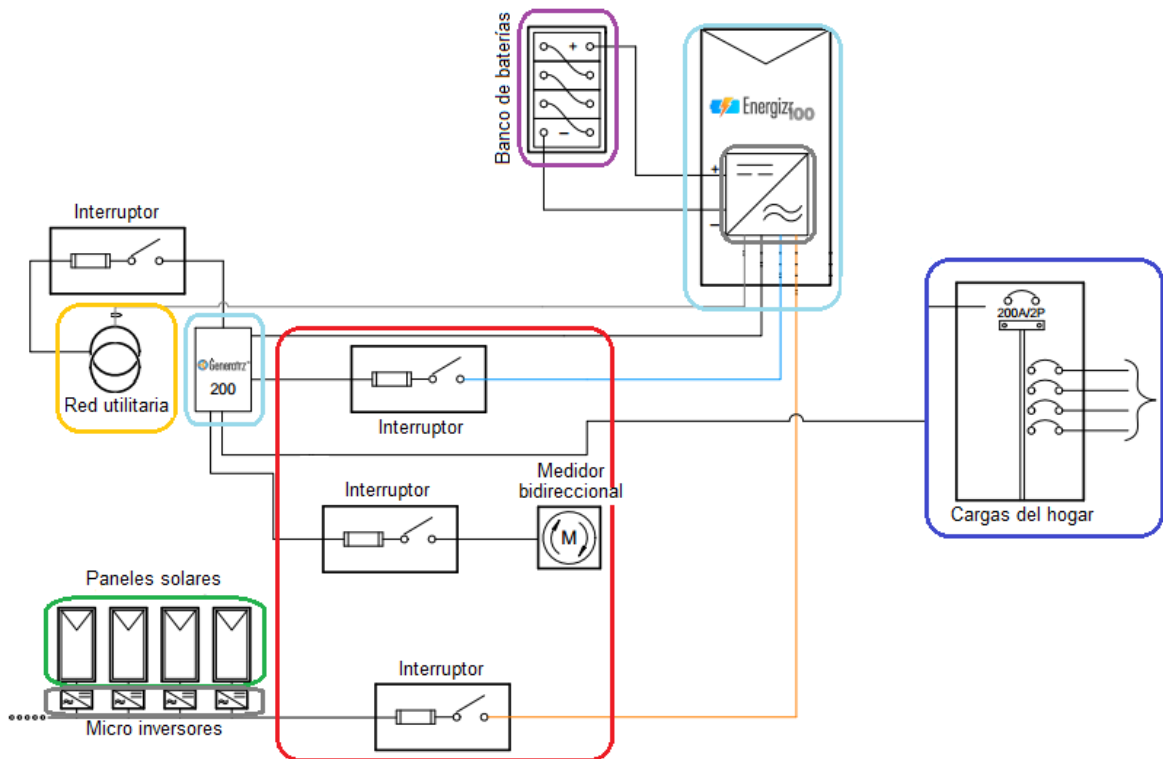
La compañía JLM Energy cuenta también con diagramas específicos dependiendo de los requerimientos de cada comprador, donde se muestra la conexión del sistema de energía renovable (paneles fotovoltaicos) con los micro inversores, también las baterías del sistema de almacenamiento con su respectivo sistema gestor, la red utilitaria en caso de requerir sus servicios, y los debidos interruptores junto al medidor inteligente, de esta manera con el sistema de monitoreo y gestión de toda la micro red y con todas las conexiones necesarias, hacer posible el abastecimiento de todas las cargas del hogar y el realizar el buen funcionamiento de la micro red (ver figura 9).

Figura 8. Diagrama en bloques de la micro red Gridz de JLM Energy.



Fuente: Modificada de [85], febrero de 2016.

Figura 9. Diagrama eléctrico de un Gridz de JLM Energy.



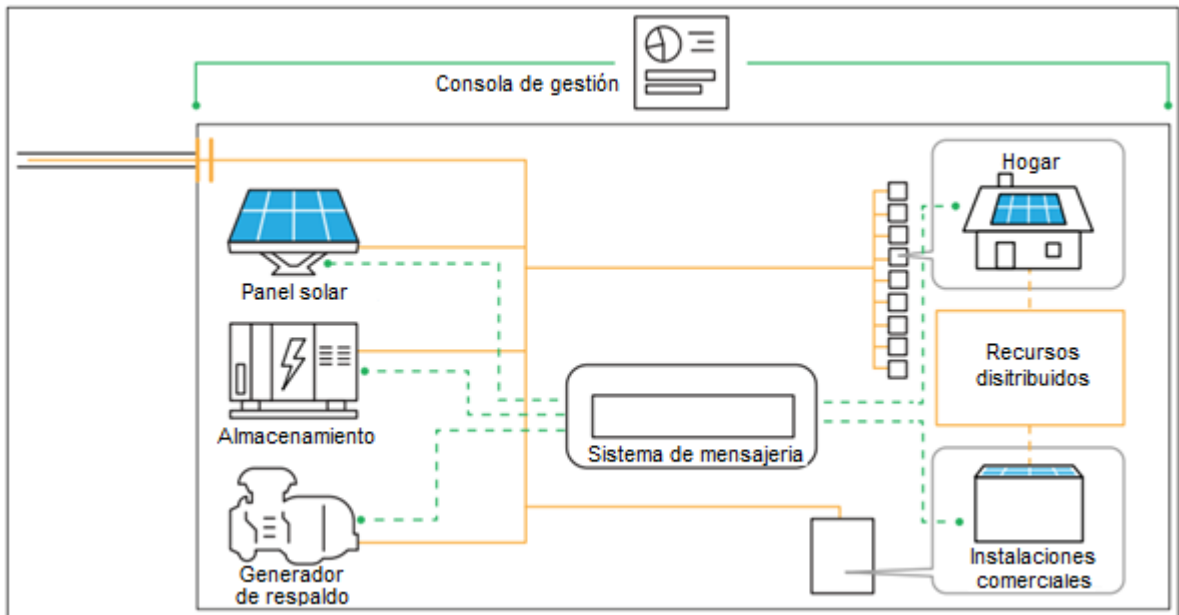
Fuente: Modificada de [86], febrero de 2016.

2.2.1.2. MICRO RED *GRIDLOGIC* [87]

La micro red *GridLogic* de la empresa SolarCity es un sistema escalable de energía que utiliza recursos distribuidos para suplir las necesidades locales, puede

operar en conjunto con la red de suministro eléctrico o de manera independiente. Se busca obtener el mayor beneficio posible con la mejor tecnología. Los principales beneficios son, el uso de energía limpia para el ambiente y los usuarios, la reducción de los costos de energía y una arquitectura que permite fiabilidad. *GridLogic* es una solución escalable compuesta por diferentes módulos para realizar el control total del sistema (ver figura 10), cada uno de estos se describe brevemente con sus componentes (ver tabla 3).

Figura 10. Diagrama de arquitectura de la micro red GridLogic de SolarCity.



Fuente: Modificada de [87], febrero de 2016.

Tabla 3. Descripción de los módulos de la micro red GridLogic de SolarCity.

A. Módulos de recursos energéticos y distribuidos	
Panel fotovoltaico	La micro red hace uso de este tipo como fuente primaria de generación para ofrecer servicios de calidad a precios factibles para el usuario. Cada panel fotovoltaico está equipado con un inversor inteligente.
Manejo de exceso de energía	Componente clave para una red sostenible, se cuenta con una batería la cual almacena durante los periodos de exceso de generación y proporciona energía cuando la demanda lo requiere, SolarCity hace uso de la batería de iones de litio de Tesla Motors debido a su avanzada tecnología y alta seguridad.
Administración de cargas	<i>GridLogic</i> es capaz de optimizar los costos de la red mediante la gestión del consumo no crítico en los hogares, hace uso de OpenADR, sistema de normas desarrollado para la gestión de energía con el fin de

	apagar dispositivos de alta carga durante periodos de alta demanda.
Electrónica de potencia	Se cuenta con medidores inteligentes y un sistema de control de potencia para gestionar eficazmente la tensión y la frecuencia de manera bidireccional.
Pasarelas	SolarCity proporciona un equipo completo de medición de facturación y comunicación en tiempo real para los recursos distribuidos permitiendo una precisión de monitorización de hasta 99,8 %.
B. Módulo de arquitectura escalable	
Plataforma de comunicación	La micro red se encuentra equipada con una plataforma flexible y robusta que monitorea y gestiona todos los recursos distribuidos presentes en la red. Plataforma diseñada para otorgar seguridad, realizar un mejor monitoreo y controlar equipos. Los datos son tomados a partir de algoritmos de control dinámicos con los que se cuenta. Este tipo de comunicaciones se realiza de manera alámbrica como también inalámbrica.
Recursos de energía distribuida	La red integra generación a partir de energías renovables, como también tiene una generación convencional (micro-turbinas, fósiles), y cargas controlables que suplen las necesidades de un hogar o una comunidad. Las soluciones de predicción dinámicas y control de la micro red, maximizan el ahorro de la energía tanto en modo isla como en modo de operación normal con la red convencional.
C. Módulos software de algoritmos de control y gestión	
Teoría Fractal	Son sistemas complejos creados tras la repetición de un simple sistema a escala, que dependen del detalle con el que analiza el macro sistema. La micro red está construida sobre los conceptos de la teoría fractal con nodos y conexiones, donde cada nodo incluye cargas y recursos optimizados localmente. Cada nodo puede ser autónomo, así como también operar en cooperación con el sistema macro.
Jerarquía inteligente distribuida	La micro red incorpora inteligencia en cada uno de los diferentes nodos y niveles de la red. Cada nodo incluye esto para trabajar autónomamente o también a través de señales enviadas por el control central. Al aplicar jerarquía inteligente distribuida, el control es cada vez más robusto y se resuelven nuevos retos de optimización.
D. Módulos de monitoreo y control	
Monitoreo PowerGuide	La micro red es propietaria de PowerGuide, un sistema que utiliza un nuevo nivel de equipos monitoreo y medición, para recolectar en tiempo real y de forma

	individual el consumo de la red y los valores de generación. Esta información es utilizada para hacer ajustes a la red en tiempo real, como también predicción y monitoreo del rendimiento de todo el sistema con un día de antelación.
Sistema de control <i>GridLogic</i>	Este sistema de control utiliza una combinación de inteligencia distribuida y coordinación central para optimizar y controlar las operaciones de la micro red. El control del sistema emplea condiciones a lo largo de la red en tiempo real con predicción dinámica de los recursos y cargas para crear esquemas ajustables maximizando el ahorro de energía.
Consola de gestión <i>GridLogic</i>	La consola colecta, agrega y muestra medidas fundamentales del rendimiento de cada nodo de la micro red. La consola provee visualización para monitoreo de la generación, consumo, voltaje, frecuencia y calidad de potencia en tiempo real analizando el rendimiento de la micro red.

Fuente: Modificada de [87], junio de 2016.

Los módulos mencionados anteriormente permiten obtener ciertas funcionalidades en la micro red *GridLogic*, cada una se describe a continuación.

Gestión de la energía: a través de la combinación de inteligencia distribuida y control centralizado, la micro red continuamente optimiza el despacho de los recursos y el consumo de las cargas, con el fin de maximizar el ahorro en consumo de energía. La producción de energía en la micro red es balanceada frente a los costos que registra la energía proveniente de la red tradicional donde se prioriza el menor costo.

Control de Frecuencia: el control de frecuencia es provisto por los generadores activos que utilizan cualquier modo asíncrono que permite el control del generador de respuesta a las condiciones variables de las cargas, esto se realiza de manera continua y automática.

Gestión de potencia reactiva y del voltaje: asegura la calidad de potencia suministrada con valores regidos por estándares técnicos de la ANSI. Para esto la micro red asegura la calidad del voltaje mediante el uso de voltajes dinámicos y la gestión de potencias reactivas, ambos automáticos y centralizados mediante un control de señales.

Modo isla y protección: en el evento de una falla de la red principal utilitaria, la micro ingresa automáticamente en un modo de trabajo aislado o en modo isla. Mediante esquemas de protección coordinados y un interruptor principal para la

entrada en operación aislada, la micro red continuará entregando electricidad generada o almacenada localmente. La micro red puede ser configurada permanentemente para trabajar en modo isla cuando se desee o solo para cuando se presenten fallas de la red principal.

Predicción dinámica: para optimizar económicamente la entrega de energía, se realiza una predicción dinámica de la generación y el consumo local, en términos actuales, a lo largo del día y para un día de antelación. Para asegurar la disponibilidad de los recursos y envío económico, el sistema continuamente ajusta las proyecciones basadas en el monitoreo de información en tiempo real y la historia del desempeño de la red para mejorar la predicción.

Plataforma usuario: se cuenta con herramientas móviles y web para enganchar y capacitar a los participantes de la micro red, mostrando el consumo en tiempo real y la generación de manera diaria, mensual o anual, estas aplicaciones también entregan información de facturación con una mejor experiencia para el usuario.

2.2.2. ESPECIFICACIONES DE MICRO RED COMPLETA

Teniendo en cuenta las dos micro redes comerciales anteriores, se abstraen los datos necesarios para la especificación de la micro red requerida en el proyecto, se describe en detalle cada uno de los módulos a continuación.

A. Módulos de recursos energéticos y distribuidos

— Sistema de generación (paneles fotovoltaicos)

La generación de energía renovable para el caso de esta micro red, es energía solar. El dispositivo adecuado para la obtención de energía eléctrica a partir del sol, es el panel fotovoltaico, el cual mediante un efecto fotovoltaico permite la conversión de la radiación solar en energía eléctrica. La corriente y potencia suministrada por un panel solar fotovoltaico son proporcionales o están relacionados directamente con la intensidad de la luz [88].

Teniendo en cuenta los anteriores aspectos, se opta por un panel Canadian Solar Module (CS6P-260) de celdas poli cristalinas debido a la alta calidad y eficiencia (16.16 %) que presenta. Debido a las características de este dispositivo, es ideal para las temperaturas y climas presentes en la zona tropical. El costo por unidad de un panel fotovoltaico con estas características es de \$691,581 pesos. Uno de los principales beneficios es su excelente desempeño a baja radiación y posee un valor nominal de potencia máxima de 260 Wp, para poder encontrar de manera teórica la cantidad energía que puede el panel generar durante un día [89]. Se

recomienda leer el Anexo A (ESPECIFICACIONES PANEL FOTOVOLTAICO CanadianSolar) para mayor información técnica del panel fotovoltaico.

Para calcular el número necesario de paneles fotovoltaicos que se requiere dentro del sistema, se calcula primero la cantidad de energía que un módulo fotovoltaico puede generar durante el día. Lo que se obtiene multiplicando el número de horas promedio de posible radiación solar (5 horas), por la capacidad de potencia máxima del panel fotovoltaico (Ecuación 3).

$$\text{Generación diaria/panel} = 5 \text{ horas} \times 0.26 \text{ KW} = 1.3 \text{ kWh} \quad (3) \quad [90][91]$$

A continuación, con los datos de consumo mensual en un hogar colombiano, se puede establecer el consumo promedio de energía eléctrica por estrato durante un día y de esta manera, encontrar el número de paneles requeridos para cada caso de micro red residencial (Ecuación 4), (ver tabla 4). Se debe tener en cuenta que para realizar un cálculo más riguroso de una ciudad en específico, las horas de radiación solar pueden variar debido a climas más calientes o templados, pero no se requiere dividir el cálculo por estaciones, debido a que Colombia es un país ubicado en la zona ecuatorial [91].

$$\# \text{ Paneles} = \frac{\text{Consumo diario}}{\text{Generación diaria/panel}} \quad (4)$$

Tabla 4. Número de paneles requeridos para una micro red en Colombia, dividida por estratos.

Estrato	Consumo mes (kWh)	Consumo día (kWh)	# Paneles
1	108	3.60	3
2	148	4.93	4
3	223	7.43	6
4	204	6.80	6
5	352	11.73	9
6	344	11.46	9

Fuente: De los autores con base en figura 7, enero de 2016.

— Tipo de inversor (micro inversores)

Los sistemas eléctricos de paneles fotovoltaicos generan electricidad en corriente continua, para su almacenamiento en una batería y ser utilizados para ejecutar aplicaciones dentro de una micro red, es necesario conectar también el sistema a un inversor para cumplir con todas las necesidades eléctricas de un hogar.

Los inversores son dispositivos usados para convertir la corriente directa generada por paneles fotovoltaicos a corriente alterna, un micro inversor convierte la

corriente de un solo módulo fotovoltaico con una eficiencia de hasta el 97.3 % [92]. La salida de varios micro inversores se combina y optimiza la potencia, debido a que su principal ventaja es no reducir la energía de toda la red, en caso de un fallo en un módulo fotovoltaico y extrae la máxima potencia de cada panel, minimizando el efecto de sombra.

El micro inversor es de reducidas dimensiones y se instala en cada panel fotovoltaico. La energía del sol es captada por los paneles fotovoltaicos, estos canalizan la electricidad hacia el inversor situado en la parte posterior de cada uno de los paneles; la función de los micro inversores en fase es la de transformar la energía de corriente directa a corriente alterna con voltaje de 120 VAC, que es la electricidad habitual en las viviendas en Colombia. El Enphase®M215 del mejor fabricante en tecnologías de micro inversores, con un precio de \$364,060 pesos, posee una alta capacidad de corriente para cargas difíciles, no posee pérdidas en la productividad (desajustes causados por la interconexión de los módulos solares, al no tener condiciones idénticas que los demás, ya que la salida del sistema con un inversor central, se determina por el panel de condiciones más bajas), también opera de manera bidireccional, es de mantenimiento sencillo, sistema simplificado, fácil instalación y está diseñado para operar con terminales de batería para poder mejorar el sistema [92]. Para información más específica del micro inversor, remitirse al Anexo D (MICRO INVERSOR Enphase®M215).

A pesar del costo inicial que se requiere para la instalación de los micro inversores a comparación con un inversor central, la garantía, instalación y mantenimiento, aseguran un menor costo total a largo plazo. También se puede tener en cuenta en caso de un daño, cada inversor está conectado en paralelo por lo que no afecta a ninguno y se requerirá del desmonte de un solo panel y no del circuito total [90].

— Manejo de energía en exceso (baterías)

La compañía Tesla Motors con su filial Tesla Energy diseña una batería llamada Powerwall de litio-ion con control térmico líquido (radiador) para el almacenamiento de energía [93], especialmente para aplicación de tipo residencial con buenas características y durabilidad, por este motivo es conveniente usarla en la micro red.

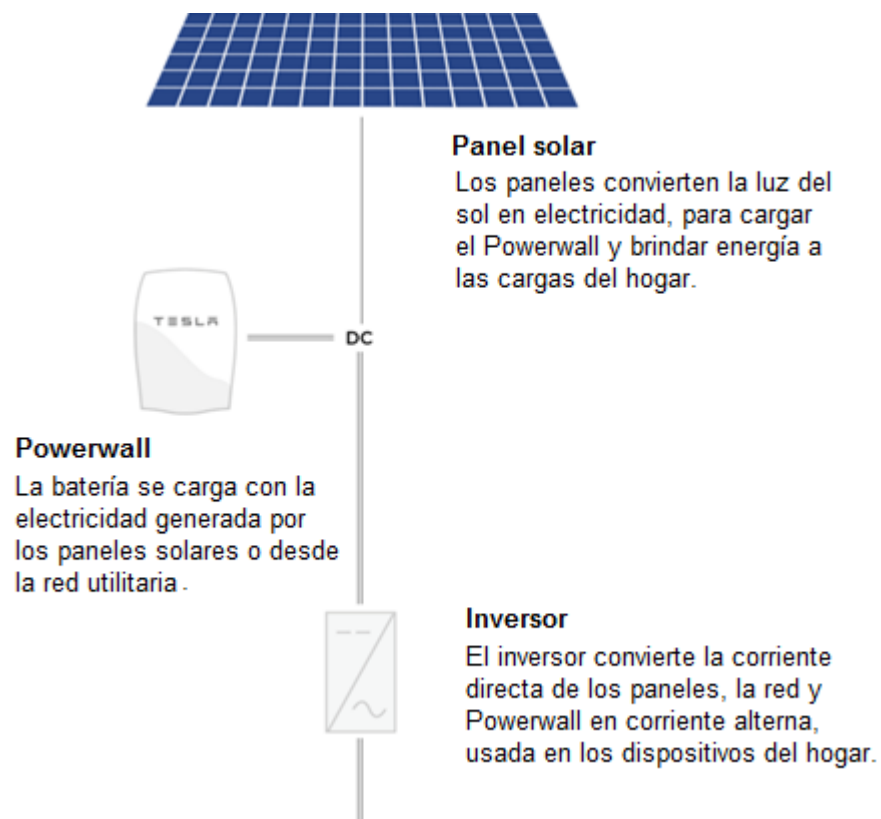
Powerwall se puede recargar a partir de energía generada por los paneles fotovoltaicos como también desde la red tradicional. Una Powerwall permite respaldar la red eléctrica del hogar en caso de corte de energía, soportando varias cargas que son de uso residencial esencial en estos casos. La capacidad energética para la Powerwall de ciclo diario es 7 kWh, la cual trabaja en paralelo con el sistema de energía fotovoltaica instalado, también existe Powerwall de

respaldo de 10 kWh que trabaja únicamente en caso de desconexión de la red o modo isla de la micro red, esta tiene un ciclo para recargar de 50 días, las dos permiten su instalación en serie para aumentar la capacidad y confiabilidad energética en el hogar [93].

La batería brindan una eficiencia del 92 %, con una potencia nominal de 3.3 kW, el rango de tensión de trabajo se encuentra entre los 350 a 450 V pero los sistemas actuales trabajan con 48 V y una corriente de 9.5 A. El precio de la Powerwall está en \$ 8'769,000 pesos la versión de descarga y carga diaria, mientras la versión de respaldo tiene un costo de \$ 2'192,250 pesos más que su otra versión [94].

Un típico sistema Powerwall incluye paneles fotovoltaicos, un inversor para convertir la electricidad entre DC a AC, un medidor para mostrar la carga de la batería y de ahí poder desplegar aplicaciones (ver figura 11). Se debe tener en cuenta que el inversor a utilizar debe soportar la potencia de 3.3 kW de la batería por lo que generalmente se hace uso de uno en específico, del inversor SE3000A-US de la empresa SolarEdge [95], el cual también permite una corriente de entrada de 9.5 A, ideal para el funcionamiento de la batería, sin embargo esto representa un costo elevado para la micro red de \$ 3'709,287 pesos [96].

Figura 11. Configuración general del sistema Powerwall de Tesla Energy.



Fuente: Modificada de [94], febrero de 2016.

La instalación de Powerwall conectada a un sistema de energía fotovoltaica permite soportar múltiples cargas en el hogar, dispositivos que no acarreen unos picos altos de corriente durante un tiempo prolongado. También permite reducir la curva de la demanda de energía, todo esto es posible mediante la aplicación de un sistema gestor el cual pueda tomar decisiones sobre el manejo de la energía en toda la red, decidiendo los dispositivos a almacenar dependiendo de la cantidad de energía generada o el precio de la misma, o cuales dispositivos finalmente deben ser apagados debido a la exigencia y posterior daño que pueden generar al sistema [93].

— Dispositivo conmutador eléctrico

Para realizar el manejo de la energía dentro de la micro red, se requiere de un dispositivo interruptor que permita controlar el paso de la energía hacia las diferentes cargas en la micro red, este direcciona la energía generada desde los paneles fotovoltaicos hacia las baterías, cargas y la red utilitaria. Para esto, se hace uso de un conmutador eléctrico, que está compuesto por contactores electromecánicos, los cuales se encargan de realizar la conexión o desconexión de la línea eléctrica hacia determinado punto de la micro red. Para la activación de los contactores es necesario generar y enviar impulsos eléctricos que conmuten el estado en que se encuentra el contactor. Para diseñar el conmutador eléctrico se debe tener en cuenta la potencia máxima con la que se trabaja dentro de la micro red, para evitar sobrecargas y daños en los mismos, un contactor eléctrico tiene un precio de alrededor de \$17,538 pesos [97], depende de la micro red del número requerido.

— Tipo de medidor (medidor bidireccional) [98]

Para completar el diagrama de la micro red, se requiere de un medidor inteligente bidireccional, elemento que permite digitalizar y enviar la medida del consumo de una vivienda, por otra parte puede medir y guardar el dato de la cantidad de energía que en determinado momento el hogar exporta hacia la red convencional. Los medidores inteligentes pueden asegurar una mejor medida en el promedio de consumo o producción de energía, a su vez impiden la alteración de los valores de consumo, lo cual representa un menor número de pérdidas monetarias para las empresas generadoras de energía.

El medidor inteligente Corinex Smart Meter Module es un dispositivo capaz de obtener una dirección IP, lo que significa que puede tener una conexión directa a internet y por ende a una base de datos remota, esta conexión se da mediante la conexión a la red de bajo voltaje de un hogar, es decir las líneas eléctricas tendidas a lo largo de la edificación, donde la información es modulada y enviada

en una portadora con una frecuencia entre 2 MHz a 12 MHz de oscilación. Este contador cuenta además con módulos tipo Plug-and-Play los cuales expanden el área de medición, lo que serviría para la toma de diferentes medidas en diferentes puntos de generación o consumo del hogar.

Corinex Smart Meter realiza funciones básicas como el cálculo del consumo en kWh, el precio de facturación e intervalos de registro de datos, los cuales se guardan hasta durante un año en la memoria no volátil del dispositivo. Además, puede realizar operaciones de conexión o desconexión a la red convencional remotamente y posee la habilidad de comunicarse con diferentes dispositivos ubicados en el hogar como lo son termostatos y controladores de cargas.

B. Módulo de monitoreo y control

El sistema gestor de la micro red monitorea en tiempo real el estado de todos los equipos, de acuerdo a los requisitos de funcionamiento para mantener la red segura y estable. Se cuenta con una interfaz de usuario para mostrar la información de operación de la micro red, a través del software Matlab, plataforma y entorno de desarrollo que puede diseñar sistemas con un lenguaje de programación gráfico, el cual tiene la capacidad de interactuar con aplicaciones como Matlab/Simulink, de esta manera hacer posible la comunicación con el usuario en tiempo real [99].

Para realizar la gestión del sistema se cuenta con recursos de energía distribuida y algoritmos de control dinámicos centralizados donde se toman los datos de monitoreo y localmente se determinan actividades usando un sistema de toma de decisiones inteligente, se toman también los datos de predicción de los recursos distribuidos y de las cargas, de esta manera se envían señales a los recursos para maximizar el ahorro de energía y reducir el costo de esta en la micro red, en el siguiente capítulo se describen de manera más detallada las señales de la micro red y el sistema de toma de decisiones inteligente.

De lo anterior se puede extraer la información necesaria para obtener las especificaciones técnicas de la micro red y mostrar de una manera resumida el modelo completo (ver tabla 5).

Tabla 5. Especificaciones para la micro red modelo completo.

MICRO RED	
Generación	
Panel fotovoltaico	Canadian Solar Module CS6P-260
Angulo de inclinación	10°-15°
Potencia nominal	260 Wp
Voltaje de operación	30.4 V

Corriente de operación	8.56 A
Temperatura	-40°C a 85°C
Precio	\$691,581 pesos
Inversor	
Micro inversor	Enphase®M215
Potencia de entrada/salida	190-270/ 225 W
Voltaje máximo DC	48 V
Voltaje AC	208 VAC
Frecuencia nominal	60 Hz
Eficiencia	96.5 %
Precio	\$364,060 pesos
Sistema de almacenamiento	
Batería	Powerwall de Tesla
Tipo de batería	Litio
Potencia	3.3 kW
Voltaje	48 V
Corriente	9.5 A
Capacidad energética	7 kWh
Eficiencia	92 %
Precio batería	\$8'769,000 pesos
Precio inversor SolarEdge SE3000a-us	\$3'709,287 pesos
Electrónica de potencia	
Medidor bidireccional	Corinex Smart Meter Module
Comunicación	IP, IEEE 802.3
Almacenamiento	4 MB
Potencia de transmisión	-50 dBm/Hz
Frecuencia	2-12 MHz
Precio	\$221USD
Conmutador eléctrico	Arreglo de contactores
Precio	\$17,538 pesos
Mano de obra	
2 personas	\$29,230 pesos/Hora
2 días de instalación	\$467,680 pesos

Fuente: Del autor, febrero de 2016.

2.2.3. ESPECIFICACIONES MICRO RED REDUCIDA

La micro red del modelo reducido cuenta con casi las mismas características anteriormente presentadas en 2.2.2, debido a que estas son las mejores partes y funcionalidades en cuanto a costo-beneficio para el usuario, donde el único recurso no favorecedor es la batería dentro del sistema de almacenamiento, debido a que esta tiene un valor alto referente al precio, donde en el mercado es posible encontrar baterías similares con excelentes características a un menor precio. También se debe tener en cuenta que no se requiere de un inversor en

específico en otras baterías, donde el precio de la micro red también reduce. De esta manera se tienen a continuación los detalles de una batería de buena calidad y mejor precio para los hogares en Colombia.

La batería de 12 voltios de la empresa Kanglida de China, es utilizada para sistemas solares, batería de tipo gel con una capacidad nominal de 200 Ah equivalente a 2.4 kWh, de tecnología segura y eficiente [100]. Dependiendo del consumo diario en un hogar (ver tabla 1) se incrementa el número de baterías necesarias, con un número máximo de 4 en serie para poder ser soportado por un inversor con potencia de entrada de hasta 48 V.

Para complementar el sistema de almacenamiento se requiere de un medidor para mostrar el estado de carga de la batería, se cuenta con un producto de MIDNITE SOLAR INC. capaz de medir voltaje de hasta 48 V, permitiendo realizar de una correcta manera la gestión de energía eléctrica en la micro red [101].

De lo anterior se puede extraer la información necesaria para obtener las especificaciones técnicas de la micro red y mostrar de una manera resumida el modelo reducido (ver tabla 6).

Tabla 6. Especificaciones de la micro red modelo reducido.

MICRO RED	
Generación	
Panel fotovoltaico	Canadian Solar Module CS6P-260
Angulo de inclinación	10°-15°
Potencia nominal	260 Wp
Voltaje de operación	30.4 V
Corriente de operación	8.56 A
Temperatura	-40°C a 85°C
Precio	\$691,581 pesos
Inversor	
Micro inversor	Enphase®M215
Potencia de entrada/salida	190-270/ 225 W
Voltaje máximo DC	48 V
Corriente máxima DC	15 A
Voltaje AC	208 VAC
Frecuencia nominal	60 Hz
Eficiencia	96.5 %
Precio	\$364,060 pesos
Sistema de almacenamiento	
Batería	Kanglida
Tipo de batería	Gel
Voltaje	12 V
Corriente	200 Ah (10 horas)

Capacidad energética	2.4 kWh
Precio	\$531,986 pesos
Medidor de SOC	MIDNITE SOLAR INC.
Precio	\$184,149 pesos
Electrónica de potencia	
Medidor bidireccional	Corinex Smart Meter Module
Comunicación	IP, IEEE 802.3
Almacenamiento	4 MB
Potencia de transmisión	-50 dBm/Hz
Frecuencia	2-12 MHz
Precio	\$645,983 pesos
Conmutador eléctrico	Arreglo de contactores
Precio	\$17,538 pesos
Mano de obra	
2 personas	\$29,230 pesos/Hora
2 días de instalación	\$467,680 pesos

Fuente: Del autor, febrero de 2016.

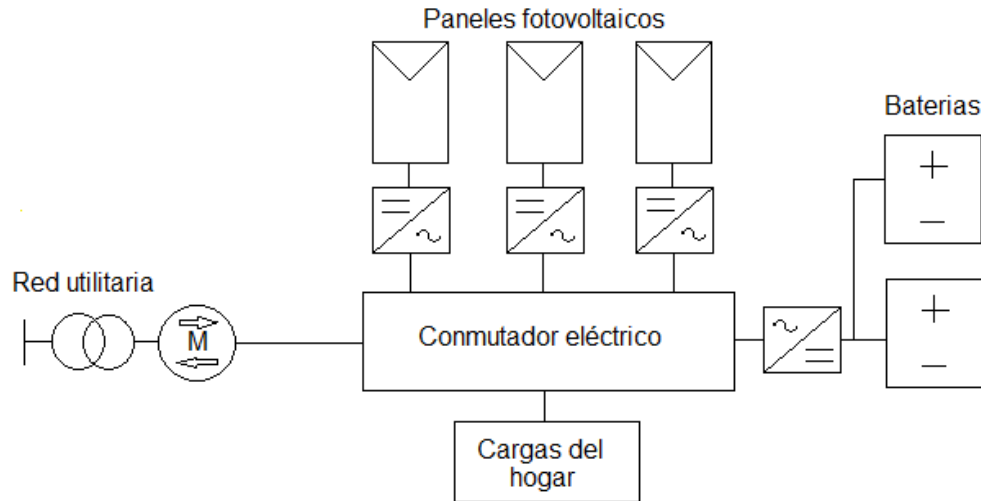
Para el caso de estudio se toma un hogar ubicado en la ciudad de Popayán, Colombia de un estrato 4, y que presenta un consumo energético promedio al día de 4kWh, promedio característico para una familia conformada por 4 personas, las cuales hacen uso de diferentes tipos de electrodomésticos dentro del hogar, dependiendo de las horas del día se hace uso de los 18 bombillos, en su mayoría de tipo incandescente, de consumo entre 60 y 100 Watts, 4 televisores en su mayoría entre 32 a 50 pulgadas, un refrigerador de 12 pies cúbicos, un calentador de agua eléctrico, una plancha de 1000 Watts de consumo y una lavadora de 18 libras. Debido a la temperatura ambiente promedio es de 19 °C, no se tiene en cuenta el uso de equipos electrónicos como ventiladores o aires acondicionados dentro de los hogares [102].

Teniendo en cuenta todos los componentes obtenidos para la micro red reducida y las especificaciones del caso de estudio, se diseña un diagrama eléctrico para la micro red propia, donde se aprecia la forma en que los dispositivos se encuentran distribuidos, cada una de las conexiones necesarias para abastecer el consumo del hogar y obtener un buen funcionamiento del sistema. Se realiza el diagrama para un hogar de consumo promedio al día de 4 kWh, es por esto que se requiere de tres paneles, ya que cada uno de ellos puede generar al día un máximo de 1.3 kWh, a cada panel se conecta un micro inversor, cada batería tiene una capacidad de 200Ah multiplicado por los 12V de tensión nominal, se obtiene una capacidad máxima de 2.4 kWh, por tanto, se requiere de dos baterías para poder almacenar la energía, estas también se conectan a un inversor, la red utilitaria se conecta a la micro red por medio del conmutador eléctrico el cual conecta cada uno de los

dispositivos anteriores a través de contactores a las cargas del hogar para brindarles energía, finalmente se conecta el medidor bidireccional inteligente que envía la información de la micro red al área de monitoreo y control para el correcto funcionamiento del sistema (ver figura 12).

Se calcula el precio total del costo de la micro red, con las características descritas anteriormente y teniendo en cuenta los precios de cada uno de los componentes (ver tabla 6), se requiere de 3 paneles (\$2'074,745 pesos), 4 micro inversores (\$1'456,238 pesos), 2 baterías (\$1'063,972 pesos), 1 Medidor de SOC (\$184,149 pesos), 1 medidor bidireccional (\$645,983 pesos), 4 contactores (\$70,152 pesos) para el conmutador eléctrico y la mano de obra (\$467,680 pesos), se calcula un total de \$5'962,920 pesos del costo de equipos y mano de obra.

Figura 12. Diagrama eléctrico de la micro red reducida.



Fuente: De los autores, mayo de 2016.

3. MODELO DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Después de analizar los ejemplos comerciales de micro redes en 2.2.1, obtener las especificaciones técnicas de los componentes y ciertas funcionalidades de la micro red en 2.2.2, se procede a obtener las especificaciones para el área de control y monitoreo. De esta manera, en el presente capítulo a partir diez (10) modelos de gestión de energía eléctrica reportados en la literatura científica, se proponen las variables con sus respectivos rangos y reglas para realizar el sistema de toma de decisiones de la micro red del presente trabajo de grado. Finalmente se agrupa la información anterior para organizar un diagrama de flujo, de esta manera entender claramente el sistema de toma de decisiones propuesto. A partir de este momento cuando se haga referencia al sistema se debe entender que es al sistema de toma de decisiones.

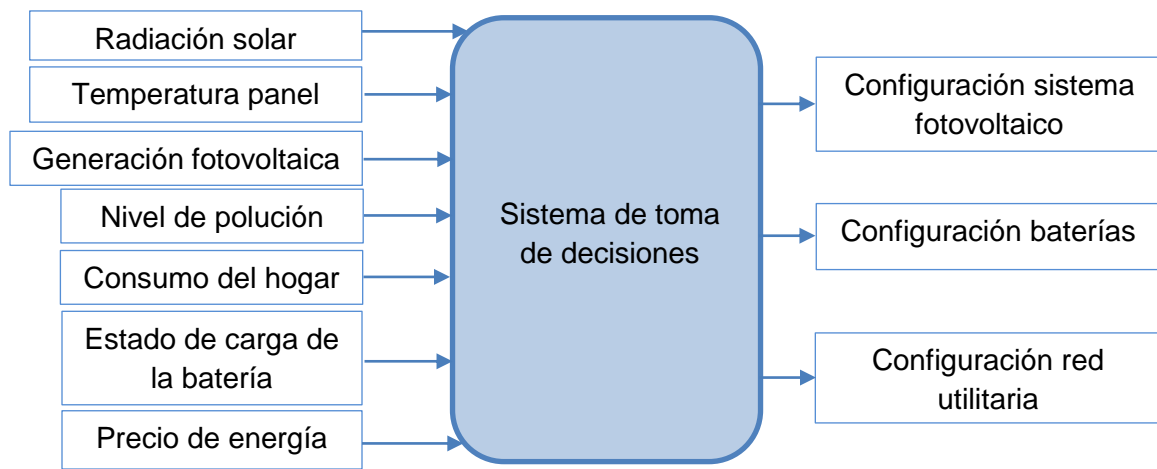
3.1. VARIABLES DE MODELOS DE GESTIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Los modelos de gestión de energía eléctrica reportados proponen una serie de variables de entrada y reglas a utilizar con diferentes métodos de procesamiento para determinar configuración óptima de la micro red. Generalmente toman en cuenta como primera medida o variable principal la generación fotovoltaica de energía junto al consumo de energía del hogar [68][103][104][71], miden el nivel de radiación solar y la temperatura de los paneles para obtener gráficas de predicción de generación fotovoltaica [67][64], tienen en cuenta el nivel de contaminación del aire [77], consideran las variaciones del consumo residencial durante el día [71][67][64], el estado de carga de la batería [68][105][71][106][66] y en pocos casos la fluctuación del precio de energía [71][65]. Teniendo en cuenta estas variables, los modelos determinan la configuración del sistema, donde se identifica si la energía fotovoltaica se inyecta o no a la baterías o la red tradicional, entre otras configuraciones, esta configuración se envía al conmutador, quien realiza las conexiones de la micro red [68][104][105][71] (ver figura 13). A continuación se abordan cada una de las variables de entrada y de salida identificadas en los sistemas de tomas de decisiones reportados:

La variable generación fotovoltaica de energía es cambiante debido a su dependencia del clima, para realizar un mejor control y obtener un pronóstico acertado dentro del sistema se requiere de sensores con el fin de medir la radiación solar y la temperatura de los paneles [103], de esta manera usar algoritmos que ayudan a predecir la variable generación fotovoltaica. Los valores de radiación solar varían entre 400 W/m^2 y $1,000 \text{ W/m}^2$, la temperatura que es capaz de soportar un panel es de 5°C hasta 65°C , los óptimos para la generación fotovoltaica son temperatura de 25°C y radiación de 1.000 W/m^2 [106][105], se usan métodos especializados [107] para la predicción de esta variable

dependiendo del estado actual de temperatura y la radiación, también es recomendable hacer esta predicción para compensar las variaciones de voltaje dentro de la micro red [108]. Por otra parte, la generación fotovoltaica en algunos modelos [71][72] se analiza de acuerdo a periodos de tiempo, es decir, el valor de la variable se puede obtener a partir de medidores donde el sistema toma el valor actual de generación fotovoltaica, estos datos son almacenados para obtener una generación promedio e histórica, de esta manera tener una predicción del comportamiento de la micro red con base a la generación fotovoltaica histórica.

Figura 13. Entradas y salidas de los sistemas de toma de decisiones reportados.



Fuente: De los autores, abril de 2016.

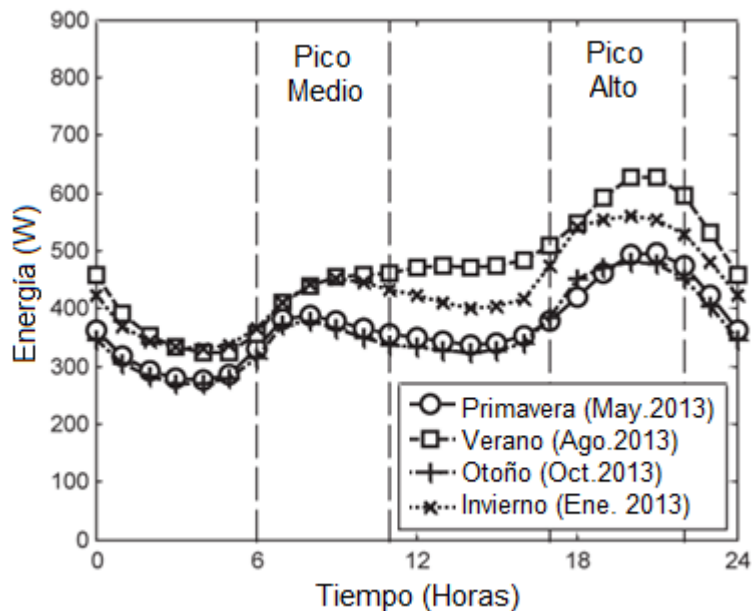
Se considera el nivel de polución de la ciudad donde se encuentra ubicada la micro red, para encontrar el posible rendimiento de la generación fotovoltaica dependiendo de la acumulación de suciedad en los paneles solares [77], de esta variable depende la predicción de generación de energía fotovoltaica, ya que el rendimiento de un panel con mayor nivel de polución es hasta un 6.5 % menor que el de un panel limpio [109]. Esta variable se determina por la concentración de PM10¹ en el aire, se mide en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y no tiene un valor límite, depende de la contaminación de la ciudad. Ninguno de los modelos de gestión de energía estudiados tiene en cuenta esta variable para su sistema de toma de decisiones, sin embargo es de importancia para la micro red, ya que la cantidad de generación fotovoltaica varía dependiendo del nivel de polución.

¹PM10: el material particulado se refiere a las pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen, dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro es menor que 10 μm . Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados entre otros, y material orgánico asociado a partículas de carbono [110].

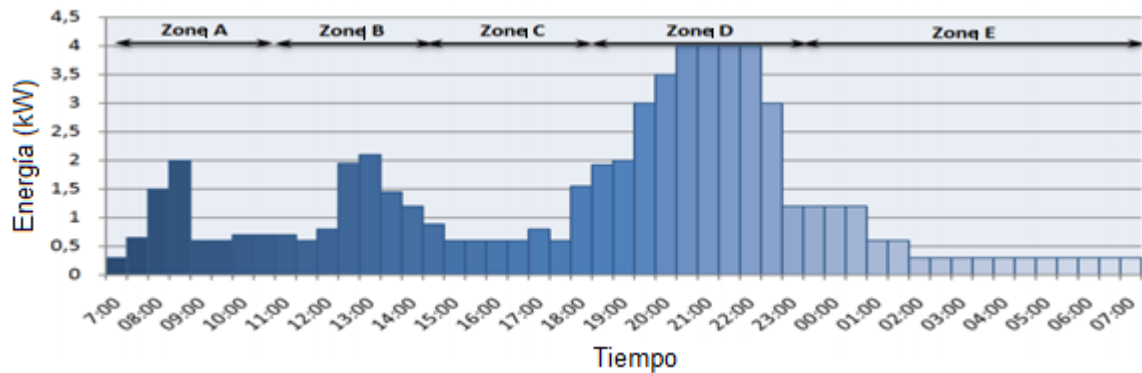
Las variaciones del consumo de energía dentro de una vivienda también se tienen en cuenta como una variable de importancia en el sistema de toma de decisiones, llamada consumo del hogar, en general los modelos de gestión se basan en el comportamiento de la demanda de energía del usuario, ya que depende de la comparación entre la generación fotovoltaica y el consumo del hogar, que decisiones se toman dentro de la micro red. Es difícil obtener una predicción instantánea del consumo, es por esto que el comportamiento de la demanda se obtiene a partir de datos históricos del consumo de un determinado hogar [104], o a través de la toma de datos provenientes de los sensores y que posteriormente son almacenados en una base de datos dentro de la micro red, el análisis se realiza generalmente cada hora y si es requerido se divide el comportamiento dependiendo de la estación del año o en días soleados o nublados (ver figura 14a) [71]. Para entender de una mejor manera la variable consumo del hogar, se realizan gráficas divididas en periodos de tiempo, generalmente cada hora se mide esta variable y se registran los datos (ver figura 14b), donde la variable dependiente se mide en kW, de esta manera es posible encontrar los picos de consumo durante las horas tempranas de la noche, sin embargo la gráfica varía dependiendo de las condiciones meteorológicas, días festivos, entre otros [64]. Es conveniente definir periodos de demanda, por ejemplo, pico bajo, medio o alto, permitiendo un fácil procesamiento al sistema al acotar la variación de consumo del hogar, de esta manera solo realizar una decisión dependiendo del periodo de tiempo en el que se encuentre el sistema [67].

Figura 14. Curvas explicativas de la variable consumo del hogar.

(a) Curvas del consumo del hogar por estaciones en Corea del Sur.



(b) Curva de predicción del consumo en un hogar en Francia.



Fuente: Modificada de [71] y [64], abril de 2016.

El estado de carga de la batería (*state of charge* por su término en inglés), es una variable de cambio continuo debido a que el sistema de almacenamiento de energía debe ser alternado al proveer energía hacia las cargas ubicadas en el hogar o por el contrario permitiendo el almacenamiento de energía en las baterías para un posible uso de la energía almacenada en momentos de mayor demanda [68]. El estado de carga varía desde un valor mínimo de 10 % del total de energía posible a almacenar, hasta un valor máximo de 90 %, con el objetivo de maximizar la vida útil del sistema de almacenamiento [108], evitando posibles sobrecargas o descargas muy profunda que pueden causar daños permanentes dentro de la batería. Existen algoritmos que evalúan constantemente el porcentaje de carga de las baterías para efectuar procesos determinados dependiendo del estado de carga de la batería [105][66]. Existen otros métodos que utilizan grupos de arreglos o agrupaciones de baterías, es decir se realiza una división en grupos del sistema de almacenamiento algunos dependiendo del tipo material del cual están contruidos [111], con el fin de controlar de una manera más exacta las diferencias de cargas de cada grupo de baterías y así obtener un mejor rendimiento, confiabilidad y eficiencia en el sistema de almacenamiento [103].

Es importante para el sistema conocer si las baterías se encuentran en proceso de carga, descarga e incluso si están simplemente aisladas para mantener la carga para el momento en que se necesite [75]. Algunos sistemas de toma de decisiones hacen uso de “tokens” o banderas que indican el proceso que se está llevando a cabo con el sistema de almacenamiento, para así coordinar de manera acertada si el sistema está ofreciendo energía o por el contrario esta almacenando, y no permitir que estas dos condiciones se den al tiempo lo cual podría generar daños en la batería [112].

La variable precio de energía (pagada por el usuario) dentro de los modelos de gestión de energía reportados, no tiene una alta relevancia en sus sistemas de

toma de decisiones como las variables previamente abordadas. En [69][105] la variable precio de energía se utiliza para enviar energía desde la micro red hacia la red utilitaria durante las horas del día donde este es alto, sin tener en cuenta las otras variables para un mejor desempeño, es decir, no solo enviar energía cuando hay exceso sino tener en cuenta el consumo del hogar y el estado de carga de las baterías en el momento para una óptima configuración del sistema y de esta manera obtener más beneficios, por otro lado en [71][65] se hace uso de esta variable para almacenar energía desde la red utilitaria en la batería cuando este precio es bajo pero no se involucran las demás variables, lo que es de gran importancia para una correcta toma de decisiones. Con esta variable también es posible encontrar el precio al cual se está consumiendo energía dentro del hogar durante un momento determinado, para realizar el cálculo total de la factura y encontrar el beneficio que se obtuvo en el sistema [104][67][106].

Dentro de los modelos de gestión de energía, después del análisis y procesamiento de las diferentes variables, se obtiene la información de qué hacer con la energía sobrante del sistema o la que hace falta dentro de la micro red, llamadas soluciones dentro del sistema [104], en algunos casos los resultados del sistema son la priorización de las cargas, es decir, dependiendo de las variables de entrada se decide que cargas se van a alimentar de acuerdo a la necesidad [66][113]. En otros casos teniendo en cuenta las variables de entrada mencionadas, se obtienen modos de operación de la micro red, es decir se envía la información al conmutador de como conectar los dispositivos, donde se plantea la forma en la que la energía generada de los paneles se dirige hacia las cargas, la batería o la red utilitaria, también se plantea si la batería entrega su carga a la micro red, o si se compra energía para suplir el consumo o cargar la batería por la falta de generación interna [68][105][71], es decir, la micro red tiene la capacidad de trabajar en un modo interconectado a la red utilitaria o autónomo, es decir, en modo independiente conocido como modo isla [75][114]. Es de resaltar que la utilización de modos de operación en el sistema es más adecuado, ya que permite obtener una respuesta de la configuración de la micro red de manera más clara.

3.2. ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DE LA MICRO RED

Dentro de los modelos de gestión de energía reportados es necesario analizar de forma más detallada la variable de salida, ya que representa la configuración que toma el sistema buscando la optimización de la micro red y de esta manera obtener un beneficio para el usuario. Se menciona cada uno de los modos presente en los artículos [68][104][105][71] con su respectiva descripción (ver tabla 7), como consiguiente se discuten cada uno de los aspectos de las diferentes salidas para encontrar la mejor respuesta al sistema de toma de decisiones propuesto.

Tabla 7. Modos de operación como salida de los modelos de gestión de energía reportados.

Artículo	Estado	Descripción
Versatile Power Transfer Strategies of PV - Battery Hybrid System for Residential Use with Energy Management System [68]	Modo I – (a)	La energía fotovoltaica es transferida a las cargas de la micro red y el excedente de energía es exportada a la red utilitaria.
	Modo I – (b)	La energía fotovoltaica suplente la demanda del hogar y la energía excedente carga las baterías.
	Modo I – (c)	El sistema transfiere la energía fotovoltaica y la energía almacenada en las baterías hacia la micro red y la red utilitaria.
	Modo II – (a)	Las baterías son cargadas por la red utilitaria.
	Modo II – (b)	La energía almacenada en las baterías es enviada hacia la micro red, y no se genera energía fotovoltaica.
	Modo III	Las baterías son cargadas por la red utilitaria cuando el estado de carga cae hasta un valor predefinido.
	Modo IV	La energía almacenada y la energía fotovoltaica es suministrada en totalidad a la micro red.
Energy flow management in grid connected PV systems with storage - A deterministic approach [104]	Modo I	La energía fotovoltaica generada suplente la demanda y el exceso es inyectado a la red utilitaria.
	Modo II	La energía fotovoltaica generada suplente la demanda y el exceso es utilizado para cargar las baterías.
	Modo III	La energía fotovoltaica generada suplente la demanda y el exceso es utilizado para cargar las baterías e inyectar energía a la red utilitaria.
	Modo IV	La energía fotovoltaica es transferida al hogar y la faltante es suministrada por la red utilitaria.
	Modo V	La energía fotovoltaica es transferida al hogar y la faltante es suministrada por las baterías.
	Modo VI	La energía fotovoltaica es transferida al hogar y la faltante es suministrada por la red utilitaria y las baterías.
	Modo VII	La energía fotovoltaica es transferida al hogar y la faltante es suministrada por la

		red utilitaria, al mismo tiempo carga las baterías.
Control and Energy Management of a Grid Connected Hybrid Energy System PV Wind with Battery Energy Storage for Residential Applications [105]	Modo I	El estado de carga de las baterías está entre el 50 y 90 %, la generación fotovoltaica satisface todas las cargas de la micro red.
	Modo II	Existe energía fotovoltaica excedente y es inyectada a las baterías de la micro red hasta que el estado de carga de las baterías se encuentre en 90 %, luego se envía a la red utilitaria.
	Modo III	El estado de carga de las baterías se encuentra entre el 35 y 50 %, se empieza a priorizar las cargas en la micro red.
	Modo IV	El estado de carga de las baterías se encuentra entre 25 y 35 %, las baterías se descargan, para prolongar la independencia de la red, se deben desconectar más cargas en la micro red.
	Modo V	La micro red debe solicitar energía proveniente de la red utilitaria y hacer priorización de las cargas.
	Modo VI	El estado de carga de las baterías llega al 90 %, se descargan y el excedente de energía producida es exportado hacia la red utilitaria.
Energy Management Based on the Photovoltaic HPCS With an Energy Storage Device [71]	Modo I	La red utilitaria suplente la demanda y carga las baterías durante la noche.
	Modo II	Se descargan las baterías que se encuentran entre 60 % y 85 % para proveer el consumo del hogar.
	Modo III	Las baterías son cargadas desde los paneles solares, y se conserva la carga para la hora pico de demanda.
	Modo IV	Se detiene cualquier operación con las baterías ya que se encuentran próximas a ser descargadas para aplanar el pico de demanda de la micro red.
	Modo V	Las baterías se descargan dándole toda la energía a la micro red hasta alcanzar un mínimo de 35 %, así aplanar la curva de demanda.

Fuente: De los autores, mayo de 2016.

En el Modo I de [105] se presenta un funcionamiento ideal dentro de la micro red, donde los valores de generación fotovoltaica y demanda de energía de la micro red coinciden, de esta manera se transfiere la energía fotovoltaica generada para suplir el consumo del hogar, teniendo en cuenta esto, se define en la micro red para el sistema de toma de decisiones el modo principal, Modo I (energía fotovoltaica generada transferida al hogar).

El Modo I – (b) de [68], Modo II de [104][105] y el Modo III de [71], coinciden en que la energía proveniente de los paneles, es decir, la energía fotovoltaica generada es utilizada para satisfacer el consumo de todas las cargas dentro de la micro red y a su vez se cuenta con un excedente de energía para cargar las baterías. Estos modos muestran un buen funcionamiento del sistema fotovoltaico, ya que existe una energía excedente, lo que representa una ventaja económica para el usuario, al cargar las baterías con energía fotovoltaica a menor precio y proveniente de una fuente limpia, a partir de esto, para el sistema de toma de decisiones propuesto se determina el Modo 2 (energía fotovoltaica generada transferida al hogar y a las baterías).

Según el Modo I – (a) de [68] y el Modo I de [104], la energía fotovoltaica es transferida a las cargas de la micro red y el excedente es inyectado a la red utilitaria, el Modo I – (c) de [68], Modo III de [104] y el Modo II de [105] también transfieren la energía fotovoltaica a la red utilitaria cuando las baterías se encuentran cargadas, la unión de estos conceptos es definido en el sistema como Modo 3 (energía fotovoltaica generada transferida al hogar y a la red utilitaria), solo se inyecta a la red utilitaria ya que previamente se cuenta con un Modo 2 donde se ha transferido primero la energía fotovoltaica a las baterías.

En [68] el Modo II – (b), en [104] el Modo V y en [71] el Modo II y V definen que la energía almacenada en las baterías es enviada a la micro red, ya que estas tienen carga suficiente y permiten aplanar la curva de la demanda. En el Modo IV de [68] la energía almacenada y la energía fotovoltaica suplen la totalidad del consumo del hogar. En los Modos IV y VI de [105] también se descargan las baterías y envían su energía almacenada al hogar, pero en el Modo IV la diferencia es que las cargas se empiezan a priorizar, es decir, se define a que cargas se les va a entregar energía y a cuáles no, en el Modo VI existe suficiente energía almacenada para suplir el consumo del hogar como también para exportar a la red utilitaria. Estos modos convergen en transferir la energía de las baterías hacia la micro red, en el caso del sistema propuesto no se necesita adicionalmente tener en cuenta la energía fotovoltaica debido a que ya se analizó en el Modo 1, tampoco se abordará la priorización de las cargas ya que se considera que va en contra con la calidad de la micro red y en ese caso es preferible la conexión a la red utilitaria, tampoco exportar la energía sobrante de las baterías a la red

utilitaria, ya que es preferible almacenar esa energía para un momento inesperado de mayor demanda, de esta manera se determina para el sistema el Modo 4 (energía almacenada en baterías transferida al hogar).

Cuando la micro red no es capaz de trabajar solamente con la energía fotovoltaica generada o con la almacenada en las baterías, se requiere de la energía presente en la red utilitaria, en el Modo IV de [104] la energía fotovoltaica es transferida al hogar y la faltante es suministrada por la red utilitaria, al igual que en el Modo VI donde la faltante aparte de suministrarse a través de la red utilitaria también proviene de las baterías, en el Modo V de [105] también se solicita energía externa a la micro red y se priorizan las cargas. De estos modos únicamente se tiene en cuenta el suministrar energía desde la red utilitaria, ya que los otros conceptos han sido analizados en los modos definidos previamente para el sistema propuesto, así se define el Modo 5 (energía presente en la red utilitaria transferida al hogar).

Finalmente en el Modo II – (a) y III de [68], Modo VII de [104] y Modo I de [71] la red utilitaria supe la demanda de energía del hogar y carga al mismo tiempo las baterías, de esta manera se define el último modo en el sistema de toma de decisiones propuesto, Modo 6 (energía presente en la red utilitaria transferida al hogar y las baterías).

3.3. VARIABLES DE LA MICRO RED

Teniendo en cuenta el análisis de 3.1 y 3.2, donde se menciona cada variable utilizada en los diferentes modelos de gestión de energía reportados a la fecha, se determinan las variables de entrada (ver tabla 8), necesarias y potencialmente candidatas a utilizar en el sistema de toma de decisiones propuesto, cada una de estas es etiquetada con su respectivo valor, rango y unidad de medida. Con respecto al precio de energía, se toman los valores límites (Min y Max) del precio en la unidad de medida (kWh) y un delta (Δ) para realizar adaptación a las fluctuaciones del precio, en la sección 3.3.1.7 se realiza una explicación detallada de la determinación del rango del precio de energía y la adaptación de esta variable al sistema. Se cuenta con una sola variable de salida, configuración micro red, con seis modos y su respectiva descripción (ver tabla 9).

Tabla 8. Variables de entrada del sistema de toma de decisiones propuesto.

Variable	Valor	Rango del Valor
Radiación solar	Baja	400 W/m ² – 600 W/m ²
	Media	600 W/m ² – 800 W/m ²
	Alta	800 W/m ² – 1000 W/m ²
Temperatura panel	Baja	5°C – 25°C
	Media	25°C – 45°C
	Alta	45°C – 65°C

Generación fotovoltaica ²	Baja Media Alta	0 % – 25 % 25 % – 75 % 75 % – 100 %
Consumo del hogar ³	Bajo Medio Alto	0.12 kWh – 0.5 kWh 0.5 kWh – 1.1 kWh 1.1 kWh – 2 kWh
Carga de la batería	Baja Media Alta	10 % – 30 % 30 % – 70 % 70 % – 90 %
Estado de la batería	Descargando Neutro Cargando	- - -
Precio de energía	Bajo Medio Alto	Min – (Min + Δ) (Min + Δ) – (Max - Δ) (Max - Δ) – Max
Nivel de polución	Bajo Medio Alto	0 μ g/m ³ – 100 μ g/m ³ 100 μ g/m ³ – 200 μ g/m ³ >200 μ g/m ³

Fuente: De los autores, abril de 2016.

Tabla 9. Variable de salida y estados para el sistema de toma de decisiones propuesto.

Variable	Estado	Descripción
Configuración micro red	Modo 1	Energía fotovoltaica generada transferida al hogar
	Modo 2	Energía fotovoltaica generada transferida al hogar y a las baterías
	Modo 3	Energía fotovoltaica generada transferida al hogar y a la red utilitaria
	Modo 4	Energía almacenada en baterías transferida al hogar
	Modo 5	Energía presente en la red utilitaria transferida al hogar
	Modo 6	Energía presente en la red utilitaria transferida al hogar y las baterías

Fuente: De los autores, abril de 2016.

² El valor del rango de la variable generación fotovoltaica se da en porcentaje y se determina a partir de la máxima capacidad de generación de los paneles solares, es decir, valor de máximo en kW se refiere al 100 % y así respectivamente.

³ Los rangos se definen a partir de la micro red planteada en [64] (ver figura 14b), para otra micro red es necesario obtener los datos históricos del consumo del hogar, de esta manera definir el valor de cada rango.

3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES ENTRADA

Cada una de las variables de entrada y salida se describen a continuación para entender su importancia y significado dentro de la micro red.

3.3.1.1. RADIACIÓN SOLAR

Se refiere a las radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, esta variable se tiene en cuenta dentro del sistema de toma de decisiones con el fin de dar información de la posible generación fotovoltaica de energía, ya que de esta radiación depende el rendimiento del sistema fotovoltaico. Es posible tomar estos datos mediante sensores y almacenarlos, de esta manera obtener los pronósticos de futuros valores de radiación solar en la zona donde se encuentra la micro red [115]. La unidad de medida es W/m^2 , lo que representa un valor de potencia aprovechada por un área cubierta por los paneles, generalmente esta radiación solar se encuentra entre 400 y 1000 W/m^2 , donde el último valor representa la máxima radiación del sol en la superficie de la tierra [116].

3.3.1.2. TEMPERATURA PANEL

La temperatura interna a la cual se encuentran trabajando los paneles es dependiente tanto de la temperatura ambiente como del posible sistema de refrigeración que el sistema de generación fotovoltaica pueda tener, ya que si la temperatura ambiente aumenta, el lugar donde se encuentran instalados los paneles incrementa igualmente su temperatura, a menos de que la micro red tenga un sistema de ventilación que ayude a mantener la temperatura interna de los paneles más baja [117]. Esta variable se tiene en cuenta debido a que afecta el rendimiento de generación fotovoltaica de energía, por eso es una variable importante en el sistema. El valor de la temperatura interna que soportan los paneles varía entre 5 y 65 °C, donde se definen tres rangos de igual tamaño para identificar mejor la variable, temperatura baja, media y alta [89].

3.3.1.3. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Esta variable es dependiente de la radiación solar y la temperatura panel, sin embargo la combinación aleatoria de estas dos variables da como resultado un valor único medido en kW de generación fotovoltaica, la cual se obtiene también a partir de un medidor inteligente. Existe un umbral mínimo de generación que se debe satisfacer para que el sistema pueda garantizar el óptimo funcionamiento de la micro red [68][71]. La variable generación fotovoltaica es la de mayor importancia dentro de la micro red, ya que de esta depende el beneficio del usuario, los valores son baja, media y alta, los cuales son medidos en porcentajes, ya que no es posible tener un valor exacto de generación debido a que esta

depende del número de paneles y las condiciones climatológicas donde se encuentra ubicada la micro red, para una micro red en específico se mide en kW el valor máximo de generación y ese valor correspondería al 100 % y de esta manera se referencia cada uno de los porcentajes.

3.3.1.4. CONSUMO DEL HOGAR

Esta variable está dividida en periodos de tiempo para hacer una estimación de la posible demanda energética que la micro red tendrá en determinado periodo del día [64], sin embargo la posible curva de la demanda que describe un hogar durante el día puede fluctuar de manera esporádica. Los valores de consumo son clasificados en bajo, medio y alto, los rangos de esta variable se toman midiendo el mayor y el menor valor de consumo, luego se sacan los tres rangos para asignarlos a cada clasificación. Es necesario realizar un análisis en periodos de tiempo más cortos, permitiendo controlar esta variable de una manera más constante y fiable. Se trabaja sobre el valor esperado descrito por la curva de consumo energético diario en Colombia [118].

3.3.1.5. CARGA DE LAS BATERÍAS

El estado de carga de las baterías varía en todo momento, esta intermitencia se deriva del sistema de toma de decisiones. Los rangos que caracterizan la variable carga de las baterías se miden en porcentaje y se clasifican en baja (10 % a 30 %), media (30 % a 70 %) y alta (70 % a 90 %) del total de la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías medido en kW [68], sin embargo esta variable y rangos debe ser adaptable a los posibles cambios de las necesidades de almacenamiento de la micro red. Con la variable carga de las baterías el sistema realiza el aplanamiento del pico de la curva de la demanda, al hacer un uso eficiente de la energía generada y almacenada en la micro red.

3.3.1.6. ESTADO DE LA BATERÍA

El sistema de almacenamiento de energía maneja diferentes estados, el primero de ellos se presenta cuando las baterías se están cargando, por ende la energía puede provenir de los paneles solares o de la red utilitaria, el estado opuesto, es decir de descarga, ocurre cuando las baterías están entregando la energía a la micro red, en algunos casos ninguno de estos dos estados suceden y las baterías se encuentran en estado neutro, donde solamente almacenan la energía para ser utilizada en un momento más adecuado [104]. La variable estado de la batería es usada en el sistema de toma de decisiones para identificar en qué sentido fluye la corriente en determinado momento, así el sistema controla y evita que dos estados se den al mismo tiempo, previniendo posibles inconvenientes dentro de la micro red.

3.3.1.7. PRECIO DE ENERGÍA

Esta variable se presenta en dos escenarios, el primero es un precio de energía no variable o plano, es decir que la tarifa para el usuario no fluctúa y la micro red debe ser lo más autónoma y sostenible posible sin tener en cuenta el precio de energía, el otro escenario y el cual se plantea en el presente trabajo de grado, es el precio de energía variable, el cual busca aplanar la curva de la demanda mediante el incremento de la tarifa en los horarios de mayor consumo de energía, lo que podría forzar a los consumidores a controlar el consumo en estos periodos de alta demanda [71]. El sistema de toma de decisiones clasifica la variable en tres rangos: bajo ($\text{Min} - (\text{Min} + \Delta)$), medio $((\text{Min} + \Delta) - (\text{Max} - \Delta))$ o alto $((\text{Max} - \Delta) - \text{Max})$, el sistema verifica hora a hora el precio más bajo y el más alto al que se cotizo el precio de energía por la red utilitaria durante las 24 horas del día anterior (Min y Max respectivamente), estos dos valores se restan y el resultado se divide entre tres, ya que son tres rangos, el cociente es el valor de delta (Δ), con estos valores (Min, Max y Δ) es posible determinar la medida exacta de cada uno de los rangos del precio de energía. Esta variable es de vital importancia en la micro red, ya que al trabajarse con un precio de energía variable permite mejorar el beneficio económico al usuario.

3.3.1.8. NIVEL DE POLUCIÓN

La polución del aire se determina por su composición, depende de las altas concentraciones de material particulado (PM), el cual se deriva principalmente de los combustibles fósiles y procesos industriales. Existen también otros parámetros determinantes de la contaminación sobre una ciudad, tales como topografía (cuenca rodeada de montañas), los cambios de temperatura, velocidad del viento baja y extensos períodos de sequía [77] [109]. El nivel de polución de una ciudad se mide a través del índice metropolitano de calidad del aire (IMECA), en Popayán la concentración de PM10 varía entre $37.5 - 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [119], lo que se considera como nivel de polución baja. En este caso solo se tiene un nivel de polución por ciudad, donde la variable solo es utilizada para generar una alarma cuando los paneles se encuentren sucios para realizarles el debido mantenimiento, de esta manera no disminuir el rendimiento del sistema de generación fotovoltaica.

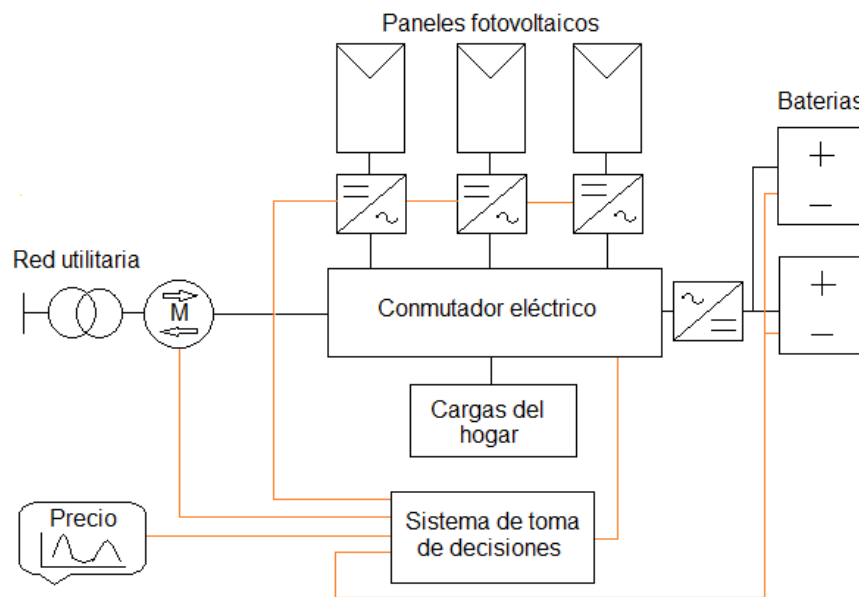
3.3.2. DESCRIPCIÓN DE LA VARIABLE DE SALIDA

La única variable de salida presente en el sistema de toma de decisiones es la configuración micro red donde se determinan seis modos de operación o respuestas del sistema de toma de decisiones. Estos modos definen la manera en que la energía disponible en la micro red: la fotovoltaica generada, la almacenada en baterías y la presente en la red utilitaria es utilizada para abastecer el consumo del hogar. La salida envía la información al conmutador de cómo deben

conectarse los dispositivo, las variables de entrada establecen el tipo de configuración a emplear generando el mayor beneficio dentro de la micro red.

Los modos determinan el sentido en el que fluye la energía dentro de la micro red, la cual está compuesta por elementos descritos en la sección 2.2.3. Los tres paneles fotovoltaicos con los que cuenta la micro red, generan energía que fluye a través de los micro inversores conectados individualmente a cada panel, con dirección al conmutador eléctrico. A su vez existe un flujo de energía desde o hacia las baterías del sistema, esta energía pasa a través del conmutador eléctrico, que está encargado de controlar la dirección y la cantidad de energía que debe pasar a través del mismo, desde o hacia las baterías. También la red utilitaria se encuentra conectada a la micro red a través del conmutador, este se encarga de controlar el flujo de la energía, en caso de que la micro red exporte o requiera de energía. Finalmente las cargas del hogar se encuentran conectadas de manera directa al conmutador eléctrico y este es el encargado de suministrar la energía de forma correcta, debe ser capaz de soportar las necesidades del sistema, tanto del número de entradas y salidas como distribuir la energía según los modos de configuración de la micro red (ver figura 15).

Figura 15. Diagrama eléctrico de la micro red propuesta con sistema de toma de decisiones.



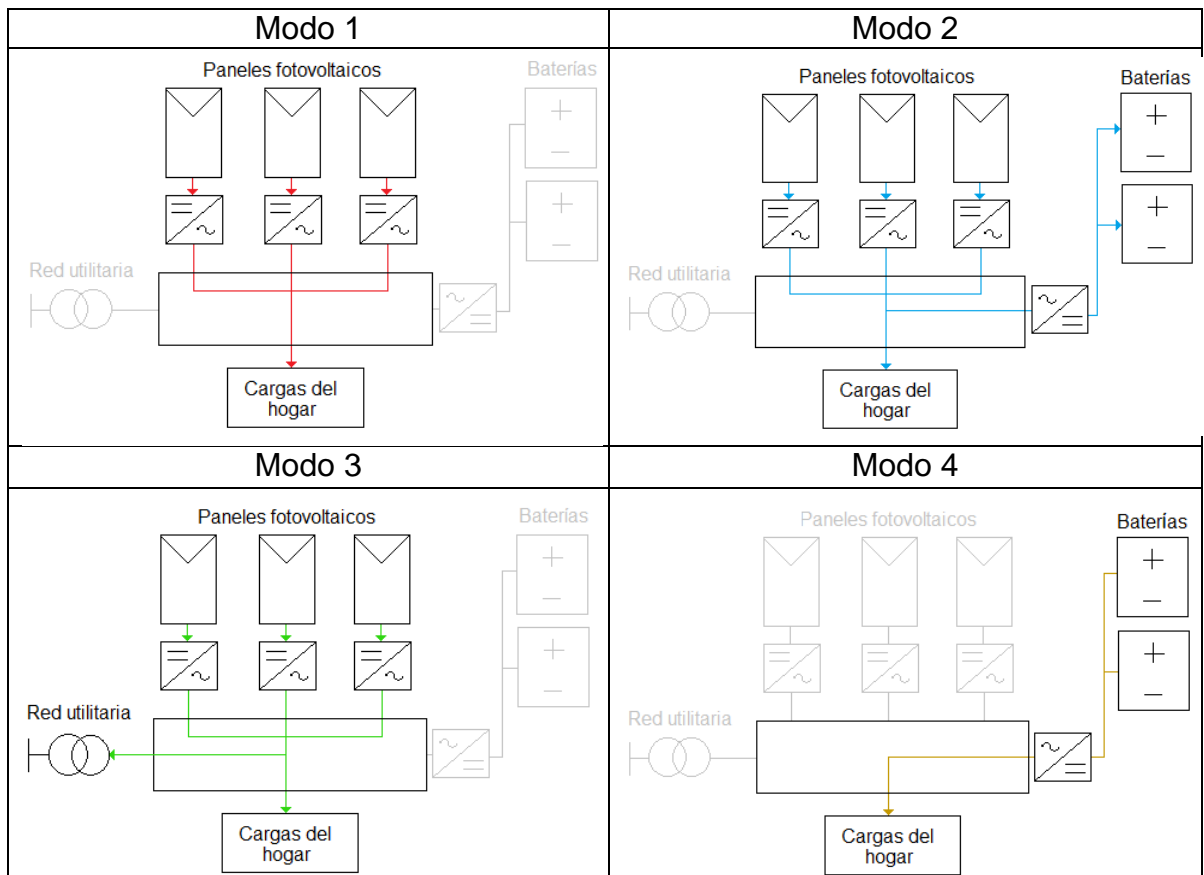
Fuente: De los autores, mayo de 2016.

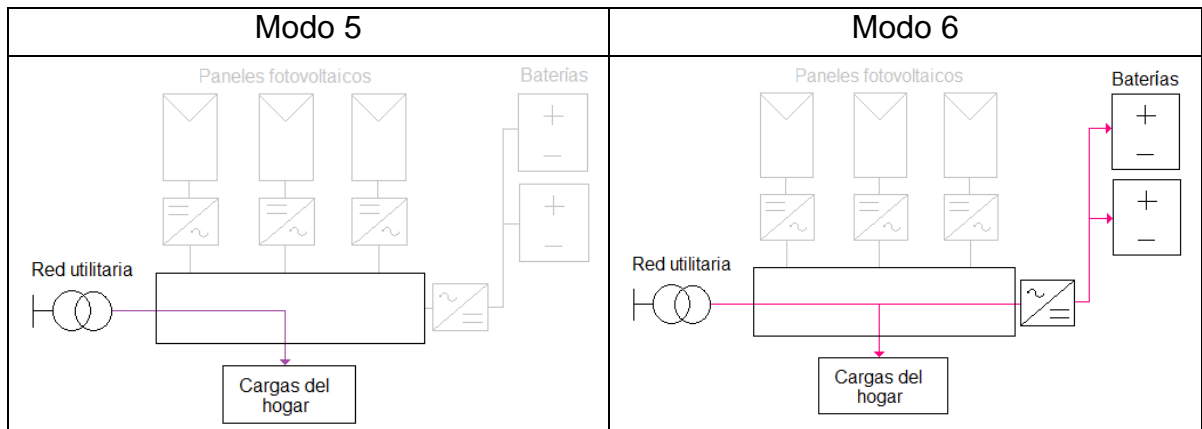
El Modo 1 es el principal, donde se envía la energía fotovoltaica generada hacia la micro red para suplir el consumo del hogar, si esta energía es suficiente y existen excedentes se cargan las baterías al mismo tiempo, donde se define el Modo 2, si las baterías se encuentran cargadas, el excedente de energía fotovoltaica es

inyectada a la red utilitaria, lo definido como Modo 3 en la variable configuración micro red. En caso de que no exista generación de energía fotovoltaica, la micro red debe buscar otras maneras de suplir la demanda, si las baterías se encuentran cargadas envían esa energía al hogar, definido como Modo 4, si ninguno de estos modos se cumple, se requiere de la energía de la red utilitaria, Modo 5, aparte de las cargas del hogar, la red utilitaria también es capaz de cargar las baterías, Modo 6 (ver figura 16).

Como se describe anteriormente, algunos modos se pueden presentar de manera simultánea, ya que en un mismo instante de tiempo se llega a tener una alta generación fotovoltaica y se envía esta energía a las cargas (Modo 1), existe suficiente para cargar las baterías (Modo 2) y debido a que las baterías tienen un tiempo específico de carga, en algún momento es posible que se envíe en el mismo periodo de tiempo el excedente de energía fotovoltaica a la red utilitaria (Modo 3). El Modo 1 se presenta de manera simultánea con los demás modos, ya que en un mismo periodo de tiempo cuando hay poca energía fotovoltaica, esta es enviada al hogar y la faltante se puede suplir desde las baterías (Modo 4), desde la red utilitaria (Modo 5 o Modo 6) dependiendo de las condiciones del sistema.

Figura 16. Modos de la variable de salida configuración micro red del sistema.





Fuente: De los autores, mayo de 2016.

3.4. FILTRADO DE LAS VARIABLES DE LA MICRO RED

Analizando de manera detallada las variables previamente mencionadas, no es necesario tener en cuenta todas las entradas explicadas anteriormente en el sistema de toma de decisiones, es posible descartar algunas, como se desarrolla a continuación.

La radiación solar y la temperatura del panel, ya que estas dos variables solo son utilizadas para: predecir la generación fotovoltaica [106][105], encontrar el número de paneles que requiere el sistema [103] o simplemente graficar el comportamiento del sistema fotovoltaico [72][64], sin embargo para tomar decisiones dentro del modelo de gestión de energía eléctrica, no es necesario tener en cuenta la predicción, sino la producción de generación fotovoltaica actual, para comparar este valor con el consumo del hogar en un momento indicado [68][103][104][69], de esta manera solo se requiere la variable Generación fotovoltaica que indica el valor actual.

El Consumo del hogar y la Carga de la batería son variables fundamentales dentro de los modelos de gestión de energía, ya que principalmente a partir de estos datos se organizan las decisiones que los diferentes sistemas reportados realizan [68][104][71][66], es por esto que también se tienen en cuenta dentro del sistema de toma de decisiones propuesto.

El Precio de energía, como se mencionó anteriormente, es una variable que no tiene un peso fundamental dentro de los modelos de gestión de energía reportados, se tiene en cuenta únicamente para comprar energía cuando el valor es bajo [71][65] y exportar cuando hay exceso de generación en la micro red [68][69][105]. En la micro red se tiene en cuenta la variable Precio de energía para tomar decisiones dependiendo si este es bajo, medio o alto, de esta manera generar un beneficio económico al usuario, en cuanto al consumo o

almacenamiento de energía a menor costo, se evalúa el precio junto a las demás variables, algo no reportado en los artículos anteriores y de aporte al presente trabajo de grado. Por otro lado para calcular el beneficio de la inyección de energía sobrante hacia la red utilitaria, se utiliza el valor del precio de energía en bolsa, donde este valor se multiplica por los kWh exportados, pero esta variable (precio de energía en bolsa) no hace parte de las variables de entrada. La variable Precio de energía definida a partir de la red proveedora de servicios si es usada dentro del sistema de toma de decisiones propuesto con el fin de incidir en un mayor número de modos de configuración de la micro red.

Finalmente, la variable nivel de polución no es tenida en cuenta dentro del sistema de toma de decisiones, pero se utiliza para obtener una alarma, la cual informa cuando se debe realizar mantenimiento a los paneles para un mejor desempeño de la micro red. El nivel de polución varía dependiendo de la ciudad en la cual se ubique la micro red y este se toma como referencia para hacer comparaciones y determinar el momento de activación de la alarma [79].

Al reducir el número de variables de entrada se mejora el procesamiento del sistema, ya que se realizan menos procesos, se reduce el tiempo y el modelo se vuelve más efectivo, de esta manera se describe a continuación el sistema de toma de decisiones de la micro red con las cuatro variables principales de entrada: Generación fotovoltaica, Consumo del hogar, Carga de la batería, y Precio de energía.

La única variable de salida, Configuración micro red, es de gran importancia dentro del sistema, ya que define la manera en cómo la energía fotovoltaica generada, la almacenada en baterías y la presente en la red utilitaria es utilizada para abastecer el consumo del hogar. Es por esto que esta variable si se tiene en cuenta dentro del sistema de toma de decisiones propuesto.

3.5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES

Lo primero que realiza el modelo de gestión de energía antes de empezar con el sistema de toma de decisiones, es medir las cuatro variables principales [68][104] en determinados periodos de tiempo, los cuales varían desde minutos hasta horas. En el punto inicial, el sistema evalúa la variable de mayor relevancia, la Generación fotovoltaica de energía, ya que la primera consulta que se realiza dentro del sistema de toma de decisiones es si esta variable supera o no un umbral de generación de energía según [68][71], posterior a esto se realiza la comparación entre la generación y el consumo actual de la micro red de acuerdo a [68][103][104][69], donde se toman decisiones dependiendo si la generación fotovoltaica es mayor o es menor que el Consumo del hogar, por lo cual no se requiere de los niveles o rangos mencionados anteriormente de estas dos

variables, solamente se necesita saber a partir de los micro inversores y el medidor inteligente la medida en kW de cada variable para compararlas.

Luego se evalúa la Carga de la batería donde se toman decisiones dependiendo del porcentaje de carga [68][71][66] y/o también del rango, para no tener muchos rangos de evaluación se fijan tres grupos donde se clasifica ese nivel de carga en baja, media o alta, así realizar una o varias decisiones dependiendo de esta variable. Cuando la Generación fotovoltaica es mayor que el Consumo del hogar, se envía la energía fotovoltaica generada hacia el hogar, al mismo tiempo si esta energía es suficiente se cargan las baterías, en ese momento únicamente se toma en cuenta si la Carga de la batería es alta, ya que si es así, cuando el sistema de almacenamiento este totalmente cargado la energía fotovoltaica sobrante se exporta a la red utilitaria para ser vendida [68]. Cuando la Generación fotovoltaica es menor o igual al consumo, el sistema debe suministrar la energía generada a las cargas del hogar, luego se evalúa la Carga que tienen las baterías y el Precio de energía del momento, así se toma una decisión de la configuración de la micro red.

Finalmente, para obtener una mejor respuesta, en el sistema se evalúa el Precio de energía, dependiendo si este valor es bajo, medio o alto se toma una decisión en el modelo, realmente esta variable únicamente afecta al sistema cuando la Generación fotovoltaica es menor que el Consumo del hogar. Para obtener un mejor rendimiento y beneficio dentro de la micro red, cuando el precio es bajo y las baterías no tienen un estado de carga alto, la red utilitaria suple el consumo del hogar y también se compra de esa energía para cargar las baterías [71], cuando la Carga de las baterías es baja y el precio es medio, la red utilitaria suple el Consumo del hogar, de lo contrario si se tiene Carga en las baterías se envía esta energía almacenada hacia el hogar y en caso de que esta no sea suficiente la red utilitaria suple el consumo faltante, se debe considerar que las baterías sólo se deben descargar hasta el límite inferior de 10 %. Teniendo en cuenta cada una de estas variables se encuentra la Configuración micro red dentro del sistema de toma de decisiones.

3.6. REGLAS DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES

Es necesario determinar las reglas del sistema de toma de decisiones para el presente modelo de gestión de energía eléctrica, a partir del análisis previamente realizado, haciendo uso de las variables de entrada y salida y sus rangos, se plantean cada una de las reglas del sistema. Se dividen en tres grupos para entenderlas de una mejor manera, dependiendo de los valores de las variables de Generación fotovoltaica y el Consumo actual del hogar, y luego se describe cada una de ellas.

La primera regla a tener en cuenta es si la Generación fotovoltaica supera o no un umbral de generación, esto se refiere a que si la energía fotovoltaica es capaz de trabajar dentro de la micro red [68][71], este umbral se fija de manera estática por el sistema o por el usuario de forma dinámica, depende del historial de Generación fotovoltaica, ya que se toma el mínimo valor al cual la energía generada hace efecto dentro de la micro red y el cual se considera como el umbral [112], y se mide en kWh, las mismas unidades de la Generación fotovoltaica. Si este umbral es superado, se compara si la Generación fotovoltaica es mayor o menor que el Consumo del hogar [104] para continuar a definir las reglas del sistema de toma de decisiones propuesto según las variables de entrada obteniendo un Modo de Configuración de la micro red, cada una de las reglas se nombra a continuación, se sintetizan y organizan (ver tabla 10) y finalmente se describen para entender su significado dentro del sistema de toma de decisiones (ver tabla 11).

A. Generación fotovoltaica < Umbral

1. Si Carga de la batería es Baja Y Precio de energía es Bajo entonces Configuración micro red es Modo 6.
2. Si Carga de la batería es Baja Y Carga de la batería es menor o igual a 10 % Y Precio de energía es Medio o Alto entonces Configuración micro red es Modo 5.
3. Si Carga de la batería es Baja Y Carga de la batería es mayor a 10 % Y Precio de energía es Medio o Alto entonces Configuración micro red es Modo 4.
4. Si Carga de la batería es Media o Alta Y Precio de energía es Bajo entonces Configuración micro red es Modo 5.
5. Si Carga de la batería es Media o Alta Y Precio de energía Medio o Alto entonces Configuración micro red es Modo 4.

B. Generación fotovoltaica \geq Umbral

a. Generación fotovoltaica > Consumo hogar

6. Si Carga de la batería es menor o igual a 90 % entonces Configuración micro red es Modo 2.

7. Si Carga de la batería es mayor a 90 % entonces Configuración micro red es Modo 3.

b. Generación fotovoltaica \leq Consumo hogar

Para todos los valores de Carga de la batería y Precio de energía, la primera Configuración micro red es Modo 1, luego se define otro modo para la energía faltante a suplir del Consumo del hogar, según las diferentes variables de entrada del sistema.

8. Si Carga de la batería es Alta Y Precio de energía es Bajo entonces Configuración micro red es Modo 5.
9. Si Carga de la batería es Alta Y Precio de energía es Medio o Alto entonces Configuración micro red es Modo 4.
10. Si Carga de la batería es Media Y Precio de energía es Bajo entonces Configuración micro red es Modo 6.
11. Si Carga de la batería es Media Y Precio de energía es Medio o Alto entonces Configuración micro red es Modo 4.
12. Si Carga de la batería es Baja Y Precio de energía es Bajo entonces Configuración micro red es Modo 6.
13. Si Carga de la batería es Baja Y Precio de energía es Medio entonces Configuración micro red es Modo 5.
14. Si Carga de la batería es Baja Y Carga de la batería es menor o igual a 10 % Y Precio de energía es Alto entonces Configuración micro red es Modo 5.
15. Si Carga de la batería es Baja Y Carga de la batería es mayor a 10 % Y Precio de energía es Alto entonces Configuración micro red es Modo 4.

Se fijan acrónimos para las variables de entrada del sistema de toma de decisiones con el fin de simplificar las reglas del sistema, de esta manera a partir de ahora, PV se refiere a la variable Generación fotovoltaica, C se entiende como Consumo del hogar, Cbat es Carga de la batería y Pr la variable de precio de energía.

Tabla 10. Reglas con acrónimos del sistema de toma de decisiones.

Macro reglas		No.	Reglas
PV < U*		1	Cbat Baja Y Pr Bajo → Modo 6
		2	Cbat Baja Y Cbat ≤ 10% Y Pr Medio o Alto → Modo 5
		3	Cbat Baja Y Cbat > 10% Y Pr Medio o Alto → Modo 4
		4	Cbat Media o Alta Y Pr Bajo → Modo 5
		5	Cbat Media o Alta Y Pr Medio o Alto → Modo 4
PV ≥ U*	PV > C	6	Cbat ≤ 90% → Modo 2
		7	Cbat > 90% → Modo 3
	PV ≤ C	8	Cbat Alta Y Pr Bajo → Modo 1 Y Modo 5
		9	Cbat Alta Y Pr Medio o Alto → Modo 1 Y Modo 4
		10	Cbat Media Y Pr Bajo → Modo 1 Y Modo 6
		11	Cbat Media Y Pr Medio o Alto → Modo 1 Y Modo 4
		12	Cbat Baja Y Pr Bajo → Modo 1 Y Modo 6
		13	Cbat Baja Y Pr Medio → Modo 1 Y Modo 5
		14	Cbat Baja Y Cbat ≤ 10% Y Pr Alto → Modo 1 Y Modo 5
		15	Cbat Baja Y Cbat > 10% Y Pr Alto → Modo 1 Y Modo 4

Fuente: De los autores, junio de 2016.

Tabla 11. Descripción de las reglas del sistema de toma de decisiones.

Macro reglas	Reglas	Descripción
PV < U*	1	No se supera el umbral para trabajar con energía fotovoltaica, se tiene poca energía almacenada en las baterías, el Precio de la energía es bajo, entonces es conveniente suplir el consumo del hogar con la red utilitaria, y al mismo tiempo comprar energía para cargar las baterías.
	2	En este caso las baterías tienen una carga menor o igual al 10 % que es el límite inferior, es decir, el punto donde no se pueden descargar más, y aunque el precio sea medio o alto, se requiere de la energía de la red utilitaria para suplir el consumo del hogar, porque no se cuenta más fuentes de energía en el momento, sin embargo no se cargan las baterías.
	3	La Carga de la batería es baja pero es mayor al límite de 10 %, y debido a que el precio de la energía es medio o alto, es preferible descargar las baterías para suplir el Consumo del hogar y así no comprar energía a un alto costo.

		4	Las baterías se encuentran cargadas en el rango medio o alto y el precio es bajo, es mejor comprar energía desde la red utilitaria para suplir el consumo y ahorrar la energía almacenada en caso de que el Precio de la energía suba.
		5	Las baterías se encuentran cargadas en nivel medio o alto y el precio es medio o alto, en este momento las baterías empiezan a descargarse para suplir la demanda, y generar un ahorro económico al no comprar energía a alto costo.
$PV \geq U^*$	$PV > C$	6	Se supera el umbral de generación, existe un excedente de Generación fotovoltaica después de suplir la demanda, si las baterías aún no se encuentran en su límite máximo de carga, esa energía sobrante es transferida a las baterías, para cargarlas y ahorrar la energía generada.
		7	La energía fotovoltaica excedente es exportada y vendida a la red utilitaria, para obtener un beneficio económico, ya que las baterías se encuentran totalmente cargadas y ya se ha suplido el Consumo del hogar en el momento indicado.
	$PV \leq C$	8	Después de enviar la energía fotovoltaica generada al hogar, existe un nivel de energía faltante, ya que la Generación fotovoltaica en el momento es mejor que el consumo, si las baterías se encuentran cargadas y el precio es bajo, es beneficioso comprar a la red utilitaria la energía faltante.
		9	Las baterías se encuentran totalmente cargadas o en un nivel alto y el precio es alto, la energía faltante es suplida por las baterías, ya que comprar energía en ese momento seria costoso y se cuentan con recursos de la propia micro red, es mejor hacer uso de estos y no de fuentes externas.
		10	Las baterías cuentan con una carga media, y el precio de la energía es bajo, en ese momento la energía que falta para suplir la demanda es transferida por la red utilitaria, y esta a su vez carga las baterías.
		11	La Carga de las baterías es media y el precio es medio o alto, en este caso es mejor descargar las baterías para suplir el consumo de energía que falta, así no comprar energía a un alto costo.
		12	Las baterías cuentan con poca carga, baja, y el Precio de la energía es bajo, en este momento la energía faltante para suplir el consumo es comprada desde la red utilitaria y al mismo tiempo se cargan las baterías, a un precio bajo.

		13	La Carga de las baterías es baja y el precio de la energía es medio, en este caso es mejor comprar energía de la red utilitaria para suplir el Consumo del hogar faltante, pero las baterías se mantienen con la energía almacenada ya que es poca y en el caso en que el precio suba aún más, estas puedan transferir su energía.
		14	Se requiere suplir la energía faltante del Consumo del hogar, las baterías se encuentran en su límite de 10 % de carga y el precio es alto, pero la única manera de suplir ese consumo es comprar energía desde la red utilitaria.
		15	En el caso de un precio alto y las baterías aún no llegan a su límite inferior, es preferible descargar esa energía almacenada para suplir el consumo y así no comprar energía a alto costo.

U: Umbral.

Fuente: De los autores, junio de 2016.

3.7. PREDICCIÓN DE MODOS Y REGLAS PRESENTADOS

Es posible predecir cuales son los modos que se presentan con mayor frecuencia en el sistema de toma de decisiones, teniendo en cuenta las reglas determinadas en 3.6 (ver tabla 10), se aprecia que de las 15 reglas, los modos 4 y 5 se presentan en un 33 % de ellas, es decir, cada uno es la salida de 5 reglas, el Modo 6 se presenta en 3 reglas, un 20 % del total de las reglas y los modos 2 y 3 sólo se presentan en una regla del sistema (7 %). El Modo 1 se presenta de manera paralela en 8 reglas, es decir en un 54 %, analizando estos cálculos se predice que el Modo 1 se presentará más en el sistema, junto a los modos 4 y 5, los modos 2 y 3 serían los que menos aparecerían, sin embargo esto depende de las reglas que se obtengan, ya que no necesariamente todas las reglas se presentan en igual proporción y los modos más o menos frecuentes podrían variar.

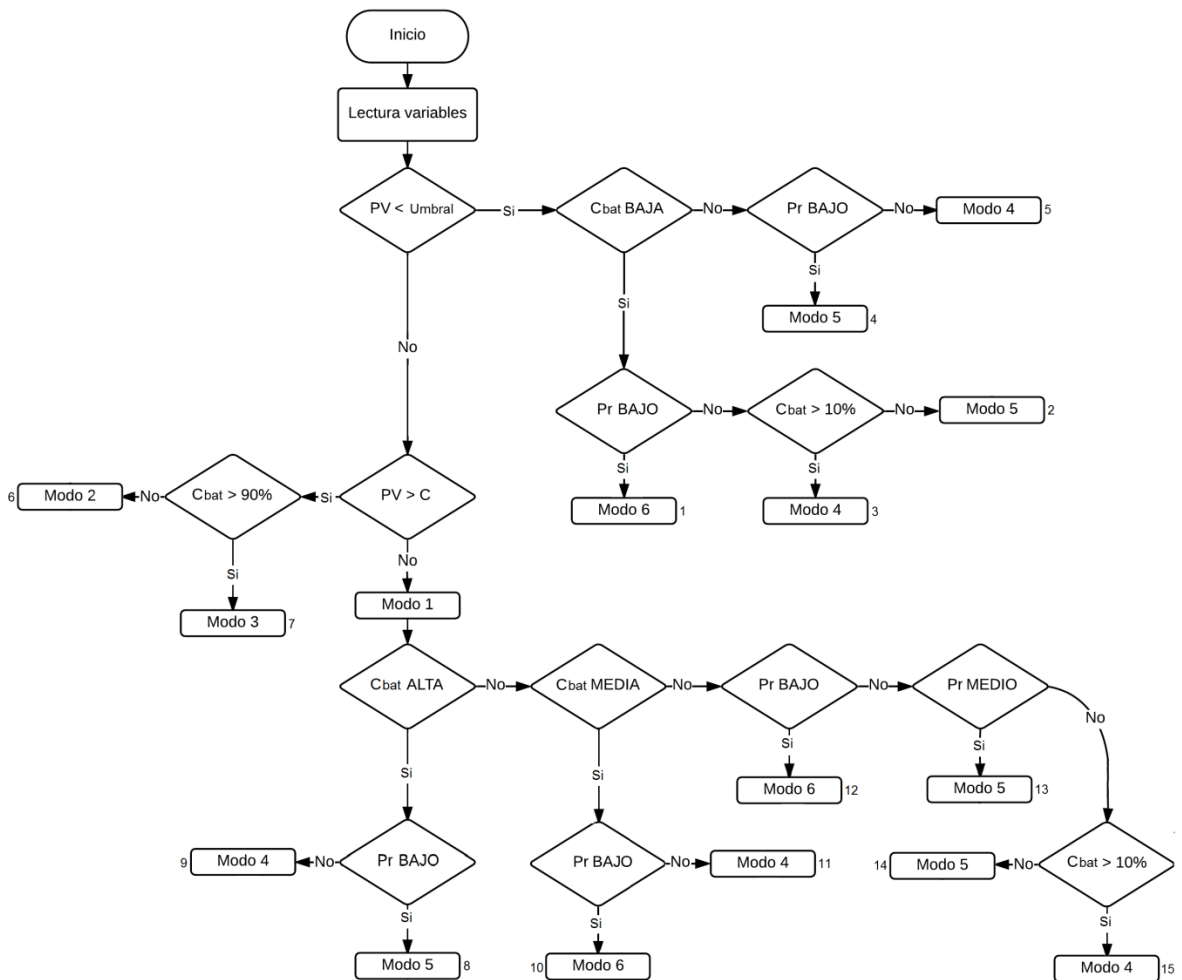
En el sistema se definen 15 reglas posibles a presentarse en algún momento dentro de la micro red, cada una se presenta en escenarios diferentes y dependen de las variables de entrada. Para poder predecir las reglas que más se presentan, se deben analizar los valores de la generación fotovoltaica, consumo del hogar, carga de la batería y precio de energía. En cuanto a generación se espera que el umbral se supere entre las 6 am y 6 pm, es decir un 50 % del día, por lo tanto las reglas de la 1 a la 5 se presentan en la misma proporción que de la 6 a la 15, cuando se supera el umbral, la mayoría de veces la generación es mayor que el consumo, es decir las reglas 6 y 7 se van a presentar más, alrededor del doble que las reglas de la 8 a la 15. En cuanto a la carga de la batería, se espera que el sistema de almacenamiento se encuentre la mayor parte del tiempo en un estado

medio, para mantener a la batería en mejor condición, es decir, que no se presenten sobrecargas ni descargas drásticas, es por esto que se espera que las reglas 4, 5, 10 y 11 se presenten la mayor parte del tiempo, a comparación de donde la carga de la batería es baja o alta, las cuales se presentan en menor proporción.

3.8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES

Teniendo en cuenta las reglas determinadas en 3.6 y explicadas en la tabla 10, se organizan en un diagrama de flujo (ver figura 17), permitiendo una fácil comprensión del sistema propuesto, primero se realiza la lectura de variables, se evalúa cada una de estas, para finalmente conducir a una salida de Configuración micro red, para mayor claridad en el diagrama de flujo al lado de cada salida se encuentra indicado el número de regla presente en la tabla 10.

Figura 17. Diagrama de flujo del sistema de toma de decisiones.



Fuente: De los autores, abril de 2016.

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES

Luego de obtener las variables de entrada y salida del sistema de toma de decisiones en 3.3, se describe cada uno de los posibles modos en los que la micro red puede estar configurada en 3.3.2. De esta manera es posible determinar las reglas del sistema en 3.6 y mostrarlas de una manera organizada en el diagrama de flujo en 3.8. Teniendo en cuenta el sistema de toma de decisiones propuesto en el presente capítulo se procede a simular el modelo de gestión de energía eléctrica en la herramienta de software Matlab, el código se encuentra en el Anexo – C (CÓDIGO DE SIMULACIÓN), con el fin de analizar el funcionamiento del sistema, se define el tiempo de simulación, la granularidad de los datos, se determinan los valores de las variables de entrada para finalmente obtener los resultados del comportamiento del sistema.

4.1. TIEMPO DE SIMULACIÓN

Los tiempos de simulación para realizar la validación del sistema de toma de decisiones varían de acuerdo al modelo analizado, algunos de ellos toman tiempos de simulación muy pequeños de cerca de un minuto [105], sin embargo al hacer uso de este lapso de tiempo no es posible observar todo el comportamiento y los cambios entre los diferentes modos de funcionamiento del sistema. Existen también, tiempos de simulación muy grandes en los cuales se cuenta con datos de cada hora durante 290 [66] hasta 365 días [104][71][67], es decir, un año de información, donde se valida el funcionamiento de la micro red en un espacio de tiempo más largo, ya que durante el año el comportamiento del consumo del hogar y la generación fotovoltaica varían debido a los cambios climáticos por las estaciones, sin embargo, esto no es necesario para el presente sistema ya que la micro red se encuentra ubicada sobre la zona ecuatorial. Por tanto los tiempos de simulación más factibles deben ser moderados, donde no requieran tantos datos innecesarios y donde sea posible observar el distinto comportamiento de las variables de entrada del sistema y hacer uso de todos los modos de configuración de la micro red. Por lo que se cuenta con artículos que analizan tiempos desde las 24 horas del día [68][64][106] hasta una duración de 4 días consecutivos [103].

Teniendo en cuenta los tiempos de simulación de los modelos de energía eléctrica reportados, para la validación del sistema de toma de decisiones propuesto, se optó por estudiar los datos durante 24 horas por un total de 7 días, tiempo en el cual es posible analizar diferentes valores de las variables de entrada, el comportamiento del consumo del hogar en un día laboral como en un fin de semana, para la generación es posible tener en cuenta días soleados como nublados, de esta manera observar todos los modos de salida de la micro red.

4.2. GRANULARIDAD DE LOS DATOS

Las diferentes variables de entrada del sistema son leídas y analizadas por la micro red con cierta periodicidad, en algunos modelos reportados se miden únicamente las variables Generación fotovoltaica, Consumo del hogar y Carga de la batería [68][103][67][66][112], sin embargo en el presente trabajo se realiza también la lectura de la variable Precio de energía. Esta periodicidad hace referencia a la cantidad y constancia con la que se toman los valores de estas variables, con el fin de controlar y medir el tiempo en que las baterías son capaces de brindar energía a las diferentes cargas de la micro red, en qué momento se requiere de la red utilitaria y medir constantemente la energía fotovoltaica generada. De esta forma se evitan posibles desabastecimientos de energía en el hogar, de las baterías, ya que el sistema de almacenamiento es el más crítico [66], y debe ser medido con mayor periodicidad.

Los periodos de tiempo para realizar la lectura de las variables varían entre los diferentes modelos reportados, estos periodos van desde periodos de una hora [68][103][104], 30 minutos [64] hasta periodos más pequeños de 15 minutos [70][67][66][112]. Tomar periodos de una hora representa lapsos de tiempo grandes, donde los niveles de carga de las baterías podrían descender a valores por debajo de los límites establecidos en la micro red, dañando las baterías o causando que estas no tengan suficiente energía para suministrar a las cargas, al no ser medido el cambio de las variables oportunamente al sistema. Por tanto periodos de tiempo menores realizan un análisis más continuo y evitan una posible caída de los valores de energía, como también representa una ventaja al no desperdiciar recursos verificando constantemente cada una de las variables de la micro red, de esta manera en el presente trabajo de grado se fijan periodos de 15 minutos para la simulación del sistema de toma de decisiones.

Para realizar la simulación y validación del modelo de gestión de energía eléctrico propuesto, se procede a obtener los valores de cada una de las variables de entrada del sistema, con cuatro datos cada hora, es necesario adaptar y acoplar los datos de tal forma que en algunos casos donde sólo se cuenta con valores cada hora, se realice una interpolación para obtener los datos cada 15 minutos, a continuación se describe cada uno de los datos de las variables de entrada del sistema.

4.3. VALORES DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES

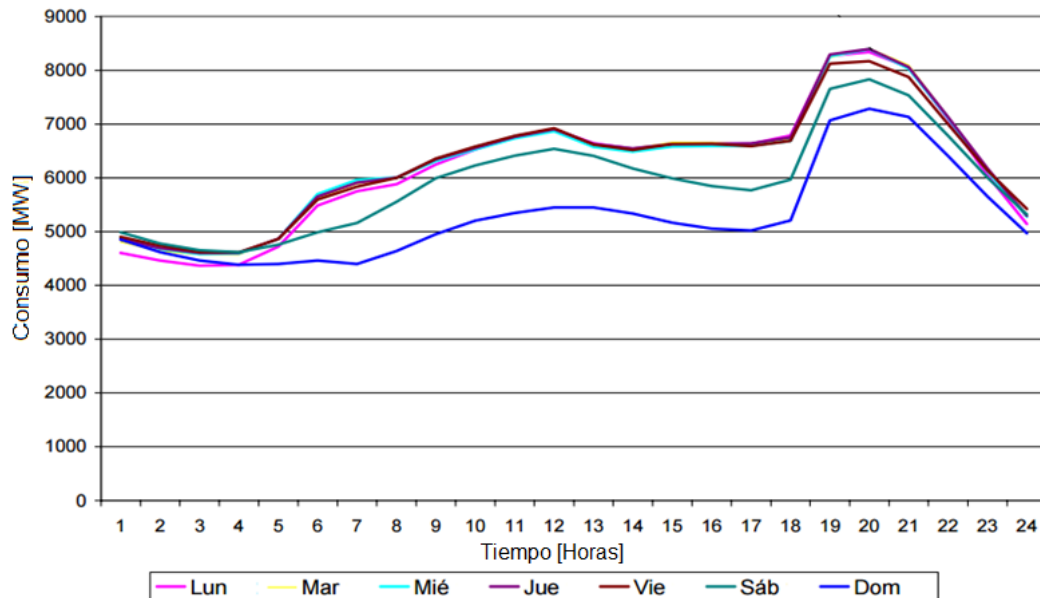
Se requiere obtener los datos de cada una de las variables de entrada del sistema de toma de decisiones para realizar la simulación en el software Matlab, a continuación se presentan los valores que se ingresan en forma de vectores en la

herramienta de simulación, con un total de 7 vectores que representan datos de siete días diferentes, cada uno de los vectores tienen 96 valores, debido a que la simulación se realiza para un día cada 15 minutos, estos datos son definidos para las variables Consumo del hogar, Generación fotovoltaica y Precio de energía. La variable Carga de la batería a pesar de ser una variable de entrada, no se define en forma de vector, pero se requiere modelar las baterías, el valor de la variable depende del funcionamiento del sistema y se mide constantemente en el sistema.

4.3.1. VARIABLE CONSUMO DEL HOGAR

El primer dato a tener en cuenta es el del consumo de energía diario de un hogar, en este caso se cuenta con información de los kWh de consumo por hora durante las 24 horas del día, descrito mediante una curva que caracteriza el consumo de la UPME [118], a partir de esta información se toman valores puntuales de consumo para una micro red de consumo promedio de 4 kWh al día, valor previamente establecido en el capítulo 2. Debido a que la periodicidad expuesta en la sección 4.2 es de 4 valores por hora, para el sistema es necesario obtener una mayor cantidad de datos, por tanto para la obtención de estos, se debe realizar un mapeo más constante de la curva descrita por el hogar, donde se describe el comportamiento del consumo del hogar durante 7 días de la semana (ver figura 18), es así entonces que se realiza una interpolación lineal, la cual permite una aproximación aceptable a valor desconocido que esta descrito por una función y posteriormente se obtienen cada uno de los datos de la variable Consumo del hogar, se presentan los valores para un día (ver tabla 12).

Figura 18. Comportamiento del consumo de energía en Colombia del año 2007.



Fuente: Modificada de [120], junio de 2016.

4.3.2. VARIABLE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

Para encontrar los posibles valores de generación fotovoltaica, se hace uso de la base de datos de la Compañía Energética de Occidente, donde se cuenta con la información de cada hora de radiación solar en los meses de agosto y septiembre del 2015 en la ciudad de Popayán, Colombia, los datos se encuentran medidos en W/m^2 para encontrar la información en kWh, se hace uso de la ecuación 5.

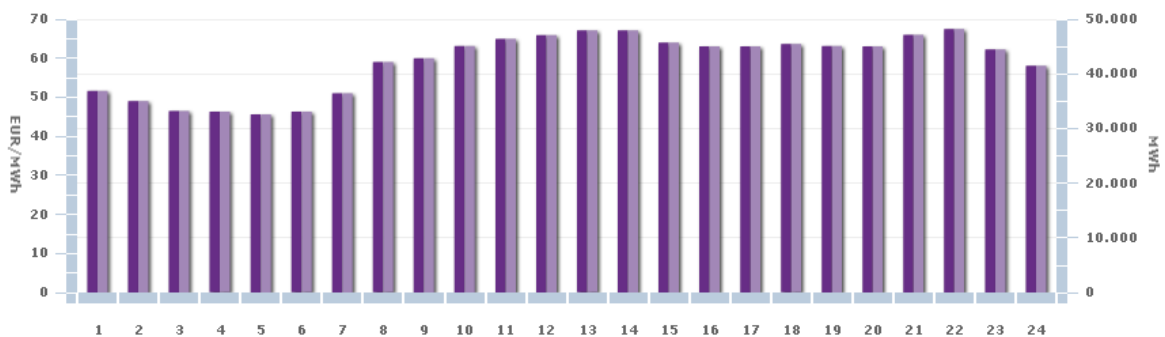
$$\text{Generación fotovoltaica [kWh]} = (\text{Radiación solar} \times \text{Área} \times E) / 1000 \quad (5)$$

Donde el área es la extensión de la superficie de los paneles solares medida en m^2 y E se refiere a la eficiencia de los paneles [89], en este caso es 16,16 % (ver sección 2.2.2A). Se encuentran los datos de la variable Generación fotovoltaica para cada hora y realizando interpolación lineal se determinan cada 15 minutos durante los 7 días, se presentan los valores para un día (ver tabla 12).

4.3.3. VARIABLE PRECIO DE ENERGÍA

El modelo de gestión de energía eléctrica propuesto utiliza un precio de energía variable, en Colombia aún no se tienen datos exactos de este, por lo cual se modelan valores teniendo en cuenta el precio del mercado diario en España y Portugal (ver figura 19), el precio se actualiza cada hora [121] y depende de la demanda de energía, es decir, en horas pico el precio es el más costoso [122]. Se realiza el promedio del valor en euros del precio de energía y se relaciona con el tarifa en pesos, definida por Compañía Energética de Occidente (CEO) para el mes de septiembre de 2015 [123], mes definido para la simulación. Para obtener el precio por hora para el modelo de energía, se multiplica el valor de cada hora por el precio definido por CEO (\$451.04 pesos) y se divide por el promedio encontrado en euros (€50.04), de esta manera se obtiene el valor de precio de energía para Popayán, Colombia cada hora, debido a la granularidad de los datos de 15 minutos, se repite el precio 4 veces durante una hora (ver tabla 12).

Figura 19. Precio variable del mercado de energía de España y Portugal.



Fuente: Tomada de [121], julio de 2016.

Tabla 12. Valores de las variables de salida para la simulación del sistema de toma de decisiones.

Tiempo	Hora	Consumo del hogar [kWh]	Generación fotovoltaica [kWh]	Precio de energía [pesos]
1	0	0.0345	0.0002535	374.33
2	0.25	0.03425	0.00024331	374.33
3	0.5	0.034	0.00023313	374.33
4	0.75	0.03375	0.00022294	374.33
5	1	0.0335	0.00021275	355.08
6	1.25	0.03325	0.00023269	355.08
7	1.5	0.033	0.00025263	355.08
8	1.75	0.03275	0.00027256	355.08
9	2	0.0325	0.0002925	355.08
10	2.25	0.03225	0.00027788	355.08
11	2.5	0.032	0.00026325	355.08
12	2.75	0.03175	0.00024863	355.08
13	3	0.0315	0.000234	353.48
14	3.25	0.032	0.00024375	353.48
15	3.5	0.0325	0.0002535	353.48
16	3.75	0.033	0.00026325	353.48
17	4	0.0335	0.000273	348.21
18	4.25	0.034	0.00026325	348.21
19	4.5	0.0345	0.0002535	348.21
20	4.75	0.035	0.00024375	348.21
21	5	0.0355	0.000234	353.48
22	5.25	0.036	0.0021815	353.48
23	5.5	0.0365	0.004129	353.48
24	5.75	0.037	0.0060765	353.48
25	6	0.0375	0.008024	389.99
26	6.25	0.03775	0.01220994	389.99
27	6.5	0.038	0.01639588	389.99
28	6.75	0.03825	0.02058181	389.99
29	7	0.0385	0.02476775	450.58
30	7.25	0.039	0.02801475	450.58
31	7.5	0.0395	0.03126175	450.58
32	7.75	0.04	0.03450875	450.58
33	8	0.0405	0.03775575	458.44
34	8.25	0.04125	0.04968238	458.44
35	8.5	0.042	0.061609	458.44
36	8.75	0.04275	0.07353563	458.44
37	9	0.0435	0.08546225	482.05
38	9.25	0.043875	0.08182225	482.05
39	9.5	0.04425	0.07818225	482.05
40	9.75	0.044625	0.07454225	482.05
41	10	0.045	0.07090225	496.26
42	10.25	0.0455	0.079533	496.26

43	10.5	0.046	0.08816375	496.26
44	10.75	0.0465	0.0967945	496.26
45	11	0.047	0.10542525	503.44
46	11.25	0.04675	0.1207485	503.44
47	11.5	0.0465	0.13607175	503.44
48	11.75	0.04625	0.151395	503.44
49	12	0.046	0.16671825	512.46
50	12.25	0.04575	0.152321	512.46
51	12.5	0.0455	0.13792375	512.46
52	12.75	0.04525	0.1235265	512.46
53	13	0.045	0.10912925	512.61
54	13.25	0.045125	0.11758413	512.61
55	13.5	0.04525	0.126039	512.61
56	13.75	0.045375	0.13449388	512.61
57	14	0.0455	0.14294875	488.93
58	14.25	0.045375	0.13368894	488.93
59	14.5	0.04525	0.12442913	488.93
60	14.75	0.045125	0.11516931	488.93
61	15	0.045	0.1059095	481.52
62	15.25	0.044875	0.085762	481.52
63	15.5	0.04475	0.0656145	481.52
64	15.75	0.044625	0.045467	481.52
65	16	0.0445	0.0253195	481.52
66	16.25	0.044625	0.02213525	481.52
67	16.5	0.04475	0.018951	481.52
68	16.75	0.044875	0.01576675	481.52
69	17	0.045	0.0125825	485.87
70	17.25	0.04625	0.00955919	485.87
71	17.5	0.0475	0.00653588	485.87
72	17.75	0.04875	0.00351256	485.87
73	18	0.05	0.00048925	482.05
74	18.25	0.05075	0.00045469	482.05
75	18.5	0.0515	0.00042013	482.05
76	18.75	0.05225	0.00038556	482.05
77	19	0.053	0.000351	504.21
78	19.25	0.05225	0.00031688	504.21
79	19.5	0.0515	0.00028275	504.21
80	19.75	0.05075	0.00024863	504.21
81	20	0.05	0.0002145	515.51
82	20.25	0.04875	0.000234	515.51
83	20.5	0.0475	0.0002535	515.51
84	20.75	0.04625	0.000273	515.51
85	21	0.045	0.0002925	475.33
86	21.25	0.04375	0.000273	475.33
87	21.5	0.0425	0.0002535	475.33

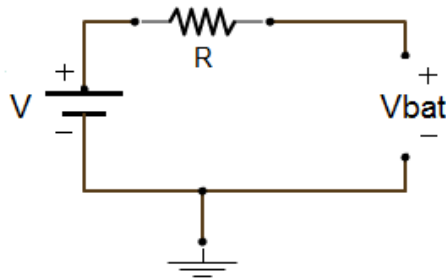
88	21.75	0.04125	0.000234	475.33
89	22	0.04	0.0002145	443.85
90	22.25	0.0395	0.0002145	443.85
91	22.5	0.039	0.0002145	443.85
92	22.75	0.0385	0.0002145	443.85
93	23	0.038	0.0002145	394.20
94	23.25	0.037125	0.00021365	394.20
95	23.5	0.03625	0.0002128	394.20
96	23.75	0.035375	0.00021196	394.20
Total		4	3.592	
Promedio				445.77

Fuente: De los autores, junio de 2016.

4.3.4. VARIABLE CARGA DE LA BATERÍA

Para realizar la validación del sistema de toma de decisiones, es necesario diseñar un modelo de baterías el cual permita simular de manera aproximada el comportamiento real de carga y descarga de la energía de la batería en la micro red [105]. Este modelo se basa en baterías tipo plomo-acido, el cual permite representar las baterías como circuito (ver figura 20), RC en el momento de carga, y para la descarga, se descarga el valor de energía que se requiere de consumo del hogar, el circuito tiene un tiempo característico de carga, dependiendo de las características internas de la batería y de la energía que debe suministrar a la micro red.

Figura 20. Circuito simplificado equivalente de la batería para la simulación.



Fuente: Modificada de [105], julio de 2016.

Los dos estados, tanto de carga como de descarga se representan en las ecuaciones 6 y 7 respectivamente. El proceso de carga y descarga de las baterías requiere de un valor inicial de carga de las baterías (V_0), para la ecuación 6 se cuenta con el valor nominal de voltaje (V), en este caso 12 voltios, se requiere de un tiempo (t) para conocer el tiempo requerido para cargar las baterías, este valor se establece en 15 minutos, es decir, 900 segundos de acuerdo a la granularidad de los datos expuestos en la sección 4.2. Para el proceso de descarga se requiere

sólo se requiere del valor anterior o inicial de energía de las baterías y el consumo del hogar medido en kWh, el modelo de descarga tiene en cuenta la resta de la energía almacenada menos la suplida. Con las ecuaciones es posible calcular la energía que poseen las baterías después de la carga o descarga, de donde se obtiene la variable Carga de las baterías al obtener el porcentaje de potencia que contienen estas (W_H). Los valores de la variable se guardan en cada ciclo, en la posición del vector del periodo del momento, para ser leído y tomar decisiones en la simulación del modelo de gestión dependiendo si esta carga es baja, media o alta.

$$W_H = \frac{400Ah}{1000} \left(12 + (V_o - 12)e^{-\frac{t}{6000}} \right) \quad (6)$$

$$W_H = V_o - \text{Consumo del hogar} \quad (7)$$

Para la aproximación de cada una de las variables de entrada del sistema de toma de decisiones, se realizó un preprocesamiento de los datos de manera detallada, para entender con exactitud los detalles de la obtención de los datos de la sección 4.3 se recomienda remitirse al Anexo D (PREPROCESAMIENTO DE LOS DATOS DEL SISTEMA DE TOMA DE DECISIONES).

4.4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para el proceso de validación del sistema de toma de decisiones, es necesario estudiar y establecer indicadores que permitan evaluar el rendimiento de la micro red y los posibles beneficios obtenidos. Existen diferentes indicadores utilizados en los modelos de energía reportados, algunos de gran peso para el sistema propuesto y otros no adaptables o ideales para ser utilizados (ver tabla 13). Es posible determinar la capacidad máxima de generación de energía fotovoltaica medida en kWh [105], al igual que el indicador de eficiencia se utiliza para medir la generación fotovoltaica esperada [71], por ende al comparar estas dos medidas se obtiene un valor o porcentaje de cómo trabaja el sistema fotovoltaico, su eficiencia, sin embargo, estos indicadores únicamente son útiles al ser aplicados en una micro red implementada, donde sea posible medir la generación efectiva y compararla con un valor esperado, ya que en el presente trabajo de grado se hace uso de una herramienta software para la simulación, no se realizará análisis de estos indicadores.

Otro indicador utilizado en los modelos hace referencia a la reducción del pico de la demanda [68][71], la curva se relaciona directamente con los cambios en los hábitos de consumo de cada usuario durante los picos de mayor precio de la energía. Sin embargo para el sistema propuesto no es posible simular el efecto de concientizar a los usuarios de consumir energía durante periodos de menor costo

y por tanto no se hace uso de este indicador. Las variaciones del consumo de energía, se ven reflejados principalmente en la reducción en la cantidad de energía que suministra la red proveedora de servicios a la micro red, teniendo en cuenta lo anterior se toma el indicador costo de la factura [71][67][106][66], el cual si es tomado en cuenta para realizar la evaluación del rendimiento del sistema propuesto, donde se obtiene un porcentaje de ahorro monetario al comparar el valor de la factura de energía pagada por el usuario antes de la implementación de la micro red y después de hacer uso del modelo de gestión de energía propuesto, la forma de facturación es igual a la cantidad de kWh consumidos multiplicados por el precio en pesos de cada unidad. Otro indicador que tiene en cuenta los aspectos monetarios y será tomado en cuenta como evaluador del sistema, es el indicador de retorno sobre la inversión [104][67], el cual muestra el porcentaje de dinero que mes a mes se retorna al costo total de la implementación de la micro red. El último indicador a usar como evaluador del sistema es el de autonomía [112], el cual expresa la reducción en porcentaje de la cantidad de energía que es suministrada por la red utilitaria, y por ende se puede medir tanto en tiempo como en kWh de consumo.

Tabla 13. Indicadores para la validación del sistema de toma de decisiones.

Indicador	Descripción	Artículo	Utilizado
Capacidad máxima de generación	Indica la cantidad máxima de energía que generan los paneles fotovoltaicos.	[105]	No
Eficiencia de generación	Se refiere a la comparación en porcentaje de la generación fotovoltaica teórica y la práctica.	[71]	No
Ahorro en la factura eléctrica	Se compara la factura de energía del hogar antes y después de la instalación de la micro red con el modelo de gestión de energía eléctrica.	[71][67] [106][66]	Si
Reducción del pico de la demanda	Indica el porcentaje de reducción del consumo de energía en el momento de mayor demanda.	[68][71]	No
Retorno de la inversión	Se calcula el costo total de la implementación de la micro red y se mide en cuanto tiempo, se recupera la inversión.	[104][67]	Si
Autonomía de la micro red	Se mide el porcentaje de cuenta energía es requerida por la micro red de la red utilitaria.	[112]	Si

Fuentes: De los autores, junio de 2016.

4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

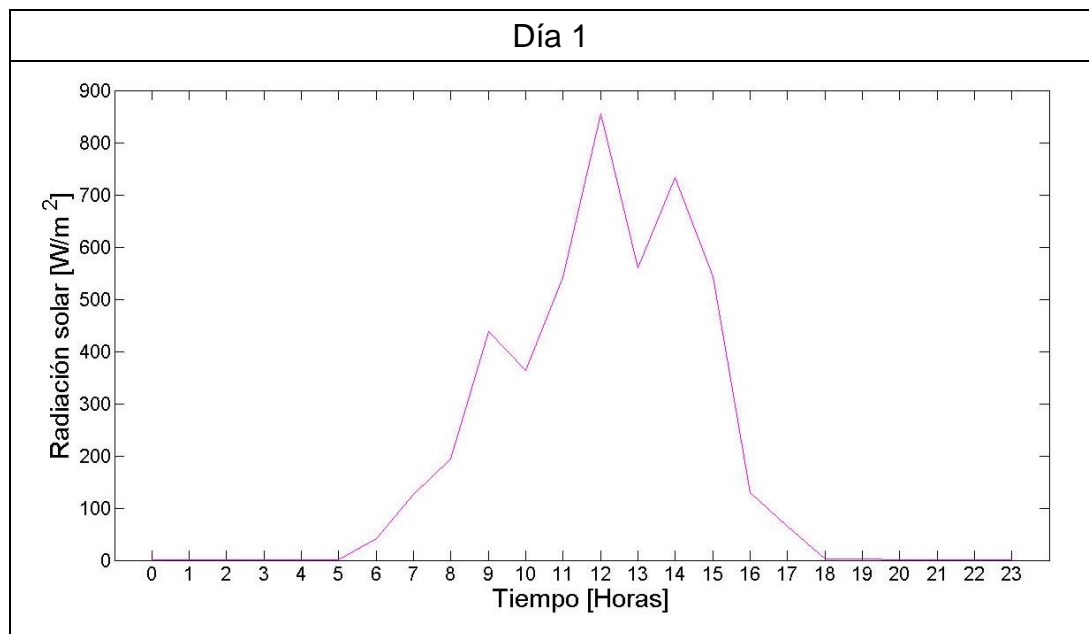
Los datos obtenidos después de implementar el sistema de toma de decisiones en la herramienta de simulación Matlab son graficados con el fin de obtener mejor información sobre el comportamiento de cada una de las variables de entrada como de salida en la micro red, finalmente se analiza cada uno de los indicadores para un día, una semana y un año, y de esta manera realizar la validación del sistema.

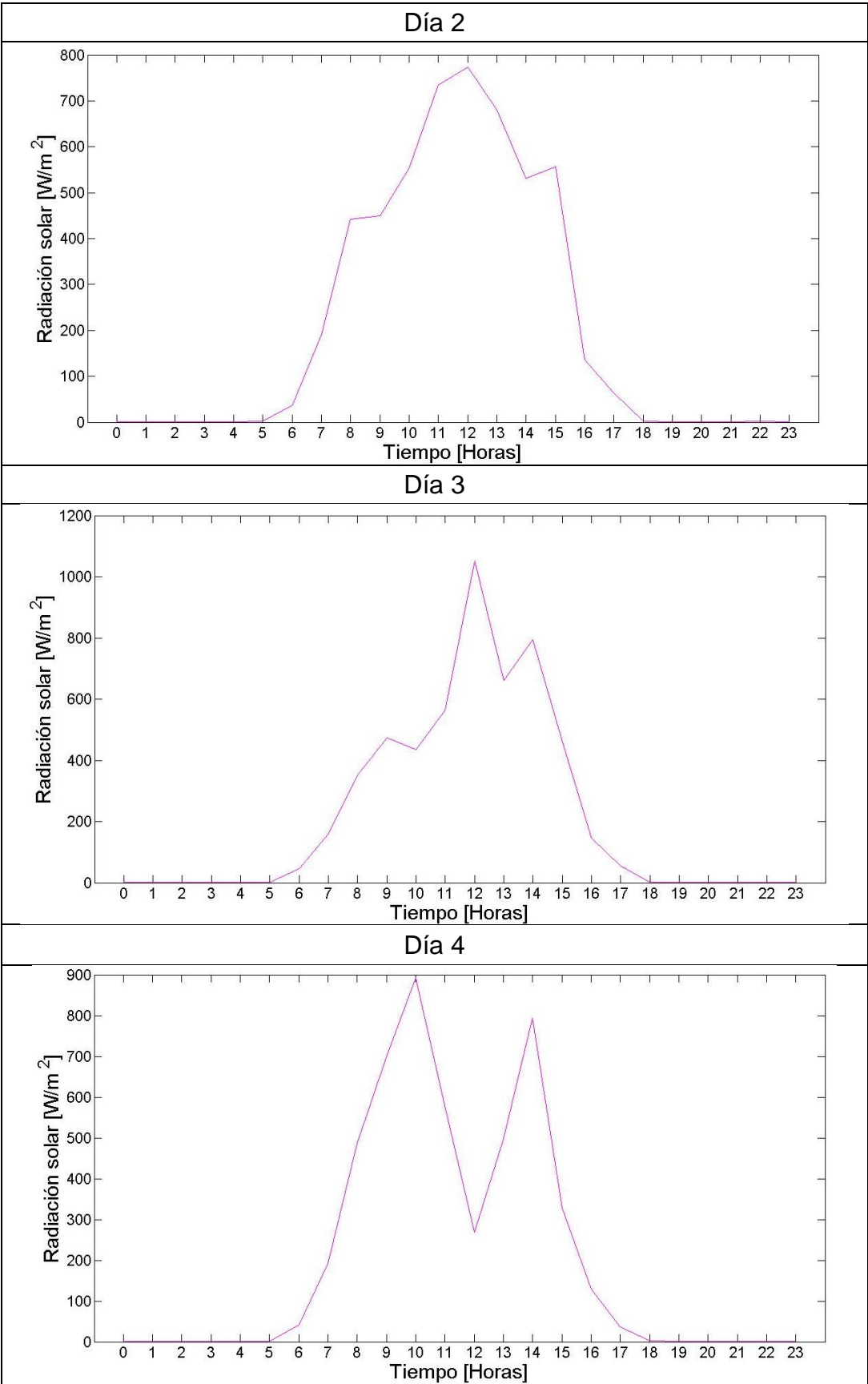
4.5.1. COMPORTAMIENTO DE RADIACIÓN SOLAR

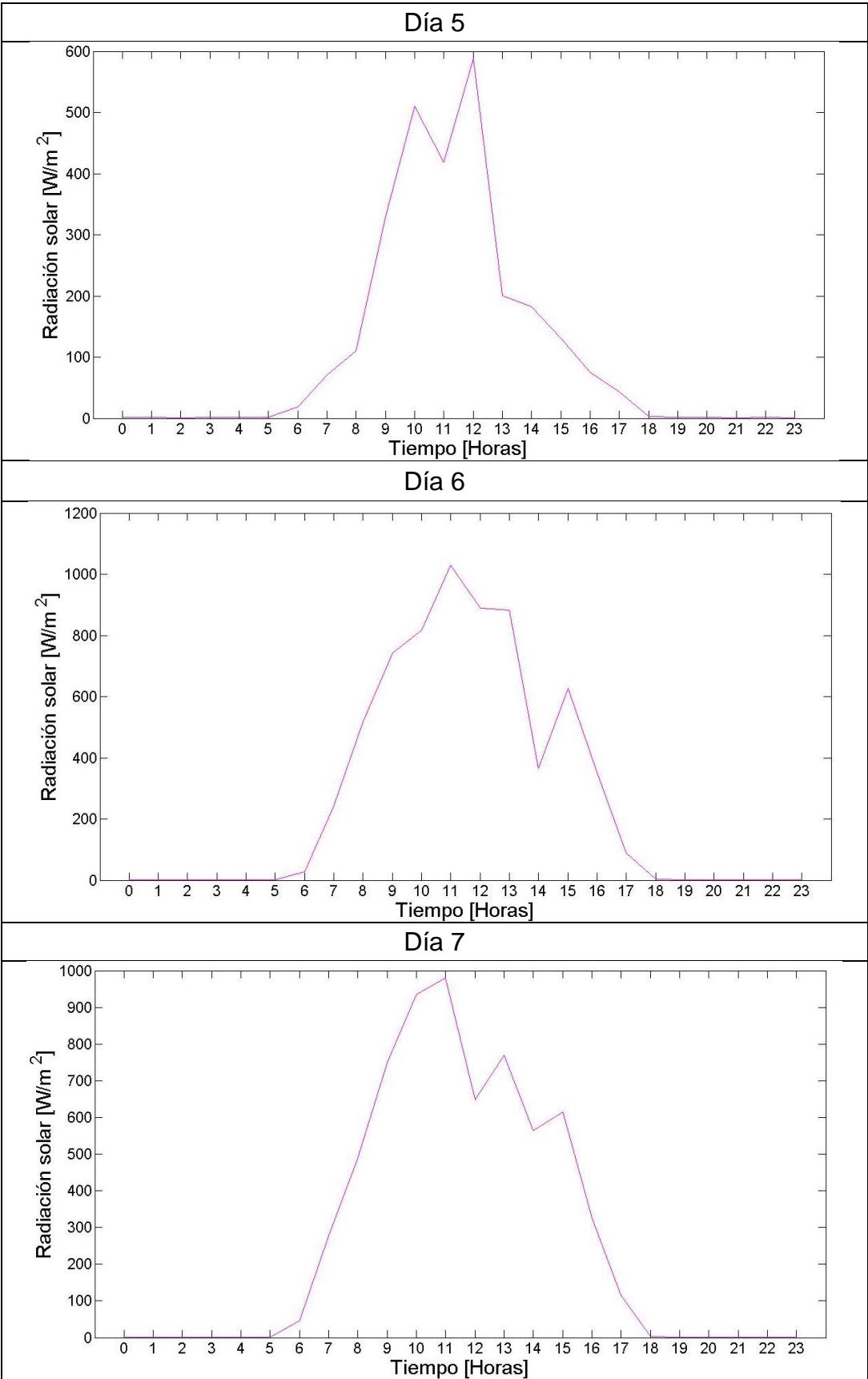
A partir de los datos de radiación solar de la ciudad de Popayán del mes de agosto y septiembre de 2015, se escogió para la simulación la semana del 7 al 13 de septiembre de 2015, debido a que en esos días se encuentran datos de radiación alta, media y baja, días con máxima radiación de 587.64 hasta 1,052.18 W/m^2 , es decir, diferentes condiciones climatológicas lo que permite apreciar distintos comportamientos del modelo de gestión de energía. Se grafican los datos de radiación solar de cada día de la semana seleccionada para entender el comportamiento de generación fotovoltaica en el sistema (ver figura 21).

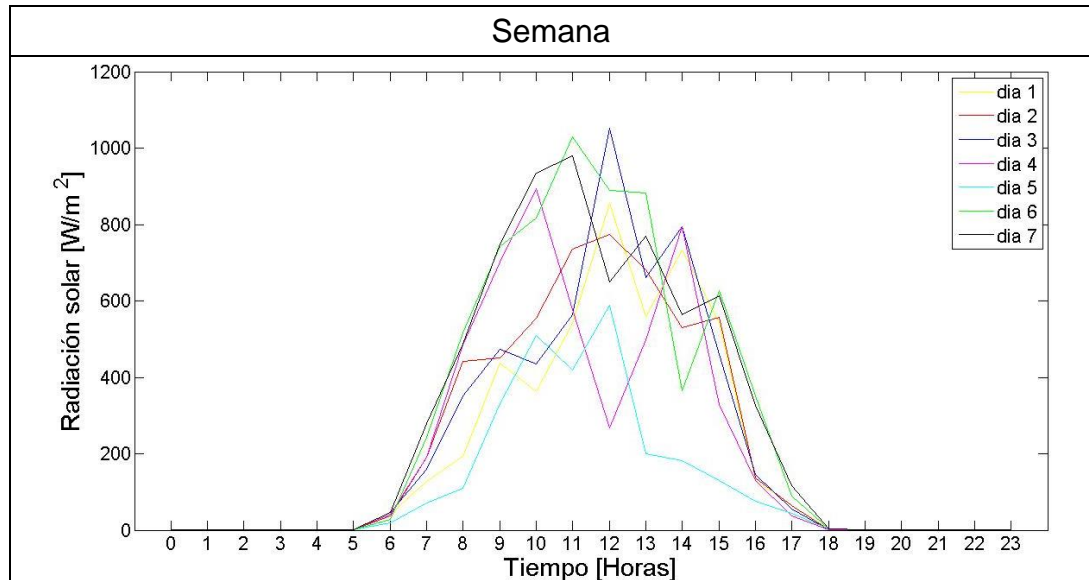
Luego de disponer de los datos de radiación solar, a partir de estos se definen los valores de generación fotovoltaica, como ya se cuenta con el consumo del hogar y el precio de energía en el mes de Septiembre como referencia para el valor promedio en pesos del kWh, se procede a realizar la simulación y análisis de resultados

Figura 21. Gráficas de radiación solar en Popayán, semana del 7 al 13 de septiembre de 2015.









Fuente: De los autores, julio de 2016.

4.5.2. COMPORTAMIENTO VARIABLES DE ENTRADA (1 DÍA)

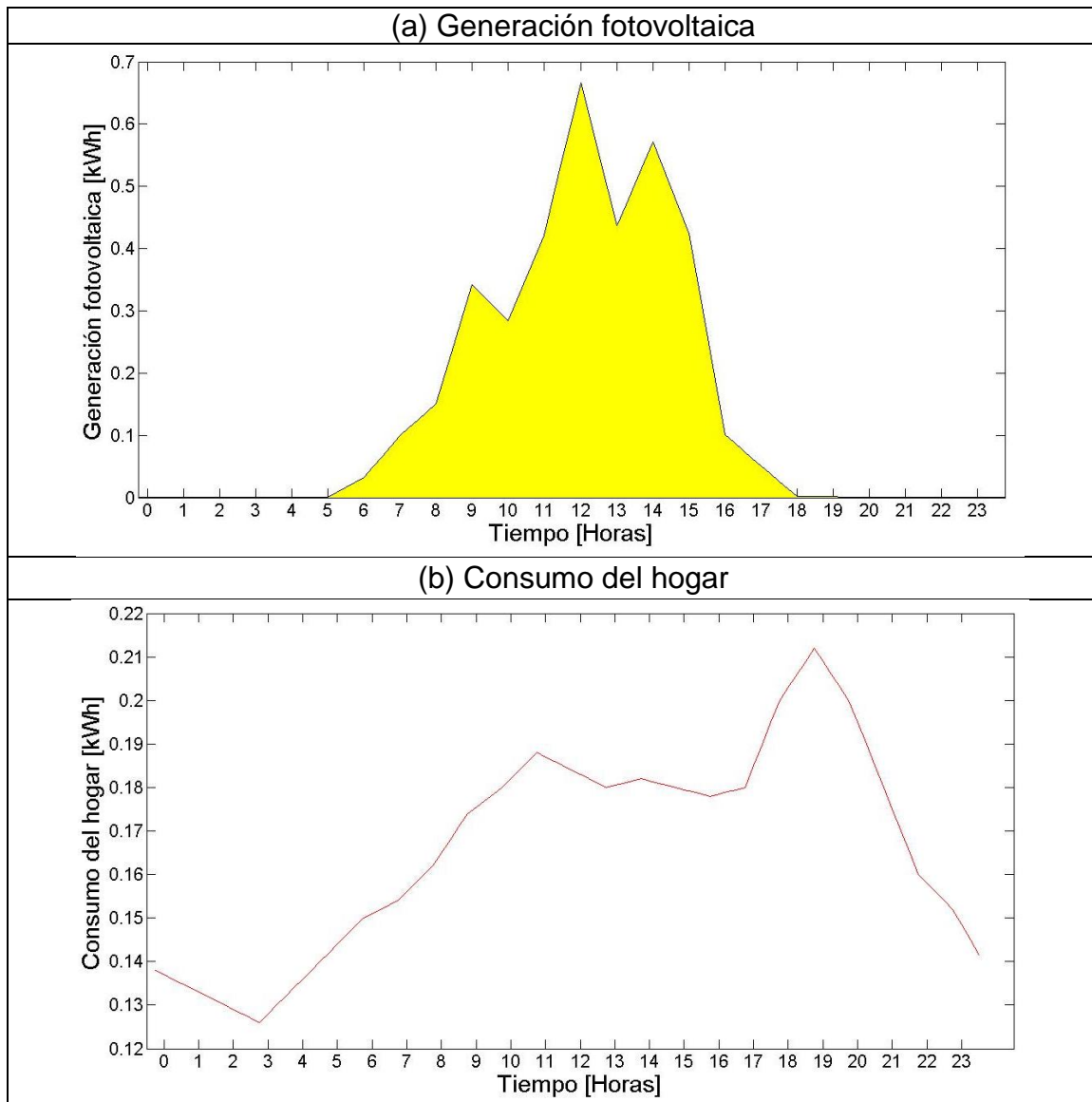
La primera variable de entrada a simular es la generación fotovoltaica (ver figura 22a), se obtiene a partir de los datos de radiación solar suministrados por la Compañía Energética de Occidente, donde se multiplica por el área de los paneles solares y por la eficiencia de estos (16.16 %) (ver ecuación 5). Se presenta un comportamiento esperado de acuerdo a la posición geográfica de la ciudad de Popayán, registrando el pico de generación alrededor de las 12 y 13 horas, con un valor de radiación solar de 855 W/m^2 , la gráfica también muestra que el sistema empieza a generar energía alrededor de las 6 horas hasta antes de las 17 horas, es decir, en estas horas se supera el valor umbral de generación mínima (0.003 kWh para 15 minutos, 15 W/m^2 de radiación solar), sin embargo la curva de generación está sujeta a los cambios climatológicos que se presentan a lo largo del día, generando los diferentes valles y picos.

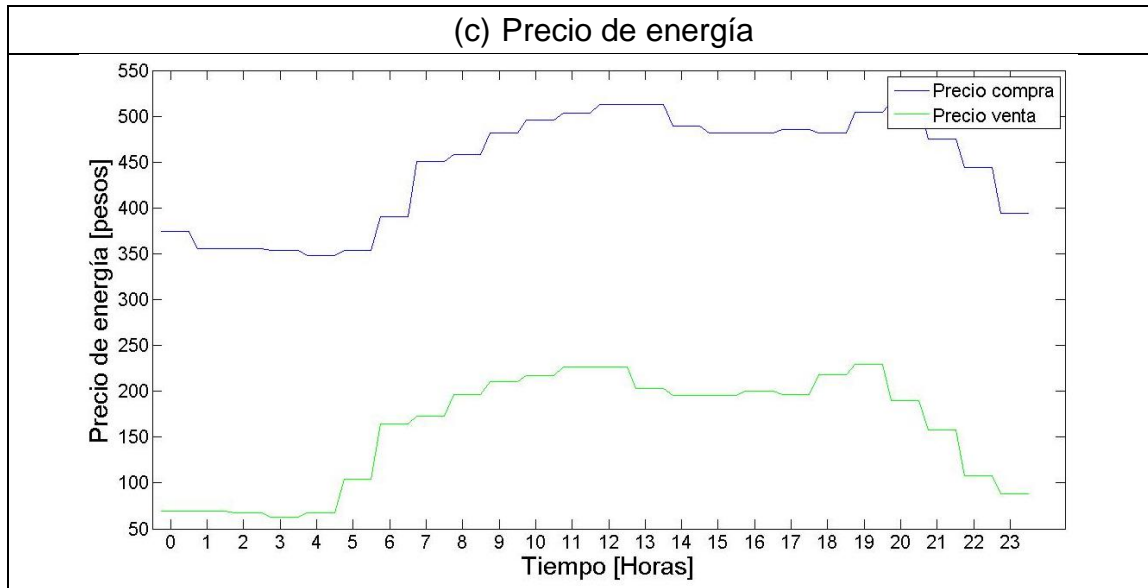
La curva del consumo del hogar describe un consumo energético aproximado de 4 kWh durante el día (ver figura 22b), registrando el pico medio de consumo entre las horas del mediodía y un pico alto entre las 19 y 21 horas, esta curva caracteriza el consumo que se tiene en promedio para un día laboral en Colombia, es decir, los días comprendidos entre lunes y viernes. Esta curva de consumo energético permite observar los puntos en que la micro red exige mayor cantidad de energía, por tanto hace posible predecir los momentos en que es necesario hacer uso de la energía almacenada en las baterías y de la red utilitaria.

La curva del precio de energía a la cual se compra energía, y el precio de venta de la energía al cual vende la micro red a la red utilitaria, muestran el mismo

comportamiento (ver figura 22c), esto es debido a que el precio de venta es el mismo de compra pero no tiene en cuenta los componentes de distribución, comercialización y administración, por tanto el precio de venta de energía es menor. Realizando una comparación entre los picos de consumo de energía y los picos de precio de la energía, es evidente la relación entre estas dos variables, ya que en los momentos de mayor demanda el precio de la energía es mayor, con el fin de incentivar a mejores hábitos de consumo de energía en el hogar. El rango entre el precio más alto y el menor, es de \$200 por cada kWh consumido, lo que significa una variación significativa al realizar el cobro o facturación en comparación al actual método de facturación en el cual se utiliza un único precio al mes.

Figura 22. Comportamiento de las variables de entrada, día 1 (7 de septiembre de 2015).





Fuente: De los autores, julio de 2016.

La carga de la batería también es una variable de entrada, pero el comportamiento de esta depende de las otras variables y se obtiene en cada ciclo el nuevo valor, sólo se introduce en una carga inicial, se supone el 20 %, valor determinado a partir del fabricante, este puede ser bajo o alto, sin embargo se escoge el caso menos favorable con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema.

4.5.3. COMPORTAMIENTO VARIABLES DE SALIDA E INDICADORES (1 DÍA)

A partir de los datos introducidos en el sistema, se obtienen las gráficas de Configuración micro red (ver figura 23a), Carga de la batería (ver figura 23b) y factura de energía (ver figura 23c).

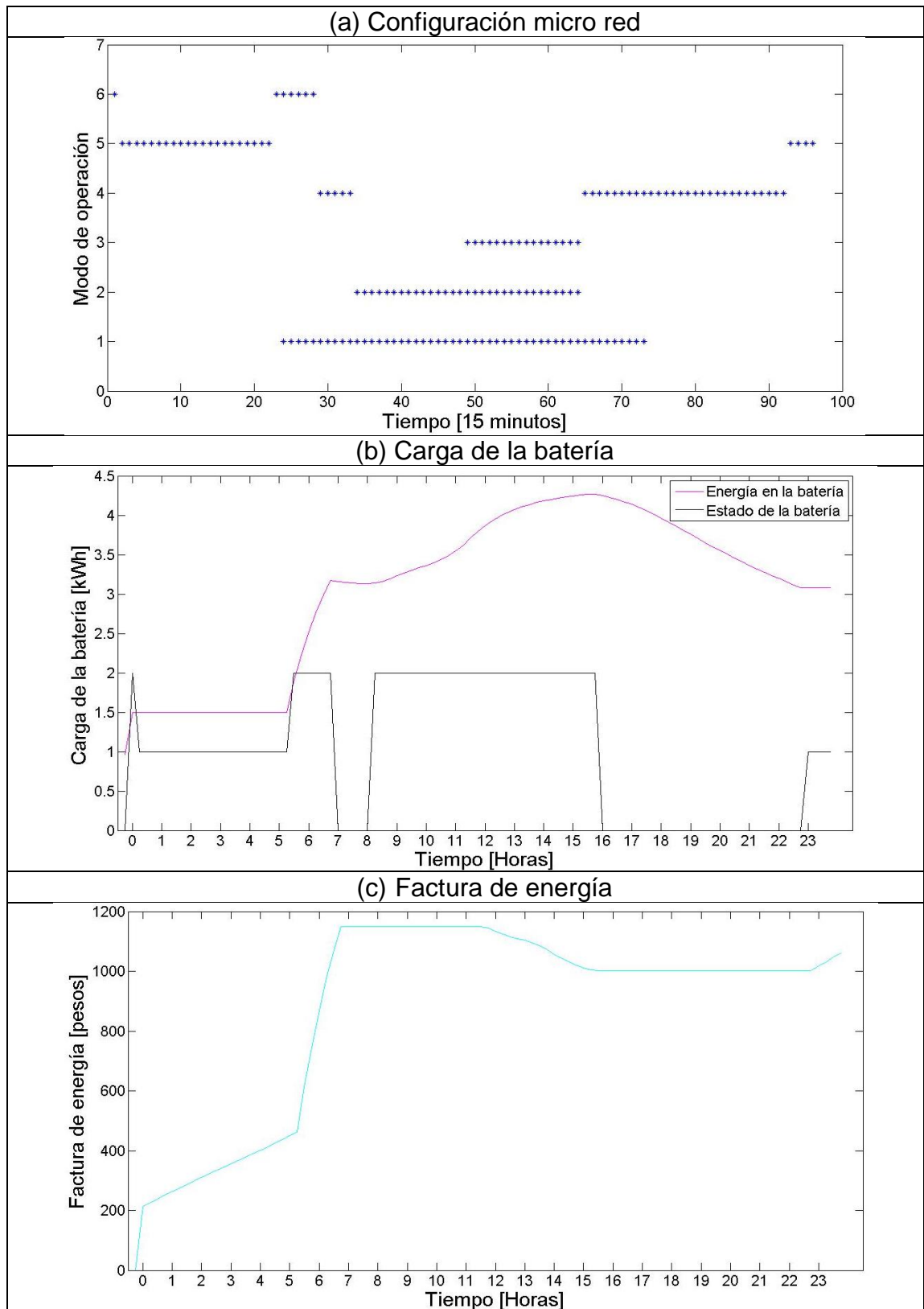
La primera gráfica describe el comportamiento de la variable de salida, donde se muestran los modos presentes en la simulación, los seis modos aparecen en algún momento de la simulación. En las horas del día donde existe generación fotovoltaica, se presentan los modos 1, 2 y 3 ya que estos dependen de la energía generada, la cual se envía a la micro red para suplir el consumo, carga las baterías y la energía que sobra se exporta y vende a la red utilitaria. Comparando estos datos con la predicción descrita en la sección 3.7, el Modo 1 se presenta en un 52 %, es decir, aproximado a lo esperado (54 %), los modos 2 y 3 se presentan alrededor de un 32 y 16 % respectivamente, se supuso que únicamente se iban a presentar en un 7 %, ya que sólo están presentes en una regla del sistema, sin embargo estos dos modos aparecen cuando existe generación fotovoltaica y debido a que hay generación la mitad del día, se presentan en una mayor cantidad de periodos de los previstos. Cuando ya no existe generación y las baterías tienen suficiente energía almacenada, se presenta el Modo 4, donde estas se descargan

para suplir el consumo del hogar, este modo se presenta en la simulación un 34 % de las veces, se esperaba obtener en un 33 %, el Modo 5 se presenta al inicio del día ya que en este momento el precio de la energía es bajo entonces se compra energía desde la red utilitaria, este modo está presente en la mayoría de reglas (33 %), para esta simulación se obtiene un valor de 28 % de utilización del modo 5, donde se aprecia que la diferencia con la predicción no es tan grande. Finalmente, el Modo 6 casi no se presenta en el sistema, sin embargo en el momento en que el precio es bajo y las baterías no se encuentren tan cargadas se presenta este modo, en un 5 % de las veces, comparando este resultado con la predicción, donde se espera que se presente en un 20 % del tiempo, se encuentra una diferencia de menos de la mitad del tiempo presente en la simulación, esto es debido a que durante el día hay pocos momentos donde el precio de energía es bajo y el Modo 6 depende de esta condición. Cada uno de los porcentajes determinados anteriormente, es definido a partir del número de veces que aparece el modo en los periodos de tiempo (96).

La variable Carga de la batería tiene diferentes estados presentes en la gráfica, se muestra que el estado de valor 0 se refiere al proceso de descarga de las baterías, el estado 1 permite representar a las baterías en un estado neutro, donde sólo se mantiene la carga de las baterías para el uso en un momento indicado, finalmente el estado de valor 2 se refiere al momento en que las baterías se cargan. Por otro lado, la curva que describe la energía almacenada en las baterías tiene un valor inicial de carga de 20 %, por lo tanto la curva empieza con 0.96 kWh y de acuerdo al comportamiento de las variables de entrada, la curva realiza un incremento, decremento o simplemente mantiene el valor de la carga. Al final del día las baterías terminan con valor de carga (3.0794 kWh), el cual representa la carga inicial del siguiente día. La curva de carga tiene una pendiente más pronunciada que la de descarga, la cual depende de la cantidad de consumo de energía, lo que evidencia el funcionamiento esperado del sistema de almacenamiento.

El precio total que se debe pagar por la factura es el valor que registra al final del día, este valor se incrementa y disminuye según las condiciones del sistema. En los momentos en que se evidencia un incremento, es debido a la compra de energía a la red utilitaria, en el inicio del día, al no contar con generación fotovoltaica se requiere comprar energía, ya sea para suplir el consumo o cargar las baterías, por tanto el precio de la factura incrementa. Al transcurrir el día se empieza a generar energía, de esta forma se brinda energía tanto al hogar como a las baterías, sin embargo existe exceso de generación el cual se exporta a la red utilitaria y se vende para obtener beneficio económico, en ese momento la curva de la factura de energía presenta un decrecimiento, reduciendo el precio total a pagar, en este caso del día 1, se factura \$1,069.90.

Figura 23. Gráficas de las variables de salida del sistema, día 1 (7 de septiembre de 2015).



Fuente: De los autores, julio de 2016.

Para realizar la validación del sistema de toma de decisiones, se analizan los indicadores definidos en la sección 4.4, el primer indicador es el ahorro en la factura eléctrica, este valor se obtiene al comparar la factura antes y después de la implementación de la micro red, para este caso, el valor normal de factura es igual a los kWh consumidos por el precio fijo promedio, es decir, 4 kWh consumidos en el día por \$445.77, valor por kWh, (ver tabla 12), se obtiene un total de \$1,783.09 (precio antes), se compara con \$1,060.90 (precio después), y se obtiene un ahorro del 40.50 % para el primer día.

El indicador de la autonomía de la micro red se mide a partir de la cantidad de energía comprada a la red utilitaria, ya que se refiere al porcentaje de energía que la micro red es capaz de suplir de manera independiente, de los 4 kWh del consumo total, se compran para el día 1, 3.2507 kWh, de lo que se obtiene una autonomía del 18.73 %.

Para los dos indicadores se obtienen resultados aceptables pero no excelentes, ya que se obtiene un ahorro económico pero bajo y una autonomía aún menor, estos indicadores el primer día no son los más óptimos, debido a que las baterías cuentan con una carga inicial baja, pero finalizan con una carga media/alta, lo que indica que el siguiente día la carga inicial va a ser mayor, de esta manera se requeriría comprar menos energía a la red utilitaria y al mismo tiempo se reduce el valor de la factura de energía, es decir, se mejoran los indicadores.

El indicador del retorno de la inversión es difícil de medir para un día de simulación, ya que depende del ahorro total de la factura de energía, el cual es un valor muy bajo en pesos para un sólo día y por el otro lado, el costo total de la implementación de la micro red tiene un alto costo debido a que la micro red se plantea para una vida útil de años. Por esto, este indicador no se analiza en la simulación de un día ni una semana, únicamente se valida en la simulación para un año (sección 4.5.5).

4.5.4. SIMULACIÓN PARA UNA SEMANA

Se realiza la simulación para cada día de la semana, donde los valores de generación fotovoltaica cambian a partir de los datos de radiación solar de CEO, el consumo del hogar es el mismo entre semana y diferente los fines de semana, el precio de la energía permanece con el mismo comportamiento durante el mes y el valor inicial de la carga de las baterías es el valor final del día anterior, las gráficas de los días 2 al 7 se encuentran en el Anexo E (RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL 8 AL 13 DE SEPTIEMBRE DE 2015). Se obtiene el total de los resultados de los indicadores para una semana (ver figura 13) y se valida el sistema.

Tabla 14. Resultados de simulación para una semana (7 al 13 de septiembre de 2015).

Día	Consumo del hogar [kWh]	Carga inicial batería [kWh]	Factura de energía [pesos]	Energía comprada [kWh]
1	4	0.96	1,060.9	3.2507
2	4	3.0794	205.90	1.3443
3	4	3.1232	187.08	1.3367
4	4	3.1107	230.23	1.337
5	4	3.0883	518.23	1.3964
6	3.788	2.5656	147.90	1.768
7	3.773	3.2901	-158.13	1.1124
Total	27.561		2,192.13	11.5455

Fuente: De los autores, julio de 2016.

Para encontrar el ahorro económico, se toma como referencia la factura con la que se cuenta antes y después de la implementación de la micro red con el sistema de toma de decisiones, el precio que se tiene inicialmente es igual a la multiplicación del consumo del hogar total (27.561 kWh) por el precio promedio de cada kWh (\$445.77), es decir, \$12,285 pesos, este valor en comparación con la factura que se tiene después de implementar el sistema propuesto (\$2,192.13 pesos), se obtiene un ahorro de 82.15 %, lo que se entiende por un alto ahorro económico, donde el usuario solo debe pagar el 17.85 % de su factura anterior, permitiendo dar un retorno sobre la inversión a menor plazo.

Para la autonomía de la micro red, se tiene en cuenta el consumo de energía total registrado en la micro red al final de los siete días simulados (27.561 kWh) y la energía total comprada en el mismo periodo de tiempo (11.5455 kWh) desde la red utilitaria, se obtiene una autonomía del 58.10 % en la micro red con las condiciones expuestas, es decir, se hace uso en un 41.89 % de la red utilitaria, sin embargo estos valores están sujetos principalmente a las condiciones climatológicas y el comportamiento del consumo diario.

La generación fotovoltaica a lo largo de toda la semana permite observar la continua fluctuación de radiación solar en la zona (ver figura 24a), esto indica que las condiciones de trabajo para la micro red están en constante cambio, obligando al sistema de toma de decisiones adaptarse a la situación y evaluar el modelo más indicado para obtener mejores resultados en los indicadores de rendimiento. Con la radiación que describe el día 5, y las condiciones de consumo energético en un día laboral, se espera que la cantidad de energía que se requiere de la red utilitaria es mayor, por tanto la autonomía es menor y el precio de la factura es mayor, sin embargo existen casos como el día 6 en la cual la radiación es óptima, esto genera un rendimiento sobresaliente en los indicadores. Las horas de mejor radiación coinciden en todos los días, resultado esperado debido a la cercanía de

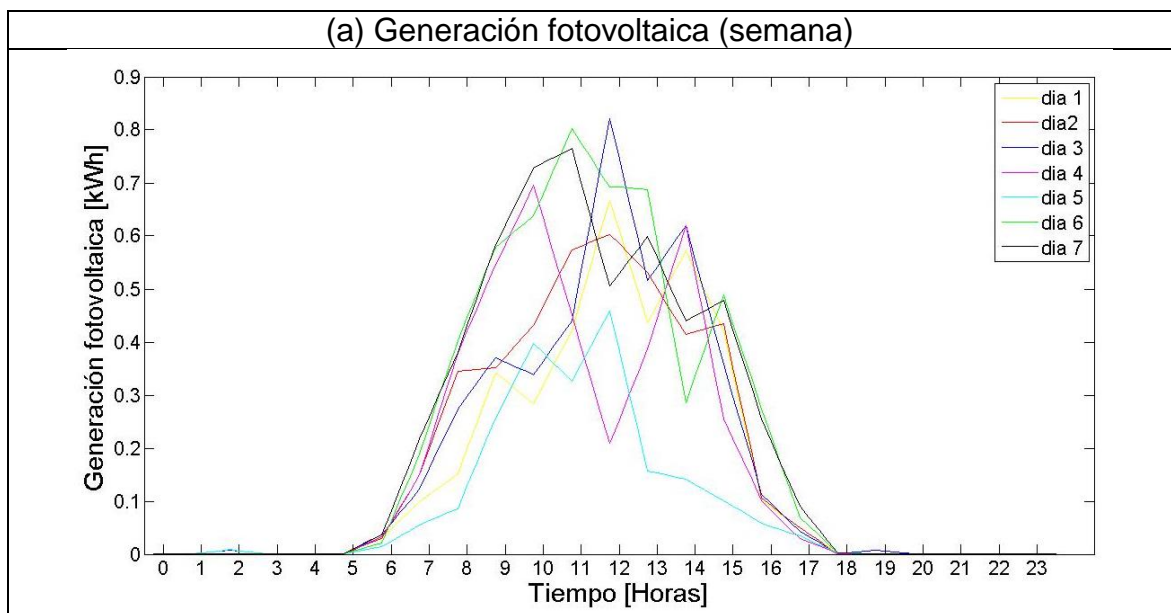
la ciudad de Popayán con el eje ecuatorial, esto permite al sistema conocer con anticipación en que horas del día se rebasa o no el umbral de generación.

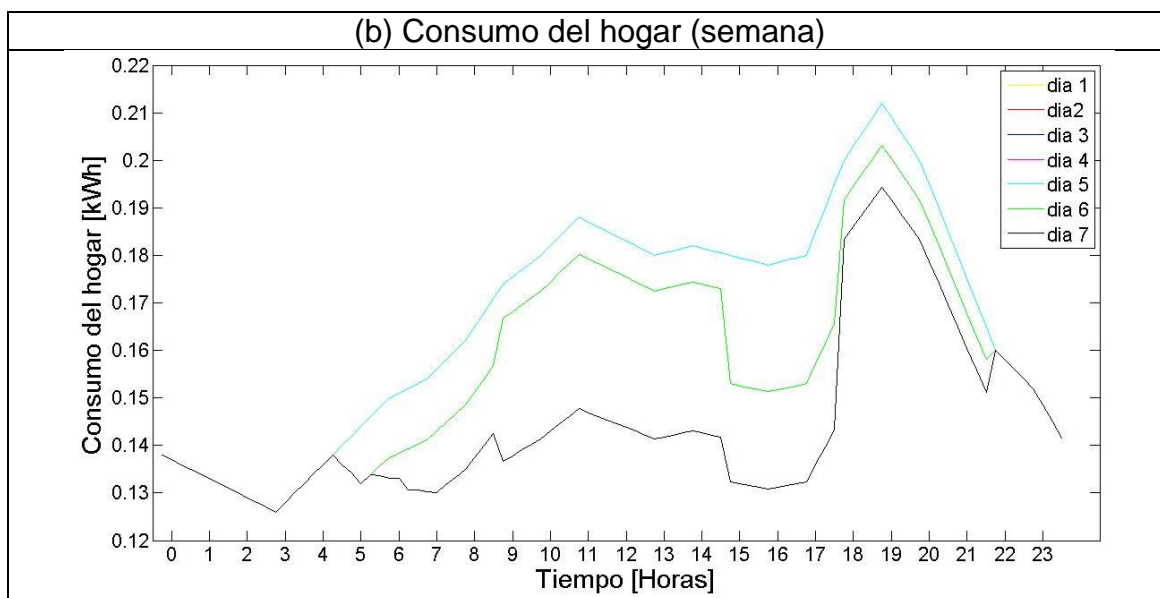
El consumo energético durante los días laborales o días de semana, presenta mayores picos de consumo a los registrados en los días no laborales (ver figura 24b), esto debido a la industria y las labores que se realizan solo durante estos días, los picos de consumo disminuyen para el día sábado y en mayor cantidad el día domingo, sin embargo el comportamiento es similar donde los valores picos de consumo incrementan hacia el final del día.

El precio de la energía fluctúa constantemente durante el día dependiendo de la demanda energética, por tanto está directamente relacionado a la curva del consumo promedio de un hogar en Colombia, el precio promedio durante el mes es igual y se comporta de la misma forma ya que la finalidad del precio variable es cambiar la forma y horas de consumo por parte de los usuarios, si los hábitos cambian el precio de consumo disminuye y como resultado se tiene un aplanamiento de la curva reduciendo los valores picos de consumo y del precio a pagar.

La carga de la batería tiene un valor inicial con el cual inicia la simulación, al finalizar el día, las baterías tienen un valor de carga determinado el cual es tomado por el sistema como el valor inicial del siguiente día, por tanto es un proceso continuo, este valor tiene influencia directa sobre la cantidad de energía que se requerirá al día siguiente y la cantidad que se podrá exportar a la red utilitaria.

Figura 24. Resultados de simulación para la semana del 7 al 13 de septiembre de 2015.





Fuente: De los autores, julio de 2016.

4.5.5. SIMULACIÓN PARA UN AÑO

Los resultados obtenidos inicialmente para un día y posteriormente para una semana completa de simulación, están basados sobre datos de consumo y generación para una semana. Para un periodo de simulación de un año, los resultados son el cálculo de la factura de energía de cada semana, donde influye la variación de la radiación solar, estos datos se toman a partir de la radiación promedio de cada día, tomados desde la base de datos de la *NASA Surface meteorology and Solar Energy* [124]. Se relacionan los datos de radiación solar de cada semana y el costo unitario del kWh de cada mes, para obtener la factura eléctrica (FE) antes y después de la implementación de la micro red, los resultados se listan en la tabla 15 y de esta manera se obtiene el pago anual con el sistema implementado y sin este.

Tabla 15. Resultados de simulación para el año 2015.

Semana	Generación fotovoltaica [kWh]	Costo unitario [pesos]	FE (Después) [pesos]	FE (Antes) [pesos]
1	21.58	409	2,599.50	11,247.5
2	22.66	409	2,475.61	11,247.5
3	21.91	409	2,560.35	11,247.5
4	32.11	409	1,747.03	11,247.5
5	33.26	418	1,723.74	11,495
6	27.89	418	2,055.64	11,495
7	27.03	418	2,121.04	11,495
8	19.14	418	2,995.39	11,495
9	19.53	421	2,956.63	11,577.5

10	19.15	421	3,015.30	11,577.5
11	22.54	421	2,561.80	11,577.5
12	26.73	421	2,160.23	11,577.5
13	21.87	421	2,640.29	11,577.5
14	24.7	441	2,448.83	12,127.5
15	21.23	441	2,849.08	12,127.5
16	19.99	441	3,025.82	12,127.5
17	22	441	2,749.37	12,127.5
18	22.28	418	2,573.24	11,495
19	23.89	418	2,399.82	11,495
20	19.96	418	2,872.33	11,495
21	22.84	418	2,510.14	11,495
22	21.26	454	2,927.63	12,485
23	20.51	454	3,034.69	12,485
24	22.88	454	2,720.34	12,485
25	22.77	454	2,733.48	12,485
26	19.64	454	3,169.12	12,485
27	21.05	437	2,847.39	12,017.5
28	24.23	437	2,473.69	12,017.5
29	20.54	437	2,918.08	12,017.5
30	21.51	437	2,786.49	12,017.5
31	21.16	442	2,864.99	12,155
32	22.01	442	2,754.35	12,155
33	26.28	442	2,306.82	12,155
34	22.90	442	2,647.30	12,155
35	23.73	451	2,602.73	12,402.5
36	20.55	451	3,010.11	12,402.5
37	21.70	451	2,850.58	12,402.5
38	26.70	451	2,316.77	12,402.5
39	22.75	451	2,719.02	12,402.5
40	20.59	460	3,064.21	12,650
41	22.90	460	2,755.11	12,650
42	23.68	460	2,664.36	12,650
43	20.78	460	3,036.19	12,650
44	23.83	469	2,699.39	12,897.5
45	20.72	469	3,104.56	12,897.5
46	23.74	469	2,709.62	12,897.5
47	24.66	469	2,608.54	12,897.5
48	23.29	478	2,814.98	13,145
49	18.86	478	3,476.19	13,145
50	20.32	478	3,226.42	13,145
51	23.27	478	2,817.40	13,145
52	27.93	478	2,347.33	13,145
Total			140,049.6	632,390.0

Fuente: De los autores, agosto de 2016.

Se realiza el cálculo del ahorro anual (ver ecuación 8) con el fin de hallar el valor del indicador retorno sobre la inversión, el cual permite calcular el tiempo en años en el cual se espera que la micro red genere beneficios económicos para el pago total de la inversión utilizada para la implementación de todo el sistema (ver sección 2.2.3). El retorno sobre la inversión es el valor total de implementar la micro red dividido el ahorro total para un año (ver ecuación 9).

$$\text{Ahorro Anual} = \text{Pago Anual (Sin Sistema)} - \text{Pago Anual (Con Sistema)} \quad (8)$$

$$\text{Ahorro Anual} = \$632,390 - \$140,049 = \$492,341$$

$$\text{Tiempo de Retorno Aproximado} = \frac{\text{Costo Total Micro Red}}{\text{Ahorro Anual}} \quad (9)$$

$$\text{Tiempo de Retorno Aproximado} = \frac{\$5'962,920}{\$492,341} = 12.11 \text{ años}$$

El tiempo aproximado que se obtiene para dar retorno a la inversión es de 12 años y 1 mes, considerando que la expectativa de tiempo de uso para la micro red está entre 15 y 20 años, sin considerar el cambio del sistema de almacenamiento [104], el valor obtenido representa ganancia del doble de la inversión durante todo el tiempo de funcionamiento del sistema, si existe cambio de las baterías, las cuales duran alrededor de 12 años [125], el retorno a la inversión se realiza en el mismo periodo de tiempo, aunque se debe considerar el cambio de estas con un valor de \$1'071,252 pesos, recuperados alrededor de 2 años para los siguientes 8 años de operación de la micro red. Sin embargo, este valor puede cambiar dependiendo de factores relacionados directamente con el precio de los componentes de la micro red, ya que a mayor costo de los componentes, mayor tiempo será necesario para dar retorno a la inversión, por tanto se consideraron elementos que permitan tener balance entre el costo y la calidad de los mismos, ya que productos económicos no tienen buena eficiencia ni tampoco un tiempo de vida útil extenso, entonces los elementos considerados para la micro red pueden variar de acuerdo a los requerimientos que tenga cada usuario.

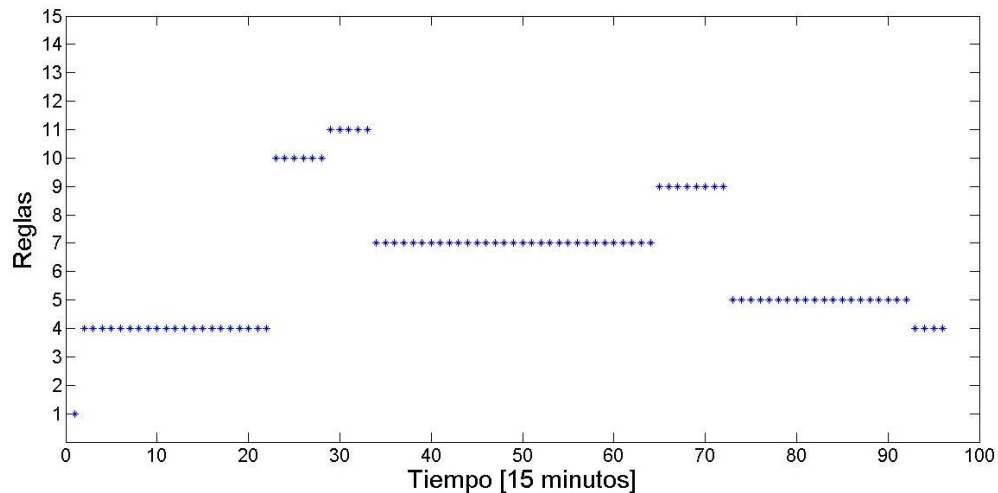
4.6. REGLAS PRESENTADAS EN LA SIMULACIÓN

A partir de la simulación del sistema, se obtienen las reglas presentadas en el primer día, de las 15 reglas se presentan 6, debido a que dependen de los valores de las variables de entrada, la regla más presentada es la 7 en un 33 %, esta se presenta en el momento del día donde existe generación fotovoltaica, ya que en este instante la mayor parte del tiempo la generación es mayor que el consumo del hogar y para esta condición solo existen las reglas 6 y 7, sin embargo la regla

6 no se presenta ya que la carga de la batería no es mayor o igual al 90 %, es decir, no se tiene una carga alta. Durante la primera parte del día se presenta en un porcentaje mínimo la regla 1, ya que se tiene un valor inicial de carga de la batería bajo y el precio en ese momento también lo es. Luego se presenta la regla 4 en un 26 %, ya que se carga la batería un poco más y esta tiene un valor medio, y debido a que durante el inicio del día el precio es bajo, se queda en la misma regla durante un periodo de tiempo largo.

Cuando empieza a haber generación fotovoltaica pero esta aún no es mayor que el consumo del hogar, se presentan las reglas de la 8 a la 15, para este caso en específico, debido a que la carga de la batería permanece media, solo se presentan las reglas 10 cuando el precio es bajo y 11 cuando este aumenta, sin embargo estos modos aparecen durante un corto tiempo porque la generación aumenta rápidamente y se presenta después la regla 7. Al disminuir la generación a lo largo del día, este valor es menor que el consumo y se presenta la regla 9, en un 8 %, ya que las baterías se encuentran con un valor de carga alta al almacenar energía recientemente desde los paneles fotovoltaicos. Al final de la simulación, no existe generación fotovoltaica y se presenta la regla 5, ya que la carga de la batería sigue siendo media pero para este momento el precio es medio o alto y se mantiene esta regla un 20 %, luego cuando el precio disminuye se vuelve a presentar la regla 4 hasta el inicio del siguiente día (ver figura 25).

Figura 25. Reglas presentadas en la simulación, día 1, 7 de septiembre de 2015.



Fuente: De los autores, julio de 2016.

Comparando los resultados obtenidos en la simulación con la predicción de las reglas (sección 3.7), se determina un acercamiento entre estos, ya que las reglas que se presentan son la 1, 4, 5, 7, 9, 10 y 11, y las que se esperaban eran las reglas 4, 5, 6, 7, 10 y 11, donde la carga de la batería se mantiene media, ya que

se espera mantener al sistema de almacenamiento en niveles medios y no en los límites. Para los días restantes de simulación se presentan las mismas reglas junto a la número 8, con un total de 8 reglas presentadas durante la simulación de una semana.

Aunque no se presenten todas reglas en esta simulación, son necesarias bajo unos escenarios en específico, es por esto que se analizan en el sistema de toma de decisiones. La regla 2 aparece en un escenario cuando no se ha superado el umbral de generación, la carga de la batería es baja y el precio es medio o alto, esto sucede en el momento de la noche donde no hay generación, alrededor de las 19 y 21 horas donde el precio es alto y puede existir el caso en que las baterías no se encuentren cargadas y tengan un valor mínimo del 10 %. La regla 3 aparece en el mismo escenario, solo que en este caso la carga de la batería es baja y mayor al 10 %. La regla 6 aparece en el mismo escenario que la regla 7 donde se supera el umbral de generación y esta es mayor que el consumo, solo que la carga de la batería no es tan alta, sin embargo para obtener esta regla se presenta un escenario donde la batería se introduce al sistema totalmente cargada. Las reglas 12, 13, 14 y 15 se presentan cuando existe generación pero es menor al consumo y en este momento la carga de las baterías es baja, este escenario se presenta cuando no ha sido posible cargar las baterías durante el día y tienen un valor inicial bajo, ya que depende de la hora del día si el precio es bajo, medio o alto para tomar la decisión correcta del sistema. Para conocer los resultados de cada uno de los escenarios donde se presentan todas las reglas del sistema, referirse al Anexo F (SIMULACIÓN DE ESCENARIOS PARA TODAS REGLAS).

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado se expuso el estudio, diseño y evaluación de un modelo de gestión de energía eléctrica para una micro red ubicada en la ciudad de Popayán. Se determinaron las especificaciones de la micro red, se diseñó el sistema de toma de decisiones teniendo en cuenta diferentes modelos de gestión de energía reportados y se realizó la evaluación del respectivo sistema. Con el fin de evaluar el comportamiento y los respectivos indicadores se realizó una simulación con todos los datos necesarios para la semana del 7 al 13 de septiembre del año 2015. En este capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros del trabajo de grado Modelo de Gestión de Energía Eléctrica para Micro Redes Residenciales en el Marco de las *Smart Grid* en Colombia.

5.1. CONCLUSIONES

- 1) La revisión de documentos y diferentes visitas técnicas a micro redes operacionales generadas durante la elaboración del presente trabajo de grado, permitieron obtener la información relacionada con generación de energía a partir de fuentes renovables y almacenamiento de energía, aportando a establecer los principales aspectos técnicos, geográficos y económicos que se deben tener en cuenta para implementar una micro red funcional, para el caso aplicado de un hogar estrato 4 de consumo promedio de 4 kWh al día en la ciudad de Popayán, Colombia.
- 2) El modelo de gestión de energía propuesto está contemplado por el objetivo de la ley 1715 de 2014, de promover el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), donde según el artículo 10° se financiarán los programas y proyectos de FNCER dirigidos al sector residencial de estratos 1, 2 y 3. Y según el artículo 11°, como incentivo, los obligados a pagar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta por los 5 años siguientes al año gravable, hasta el 50 % del valor total de la inversión realizada.
- 3) En el presente trabajo de grado se llevó a cabo el diseño y simulación de un sistema de toma de decisiones para una micro red residencial de generación fotovoltaica, la cual se soportó a partir del análisis del estado del arte de los últimos modelos de gestión de energía reportados a la fecha, los cuales permitieron proponer las 15 reglas del sistema y los 6 modos de configuración de la micro red. Se logró establecer una diferencia entre cada uno de los modelos ya desarrollados y el propuesto.
- 4) A partir de la investigación de los diferentes modelos de gestión de energía eléctrica se establecieron 3 indicadores utilizados para la evaluación del sistema

de toma de decisiones, lo que permitió establecer puntos de comparación, el primer indicador de ahorro en la factura eléctrica evidencia el sobresaliente comportamiento del sistema, obteniendo un ahorro económico del 82.15 % para cada factura mensual. El porcentaje de uso de energía desde la red utilitaria es de 41.89 %, lo que indica que la micro red tiene una autonomía de 58.10 %, representando mayor uso de recursos propios que externos, sin embargo este valor llega a ser más óptimo al concentrar las reglas en mejorar el indicador de autonomía. El retorno sobre la inversión se realiza en 12 años y 1 mes indicando un beneficio económico de alrededor de 8 años más de funcionamiento de la micro red.

5) Los diferentes modos de operación del sistema de toma de decisiones se presentan dentro de la micro red de acuerdo a las diferentes variables de entrada, se determinó que los modos 1 y 4 los que más predominan debido a que las condiciones externas se repiten durante un periodo largo de tiempo, el Modo 1 se presenta cuando existe generación fotovoltaica, hecho que sucede alrededor de 50 % del tiempo, y el Modo 4 descarga la batería, es decir, estos dos modos se encuentran asociados con los recursos de la micro red, buscando mayor autonomía. Por otro lado, el modo menos presente es el Modo 6, ya que trabaja sobre situaciones específicas y se refiere a la compra de energía desde la red utilitaria para suplir el consumo y cargar las baterías, esto se espera una menor parte del tiempo para aumentar la autonomía.

6) El crecimiento en el número de micro generadores de energía a partir de recursos naturales, genera aplanamiento sobre la curva de la demanda energética y cultura de ahorro, por tanto, se obtiene un impacto positivo sobre el sistema interconectado nacional (SIN) de Colombia.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado dan oportunidad a plantear algunos trabajos futuros que contribuyen al desarrollo del sistema de toma de decisiones y su aplicación para creación de una micro red a partir de energías renovables, para ello se propone:

- 1) Realizar la simulación del sistema de toma de decisiones junto a un modelo más exacto del sistema de almacenamiento de energía, el cual represente el comportamiento de carga y descarga de las baterías teniendo en cuenta mayor número de características internas de estas.
- 2) Determinar las reglas del sistema de toma de decisiones con el objetivo de obtener mayor autonomía.

- 3) Realizar la implementación hardware de la micro red junto al sistema de toma de decisiones propuesto en la ciudad de Popayán.
- 4) Analizar el impacto en la eficiencia de la micro red al usar otra fuente de energía renovable como la energía eólica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE SMART GRID, "About - IEEE Smart Grid," *IEEE SMART GRID*. [Online]. Available: <http://smartgrid.ieee.org/about-ieee-smart-grid?highlight=WyJzbWFydCIsImdyYWQlLCJncmlkJ3MiLCJzbWFydCBncmlklI0=>. [Accessed: 24-Nov-2015].
- [2] A. Massoud-Ain and B. F. Wollenberg, "Toward a Smart Grid: Power delivery for the 21st century," *IEEE Power EnergyMag*, vol. 3, pp. 34–41, 2005.
- [3] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Energy-Efficient Information and Communication Infrastructures in the Smart Grid: A Survey on Interactions and Open Issues," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 179–197, 2015.
- [4] International Energy Agency, "Technology Roadmap Smart Grids," *Int. Energy Agency*, p. 52, 2011.
- [5] G. W. Rathjens, "Energy and climate change," *Preserv. Glob. Environ. Chall. Shar. Leadersh.*, 1991.
- [6] Clean Energy Ministerial, Energy Technology Network, and ISGAN, "ISGAN," *CLEAN ENERGY Minist.*
- [7] S. Atkins, S. Baynes, J. Braatvedt, K. Blackmore, A. Bogacka, C. Davis, J. Kreusel, R. Nicholson, G. Rackliffe, and S. Xu, "Smart Grid 2013 Global Impact Report," *VaasaETT Glob. Energy Think Tank*, 2013.
- [8] U.S. Department of Energy, "Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project," 2011.
- [9] P. Wang, "SMART GRID PROJECT CATALOGUE : PART 1 , BY PROJECT MAIN APPLICATION ISGAN Inventory Report," *Int. smart grid action Netw.*, no. 3, 2013.
- [10] M. Richard, "RESCoop 20 -20 -20," *Intell. Energy Eur. Program. Eur. Union*, pp. 1–41.
- [11] Energinet.dk, "Annual Report 2014 - Ready energy - now and into the future," 2014.
- [12] Greenlys, "GreenLys, smart energy for the future: The 1st Large Scale Smart Grid Demo in France," *Greenlys*, no. May, pp. 1–14, 2013.
- [13] Korea Smart Grid Institute, "South Korea : Jeju Island Smart Grid Test-Bed Developing Next Generation Utility Networks," *GSMA*, 2012.
- [14] M. Norris, R. Cliff, R. Sharp, S. Koci, H. Gardner, M. Keorner, E. Beeman, G. Erder, A. Harpham, J. Allen, E. Langham, and J. Downes, "Smart Grid, Smart City: Shaping Australia's Energy Future," *Ausgrid*, no. July, 2014.
- [15] R. Kempener, P. Komor, and A. Hoke, "Smart Grids and Renewables - A Guide for Effective Deployment," *Int. Renew. Energy Agency*, no. November, p. 47, 2013.
- [16] C. Escobar, J. Garcés, and H. Rudnick, "El mundo y los Smart Grids: ¿Qué tan cerca estamos?," Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de

Chile, 2009.

- [17] Ruta N Medellín, “SMART GRID,” 2015. [Online]. Available: <http://rutanmedellin.org/es/recursos/abc-de-la-innovacion-rutan/item/smart-grid>. [Accessed: 19-Nov-2015].
- [18] A. A. Díaz, P. Roda, and G. . Sierra, “REFLEXIONES SOBRE LA IMPLEMENTACION DE REDES INTELIGENTES EN EL MEM.” 2012.
- [19] COLOMBIA ANDESCO, “La confiabilidad de la energía en Colombia,” in *14° Congreso Mercado de Energía Mayorista CNO-CAC*, 2008.
- [20] V. E. Pérez Vélez, “Estudio preliminar sobre la viabilidad de la implementación de medidores inteligentes de energía en los estratos 1, 2 y 3 de Cali,” Univeersidad del Valle, 2013.
- [21] R. Cespedes, “Propuesta para el desarrollo de Redes Inteligentes en Colombia Definiciones,” *ACIEM*, p. 32, 2011.
- [22] P. H. Corredor Avella, “Visión de las redes inteligentes en Colombia,” *Expert. en mercados XM*, pp. 14–18, 2012.
- [23] SGI&C - FNCER, “Redes Inteligentes en Colombia,” *Unidad de Planeación Minero Energética*. [Online]. Available: <http://www1.upme.gov.co/sgic/?q=content/redes-inteligentes-en-colombia>. [Accessed: 19-Nov-2015].
- [24] XM S.A. E.S.P, “Sostenibilidad-Sociedad-Prácticas,” *Informe Mensual XM*, 2014. [Online]. Available: <http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/sostenibilidad/4-2-2-8-Iniciativa-Colombia-Inteligente.aspx>. [Accessed: 19-Nov-2015].
- [25] Javier Rosero, “Movilidad Eléctrica y tecnología de vehículos eléctricos,” 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=-8tW7yPkOc4&index=14&list=PLfRdy4o3Ui5ydnbzSuN0KOfFBaEQQI5BD>. [Accessed: 27-Nov-2015].
- [26] WORLD ENERGY COUNCIL, “Colombia advances 8 places in global ranking on energy sustainability,” *NEWS AND MEDIA*, 2014. [Online]. Available: <https://www.worldenergy.org/news-and-media/press-releases/colombia-will-advance-8-places-in-global-ranking-on-energy-sustainability/>. [Accessed: 27-Jan-2016].
- [27] M. E. Ruiz A, “Seminario TIC y desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe : experiencias e iniciativas de política . Este seminario preguntas : busca responder a las siguientes,” *Colomb. Intel.*, 2012.
- [28] A. D. Acosta Medina, “A PROPÓSITO DEL COSTO DE LA ENERGÍA,” Federación Nacional de departamentos, Bogotá, 2015.
- [29] A. D. Acosta Medina, “El costo de la energía en Colombia,” *Economía y Sociedad*, 2015. [Online]. Available: <http://www.razonpublica.com/index.php/econom%C3%ADa-y-sociedad/8727-el-costo-de-la-energ%C3%ADa-en-colombia.html>. [Accessed: 01-Feb-2016].

- [30] A. M. Macias and J. Andrade, "Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático," *UPME*, p. 8, 2014.
- [31] El País, "Colombia vive al borde de un racionamiento de la energía," *Crisis en Colombia*, 2016. [Online]. Available: http://internacional.elpais.com/internacional/2016/03/08/colombia/1457458704_289136.html. [Accessed: 14-Jul-2016].
- [32] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Estructura del sector CREG." [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/energia/estructura-energia>. [Accessed: 25-Nov-2015].
- [33] Comisión de Regulación de Energía y Gas, "Funciones CREG." [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/index.php/creg/quienes-somos/funciones>. [Accessed: 25-Nov-2015].
- [34] Universidad del Cauca, "Nuevas Tecnologías en el Sector Eléctrico," 2015.
- [35] Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución No. 119*. Colombia, 2007.
- [36] L. Chiappe, "¿ Por qué es tan cara la energía eléctrica en Colombia ?," *Revista Dinero*, 2015. [Online]. Available: <http://www.dinero.com/pais/articulo/costos-energia-colombia/212216>. [Accessed: 03-Dec-2015].
- [37] S. Tellez and A. Alarcón, "Gestión de la demanda en redes eléctricas inteligentes," 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=YdGgFutEWJw&index=12&list=PLfRdy4o3Ui5ydnbzSuN0KOfFBaEQQI5BD>. [Accessed: 27-Nov-2015].
- [38] Congreso De Colombia, *Ley N° 1715 Del 13 De Mayo De 2014*. Colombia, 2014, p. 26.
- [39] U.S. Department of Energy, "Renewable Energy," *ENERGY.GOV*. [Online]. Available: <http://www.energy.gov/science-innovation/energy-sources/renewable-energy>. [Accessed: 30-Nov-2015].
- [40] Australian Renewable Energy Agency, "What is renewable energy?," *Australian Government*. [Online]. Available: <http://arena.gov.au/about-renewable-energy/>. [Accessed: 30-Nov-2015].
- [41] Solar Energy Industries Association, "Solar Energy," *Solar Energy Industries Association*. [Online]. Available: <http://www.seia.org/about/solar-energy>. [Accessed: 02-Dec-2015].
- [42] U.S. Department of Energy, "What Type of Energy is Solar?," *National Renewable Energy Laboratory*. [Online]. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/solar-energy/tech.html>. [Accessed: 02-Dec-2015].
- [43] U. Dept. of Energy, "DOE Microgrid Workshop Report," *Off. Electr. Deliv. Energy Reliab. Smart Grid R&D Progr.*, p. 32, 2011.
- [44] CIGRE, "WG C6.22 Microgrids," *sc c6 Distribution Systems and Dispersed*

- Generation*. [Online]. Available: <http://c6.cigre.org/WG-Area/WG-C6.22-Microgrids>. [Accessed: 04-Dec-2015].
- [45] J. Romankiewicz, M. Qu, C. Marnay, and N. Zhou, "International Microgrid Assessment: Governance, INcentives, and Experience (IMAGINE)," 2012.
- [46] M. Burr, "Trends and opportunities for states and communities," in *2015 Energy Policy Outlook Conference*, 2015.
- [47] a a Salam, A. Mohamed, and M. a Hannan, "Technical Challenges on Microgrids," *ARPJ J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 64–69, 2008.
- [48] M. Burr, "Achieving community goals with solar energy microgrid technologies, and strategic planning and development." Microgrid Institute, pp. 1–13, 2014.
- [49] G. Carpinelli, F. Mottola, D. Proto, and A. Bracale, "Objective optimal scheduling of a low voltage microgrid: A minimum-cost strategy with peak shaving issues," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*, 2012, pp. 682–687.
- [50] U.S. Department of Energy, "How Microgrids Work," *ENERGY.GOV*, 2014. [Online]. Available: <http://www.energy.gov/articles/how-microgrids-work>. [Accessed: 04-Dec-2015].
- [51] D. Lu and B. François, "Strategic framework of an energy management of a microgrid with a photovoltaic-based active generator," *2009 8th Int. Symp. Adv. Electromechanical Motion Syst. Electr. Drives Jt. Symp. ELECTROMOTION 2009*, no. July, pp. 1–3, 2009.
- [52] G. Chappel, "Green Economy and Trade Opportunities – Renewable Energy," *Int. Trade Cent.*, no. June, pp. 1–8, 2012.
- [53] W. Andrés and V. Lozada, "Desarrollo De Materiales Fotovoltaicos Usados Como Ventana Óptica En Celdas Solares," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [54] The Royal Academy of Engineering, *Wind energy*, no. April. London, 2014.
- [55] C. Soares, "GAS TURBINES IN SIMPLE CYCLE and COMBINED CYCLE APPLICATIONS," *Gas Turbines A Handb. Land, Sea Air Appl.*, p. 74, 1998.
- [56] S. Kumar and V. K. Garg, "A Hybrid Model of Solar-Wind Power Generating System," *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 2, no. 8, pp. 4107–4116, 2013.
- [57] U.S. Office of Electricity Delivery & Energy Reliability Energy storage, "Energy Storage Systems." [Online]. Available: <http://energy.gov/oe/technology-development/energy-storage>.
- [58] P. Medina, a. W. Bizuayehu, J. P. S. Catalao, E. M. G. Rodrigues, and J. Contreras, "Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis," *2014 47th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, pp. 2295–2304, 2014.
- [59] F. Schüth, "Sistemas de almacenamiento energético," *Investig. Cienc.*, no. 432, pp. 70–77, 2012.

- [60] F. Valdovinos and R. Otárola, "Almacenamiento de Energía : Desarrollos Tecnológicos y Costos," p. 15, 2008.
- [61] I. Patrao Herrero, "Concepción e integración en microrredes residenciales de inversores multinivel sin transformador de aislamiento con extracción simultánea de la máxima potencia de múltiples generadores fotovoltaicos.," Universitat Politècnica de Valencia, 2015.
- [62] R. Hertel and N. Frager, "Smart Metering Solutions," no. October. 2010.
- [63] M. Aguado Alonso and D. Rivas Ascaso, *La Red Inteligente de Energía y Comunicaciones: Generalidades y Visión de Futuro*. 2011.
- [64] H. Kanchev, D. Lu, F. Colas, V. Lazarov, and B. Francois, "Energy management and power planning of a microgrid with a PV based active generator for smart grid applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 10, pp. 4583–4592, 2011.
- [65] C. L. Nge, O. M. Midtgård, and L. Norum, "PV with battery in smart grid paradigm: Price-based energy management system," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 575–579, 2012.
- [66] A. R. Boynuegri, B. Yagcitekin, M. Baysal, A. Karakas, and M. Uzunoglu, "Energy Management Algorithm for Smart Home with Renewable Energy Sources," *4th Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 13–17, 2013.
- [67] Y. Wang, X. Lin, and M. Pedram, "Adaptive control for energy storage systems in households with photovoltaic modules," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 992–1001, 2014.
- [68] S. Choi, M. Sin, D. Kim, C. Won, and Y. Jung, "Versatile Power Transfer Strategies of PV - Battery Hybrid System for Residential Use with Energy Management System," *Power Electron. Conf. (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 Int.*, pp. 409–414, 2014.
- [69] F. D. Mohammadi and A. Feliachi, "Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System," *T&D Conf. Expo. 2014 IEEE PES*, pp. 1–5, 2014.
- [70] M. Arora and S. Chanana, "Residential Demand Response from PV Panel and Energy Storage Device," *Power Electron. (IICPE), 2014 IEEE 6th India Int. Conf.*, 2014.
- [71] S. Kim, S. Member, S. Bae, and S. Member, "Energy Management Based on the Photovoltaic HPCS With an Energy Storage Device," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4608–4617, 2015.
- [72] H. Hatta, M. Asari, and H. Kobayashi, "Study of energy management for decreasing reverse power flow from photovoltaic power systems," *2009 IEEE PES/IAS Conf. Sustain. Altern. Energy*, pp. 1–5, 2009.
- [73] T. Niknam, F. Golestaneh, and A. Malekpour, "Probabilistic energy and operation management of a microgrid containing wind/photovoltaic/fuel cell generation and energy storage devices based on point estimate method and

- self-adaptive gravitational search algorithm,” *Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 427–437, 2012.
- [74] Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Glosario de términos,” *CREG*. [Online]. Available: <http://www.creg.gov.co/index.php/en/normatividad/glosario/Glossary-1/>. [Accessed: 15-Oct-2015].
- [75] Z. Miao, L. Xu, V. Disfani, and L. Fan, “An SOC-Based Battery Management System for Microgrids,” *Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 966–973, 2014.
- [76] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “PROYECCIÓN DE DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA,” *Minist. Minas y Energía*, p. 39, 2008.
- [77] M. T. Chaichan, B. A. Mohammed, and H. A. Kazem, “Effect of pollution and cleaning on photovoltaic performance based on experimental study,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 4, 2015.
- [78] M. Arrieta Paternina, L. C. Olmos Villalba, J. L. Izquierdo Nuñez, and R. A. Álvarez López, “Design of an solarphotovoltaic system prototype optimizing the slope angle of the solar panels,” *Prospectiva*, vol. 10, no. 1, pp. 97–107, 2012.
- [79] F. Carmona, “Visita técnica Compañía Energética de Occidente,” 2016.
- [80] M. Aarre Maehlum, “Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film,” *ENERGY INFORMATIVE*, 2015. [Online]. Available: <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>. [Accessed: 09-Mar-2016].
- [81] M. Aarre Maehlum, “Micro-Inverters vs. Central Inverters,” *ENERGY INFORMATIVE*, 2014. [Online]. Available: <http://energyinformative.org/are-solar-micro-inverters-better-than-central-inverters/>. [Accessed: 09-Mar-2016].
- [82] Electrificadora del meta S.A. E.S.P., “Capítulo 5. Medición de energía eléctrica,” pp. 1–5.
- [83] L. D. Watson and J. W. Kimball, “Frequency regulation of a microgrid using solar power,” *26th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 321–326, 2011.
- [84] C. J. Colavito and J. Michael, “Deploying Solar-Plus-Storage Microgrids,” *SolarPro Magazine*, 2015. [Online]. Available: http://solarprofessional.com/articles/design-installation/deploying-solar-plus-storage-microgrids?v=disable_pagination. [Accessed: 09-Feb-2016].
- [85] JLM ENERGY, “Gridz,” *Technology*, 2015. [Online]. Available: <http://jlmenergyinc.com/products/gridz/>. [Accessed: 10-Feb-2016].
- [86] JLM ENERGY, “Energizr Electrical Diagrams Energizr-E1-SMIAC-GEN200-SLD,” *Energizr Electr. Diagrams*, 2015.
- [87] SolarCity, “GridLogic A Turnkey Microgrid-as-a-Service Solution.” 2015.
- [88] M. Zeman, “Photovoltaic Systems,” in *Solar Cells*, Delft University of

- Technology, 2012, pp. 1–9.
- [89] CANADIAN SOLAR INC., “PV Module Product Dataset CS6P-250|255|260P.” 2014.
- [90] Universidad Tecnológica de Panamá and Western New England University, “SMART Team Panamass,” Cali, 2015.
- [91] Tecnológico de Monterrey, “Team itesm querétaro mx,” *Sol. Decathlon Lat. Am. Caribb.* 2015, 2015.
- [92] Enphase Energy, “Enphase M215 Microinverter Datasheet.” 2015.
- [93] A. Cotter, “Technology Advisory – Tesla Energy PowerWall,” *Nation Rural Electr. Coop. Assoc.*, no. April 2015, pp. 1–5, 2015.
- [94] TESLA, “Tesla Powerwall,” *Energy Storage for a Sustainable Home*, 2016. [Online]. Available: <https://www.teslamotors.com/powerwall?redirect=no>. [Accessed: 08-Feb-2016].
- [95] “Solar Inverters, Power Optimizers and PV Monitoring | SolarEdge,” *SolarEdge*. [Online]. Available: <http://www.solaredge.com/>. [Accessed: 13-Mar-2016].
- [96] SolarEdge, “Single Phase Inverters for North America,” pp. 1–2, 2011.
- [97] Amazon, “Siemens 3RH19 11-1GA13 Control Relay.” [Online]. Available: https://www.amazon.com/Siemens-11-1GA13-Auxiliary-Connection-Identification/dp/B009MBBGP6/ref=sr_1_107?ie=UTF8&qid=1468680458&sr=8-107&keywords=contactor+electrical. [Accessed: 15-Jul-2016].
- [98] Corinex Communications Corp., “Corinex Smart Meter Module Datasheet,” pp. 1–2, 2012.
- [99] X. Zhao and S. Liu, “Design of a Monitoring System Design of a Monitoring System,” vol. 1, no. 15, pp. 1–15, 2013.
- [100] Kanglida, “12v 200ah Gel Battery,” *Storage batteries*. [Online]. Available: http://www.alibaba.com/product-detail/12v-200ah-gel-battery-solar-mini_60096389037.html?spm=a2700.7735675.30.75.sNlvRB&s=p. [Accessed: 01-Mar-2016].
- [101] MIDNITE SOLAR INC, “Battery Capacity Meter Datasheet.” .
- [102] Ministerio de Minas y Energia, “Caracterización energética sectores residencial, comercial y terciario,” *Colomb. (Bogotá D.C)*, p. 135, 2006.
- [103] U. Sangpanich, “A Novel Method of Decentralized Battery Energy Management for Stand-Alone PV-Battery Systems,” *Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific*, pp. 1–5, 2014.
- [104] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and a Delaille, “Energy flow management in grid connected PV systems with storage - A deterministic approach,” *Ind. Technol. 2009. ICIT 2009. IEEE Int. Conf.*, no. 1, pp. 1–6, 2009.
- [105] A. Bouharchouche, E. M. Berkouk, and T. Ghennam, “Control and Energy Management of a Grid Connected Hybrid Energy System PV Wind with

Battery Energy Storage for Residential Applications,” in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013 8th International Conference and Exhibition on*, 2013, pp. 1–11.

- [106] Y. Riffonneau, S. Bacha, F. Barruel, and S. Ploix, “Optimal Power Flow Management for Grid Connected PV Systems With Batteries,” *Sustain. Energy, IEEE Trans.*, vol. 2, no. 3, pp. 309–320.
- [107] S. Y. Mousazadeh, M. Savaghebi, A. Beirami, A. Jalilian, J. M. Guerrero, and C. Li, “Control of a Multi-Functional Inverter for Grid Integration of PV and Battery Energy Storage System,” pp. 474–480, 2015.
- [108] M. Castillo-Cagigal, E. Caama??o-Mart??n, E. Matallanas, D. Masa-Bote, A. Guti??rrez, F. Monasterio-Huelin, and J. Jim??nez-Leube, “PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 2338–2348, 2011.
- [109] J. K. Kaldellis and A. Kokala, “Quantifying the decrease of the photovoltaic panels’ energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal,” *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4862–4869, 2010.
- [110] California Environmental Protection Agency, “Particulate Matter Program,” *Air Resources Board*, 2015. [Online]. Available: <http://www.arb.ca.gov/pm/pm.htm>. [Accessed: 21-May-2016].
- [111] W. Yeting, D. Yuxing, Z. Xiwei, W. Ye, and X. Bin, “Application of island microgrid based on hybrid batteries storage,” *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2014*, pp. 262–267, 2015.
- [112] L. Paciello, A. Pedale, D. Scaradozzi, and G. Conte, “A Design Tool for Modelling and Sizing of Energy Production / Storage Home System,” 2014.
- [113] M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu, and S. Rahman, “An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2166–2173, 2012.
- [114] T. Lukasiewicz, R. V. de Oliveira, and G. G. Dranka, “Control of an islanded wind-diesel microgrid with high penetration level of wind generation,” *2015 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–5, 2015.
- [115] Consorcio Energético Corpoema, “FORMULACIÓN DE UN PLAN DE DESARROLLO PARA LAS FUENTES NO CONVENCIONALES DE ENERGÍA EN COLOMBIA (PDFNCE),” vol. 2, 2010.
- [116] M. Alonso Abella, “Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos autónomos,” Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2011.
- [117] C. Peng and J. Yang, “The Effect of Photovoltaic Panels on the Rooftop Temperature in the EnergyPlus Simulation Environment,” *Int. J. Photoenergy*, vol. 2016, 2016.
- [118] J. F. A. M. Juan Carlos Aponte Gutiérrez, “Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia,” *Unidad Planeación Min. Energética*, 2013.
- [119] F. Breu, S. Guggenbichler, and J. Wollmann, “Informe del estado de Los

Recursos naturales y del ambiente de Popayán,” *Contral. Munic. Popayán*, 2014.

- [120] Compañía XM S.A E.P.S, “Características Del Sistema Eléctrico Colombiano,” pp. 1–37, 2007.
- [121] OMIE, “07/09/2015 - Precio horario del mercado diario,” 2015. [Online]. Available: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [122] OMIE, “Mercado diario,” *Mercados y Productos*. [Online]. Available: <http://www.omie.es/inicio/mercados-y-productos/mercado-electricidad/nuestros-mercados-de-electricidad/mercado-diario>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [123] Compañía Energética de Occidente, “TARIFAS (\$/kWh) SIN CONTRIBUCIÓN VIGENTES PARA EL MERCADO REGULADO DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA MES SEPTIEMBRE AÑO: 2015,” p. 2015, 2015.
- [124] P. D. Paul W. Stackhouse, Jr., “NASA Surface meteorology and Solar Energy,” 2016. p. 1, 2016.
- [125] Victron Energy, “Datasheet de Baterías Gel y AGM,” vol. 31, no. 0, pp. 10–13, 2014.