

**INTEGRACIÓN DEL CONMUTADOR INTELIGENTE DE POTENCIA Y LA
SUB-MEDICIÓN POR CIRCUITO EN LA RED DE ÁREA DOMÉSTICA DEL SISTEMA
DE GESTIÓN DEL HOGAR INTELIGENTE**

LUIS FERNANDO RUEDA VÁSQUEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

**INTEGRACIÓN DEL CONMUTADOR INTELIGENTE DE POTENCIA Y LA
SUB-MEDICIÓN POR CIRCUITO EN LA RED DE ÁREA DOMÉSTICA DEL SISTEMA
DE GESTIÓN DEL HOGAR INTELIGENTE**

LUIS FERNANDO RUEDA VÁSQUEZ

**Trabajo de investigación para optar por el título de Magíster en Ingeniería
Electrónica**

Director

JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Codirector

CÉSAR ANTONIO DUARTE GUALDRÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2017

“A mis papás, mi hermano y mi novia, por estar siempre a mi lado en todo momento,
por brindarme siempre su consejo, su compañía, su amor y comprensión.
Gracias por inspirarme y motivarme para dar siempre lo mejor de mi
y por enseñarme que con esfuerzo, perseverancia y dedicación
las metas y sueños siempre se pueden hacer realidad.”

Luis Fernando Rueda Vásquez

Agradecimientos

Agradezco a Dios por estar conmigo en cada paso que doy y por ser siempre mi soporte y compañía durante cada etapa de mi vida.

También le agradezco a mis papás, mi hermano y mi novia por ser el pilar fundamental en todo lo que soy. Por estar siempre a mi lado durante toda mi educación, tanto académica, como de la vida y por sus consejos, sus esfuerzos y su apoyo incondicional para alcanzar mis sueños y metas.

A la Universidad Industrial de Santander por las enseñanzas y lecciones impartidas para la construcción personal y profesional. A mis directores Jaime Guillermo Barrero Pérez y César Antonio Duarte Gualdrón por el apoyo y la confianza durante el desarrollo de esta investigación, además de sus consejos, de su esfuerzo, de su tiempo y de la disposición de sus conocimientos alcanzados a lo largo de su vida.

A mis amigos y compañeros de estudio, por sus aportes a mi crecimiento personal y profesional.

Gracias de corazón.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. Características del entorno eléctrico colombiano	21
1.1. Generación	21
1.1.1. Capacidad efectiva neta	22
1.1.2. Fuentes no convencionales de energía renovable	23
1.2. Demanda	27
1.2.1. Sectores de consumo	27
2. Marco político y regulatorio colombiano	29
2.1. Ley 143 de 1994	29
2.2. Ley 164 de 1994	30
2.3. Programa CONOCE	30
2.4. Ley 697 de 2001 (Ley URE)	31
2.4.1. Decreto 3683 de 2003	31
2.4.2. Decreto 802 de 2004	32
2.4.3. Decreto 139 de 2005	32
2.4.4. Decreto 1008 de 2006	33
2.4.5. Decreto 2501 de 2007	33
2.4.6. Decreto 2629 de 2007	33
2.4.7. Decreto 3450 de 2008	33
2.4.8. Decreto 1135 de 2009	34
2.5. Ley 788 de 2002	34
2.6. Resolución 180919 de 2010 (Plan de acción PROURE)	34
2.7. Ley 1450 de 2011	35
2.7.1. Artículo 3. Propósitos del estado y el pueblo colombiano:	35

2.7.2. Artículo 105. Energías Renovables:	36
2.8. Resolución 065 de 2012	36
2.9. Ley 1665 de 2013	36
2.10. Ley 1715 de 2014	37
2.10.1. Incentivos tributarios	38
2.11. Resolución 038 de 2014 - Código de Medida	38
2.12. Guía de construcción sostenible	39
2.13. Resolución 029 de 2016	41
2.13.1. Resolución 039 de 2016	41
2.13.2. Resolución 049 de 2016	41
2.14. Norma ISO 50001	42
2.15. NTC 4052 - Equipos de medición de energía eléctrica (C.A). Requisitos parti- culares. Medidores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)	43
2.16. NTC 6079 - Requisitos para sistemas de infraestructura de medición avanza- da en redes de distribución de energía eléctrica	44
3. Hogares inteligentes	46
3.1. Sistema de gestión energética residencial	47
3.1.1. Infraestructura de medición avanzada	48
3.1.2. Red de área doméstica	52
3.1.3. Concentrador	52
3.1.4. Fuentes de energía renovables no convencionales	53
3.1.5. Vehículo eléctrico (VE)	54
3.1.6. Interfaz de usuario	55
3.1.7. Electrodomésticos inteligentes	56
3.2. El conmutador inteligente de potencia	56
3.2.1. Enrutador de potencia (<i>AC Power Router</i>)	56
3.2.2. Nodo verde de potencia inteligente (<i>Smart Green Power Node - SGPN</i>)	59
3.2.3. Conmutador inteligente de potencia (<i>Intelligent Power Switch - IPS</i>)	61

3.3. La sub-medición por circuito	63
4. Sistema de gestión energética residencial utilizado	65
4.1. Topología del sistema de gestión eléctrico residencial experimental	66
4.1.1. Componentes	66
4.1.2. Esquemático del Conmutador Inteligente de Potencia	68
5. Simulaciones	70
5.1. Simulación en PSIM	70
5.1.1. Intercambio de fuentes para cargas RL y R	72
5.1.2. Conexión simultanea de fuentes a una carga R	74
5.2. Simulación en Orcad	75
5.2.1. Cargas alimentadas por fuentes independientes a cargas alimentadas si- multaneamente por la misma fuente	76
5.2.2. Análisis de eficiencia	77
6. Implementación del sistema	80
6.1. Conmutador inteligente de potencia	80
6.1.1. Sistema embebido	80
6.1.2. Electrónica de potencia	81
6.2. Componente de comunicaciones	83
6.2.1. Comunicación con los medidores	83
6.2.2. Comunicación con el inversor	84
6.2.3. Entorno de tarifa diferencial	85
6.3. Algoritmo de gestión	86
6.4. Aplicativo web desarrollado	86
6.4.1. Base de datos	88
6.4.2. Entorno gráfico	90
7. Experimentos y resultados	95
7.1. Intercambio en la fuente de alimentación de las cargas	96

7.2. Cargas alimentadas por fuentes independientes a cargas alimentadas simultáneamente por la misma fuente	98
7.3. Cambio en la fuente de alimentación de las cargas	100
7.4. Cargas alimentadas simultáneamente por la misma fuente a cargas alimentadas por fuentes independientes	102
7.5. Análisis de eficiencia	104
7.6. Especificaciones técnicas del IPS	105
8. Conclusiones y recomendaciones	106
Referencias	109
Bibliografía	116

Índice de figuras

	Pág.
1.1. Composición de la generación del SIN en 2014 y 2015.	22
1.2. Proyección de la demanda de energía eléctrica.	27
1.3. Consumo anual de energía eléctrica por sectores.	28
1.4. Distribución del consumo de energía eléctrica (kWh) por estrato.	28
2.1. Etiqueta energética colombiana, con su respectiva explicación.	31
2.2. Metas finales y objetivos del PROURE para el año 2015.	32
2.3. ISO 50001-Gestión de la energía eléctrica.	42
3.1. Componentes de un hogar inteligente.	47
3.2. Diagrama de bloques de la AMI.	48
3.3. Sistema de medición con medidores convencionales y sistema de medición con medidores inteligentes.	51
3.4. Red de distribución AC de un hogar.	57
3.5. Configuración de la red de enrutadores de potencia.	58
3.6. Diagrama esquemático del AC Power Router y su terminal de información. . .	59
3.7. Topología general del SGPN.	60
3.8. Arquitectura general de la red eléctrica.	62
3.9. Diseño del conmutador inteligente de potencia.	63
3.10. Diferencia entre la medida convencional y la sub-medición por circuito.	64
4.1. Red eléctrica residencial que integra el IPS.	65
4.2. Integración del conmutador inteligente de potencia y la sub-medición por cir- cuito.	67
4.3. Esquemático del IPS.	68
4.4. Configuración de los switch de potencia.	69

5.1. Conmutación equivocada de fuentes desfasadas con cargas R. En (a) se observa el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (c) se evidencia la corriente de cortocircuito producto de la conexión equivocada de los puertos del IPS. En (b) y (d) se observan las perturbaciones en las cargas producto de la conmutación equivocada.	71
5.2. Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.2. En (a) se muestra el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (b) se observa el transitorio de descarga de la bobina y el ángulo de desfase adicional producido por el componente inductivo de la Carga 1. Además, en (c) y (d) se evidencia el tiempo muerto requerido para que la corriente de los triac llegue a su cruce por cero.	73
5.3. Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.3. En (a) se muestra que las dos fuentes se encuentran sincronizadas. En (b) y (d) se observa que las dos cargas se alimentan de forma independiente antes de la conmutación y que después sólo queda energizada la Carga 1. En (c) se evidencia que antes de la conmutación las fuentes entregan la potencia requerida por las cargas y que después la Fuente 1 entrega su máxima potencia, suministrando lo requerido por la Carga 1 e inyectando el sobrante a la red comercial.	75
5.4. Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.4. En (a) se muestra el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (b) se observa que después de la conmutación, la tensión en las cargas es la misma, ya que pasan a estar alimentadas por la misma fuente. En (c) se evidencia que después de la conmutación, la corriente suministrada por la Fuente 1 aumenta. En (d) se ve que las dos cargas siguen en funcionamiento después de la conmutación.	77
6.1. Esquema del sistema implementado.	80
6.2. Sistema de desarrollo Raspberry Pi 3.	81

6.3. Esquemático utilizado para la implementación de cada uno de los interruptores del IPS.	82
6.4. Tarjeta de circuito impreso realizada en CadSoft EAGLE.	82
6.5. Patrón de generación utilizado para emular el sistema fotovoltaico y la generación de una fuente de energía renovable.	84
6.6. Curva típica de consumo de un usuario promedio estrato 4.	85
6.7. Algoritmo de control utilizado para las conmutaciones del IPS.	87
6.8. Tablas utilizadas para organizar la información en la base de datos.	88
6.9. Vistas utilizadas en el aplicativo web.	89
6.10. Pantalla inicial de la interfaz gráfica.	90
6.11. Pantalla inicial del perfil del usuario.	91
6.12. Información de consumo por circuito.	91
6.13. Visualización del consumo de potencia por día.	92
6.14. Potencia generada por el sistema fotovoltaico durante un día.	92
6.15. Comportamiento del precio del kWh durante parte del día.	93
6.16. Topología de conexión de los puestos del IPS.	93
6.17. Visualización del consumo de potencia activa en intervalos de un segundo, ante la conexión de una plancha.	94
7.1. Desfase de 120° entre las tensiones de las dos fuentes de energía utilizadas como entradas del IPS.	95
7.2. Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.1	96
7.3. Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.1. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=74,4mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=127V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=62mA$).	97

7.4. Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.2	99
7.5. Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.2. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=124V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=79,7mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=118V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=55,2mA$)	99
7.6. Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.3.	101
7.7. Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.3. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=130V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=79mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=124V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=61,1mA$).	101
7.8. Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.4.	102
7.9. Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.4. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=75,2mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=60,1mA$).	103

Índice de tablas

	Pág.
1.1. Capacidad efectiva neta del SIN a 31 de diciembre de 2014 y 2015.	23
1.2. Potencial eólico en Colombia.	24
1.3. Valores de irradiación promedio.	25
1.4. Potencial energético de residuos pecuarios.	25
1.5. Potencial energético de residuos agrícolas.	26
2.1. Subprogramas prioritarios para el sector residencial.	35
2.2. Porcentajes de ahorro para el primer año.	40
2.3. Porcentajes de ahorro para el segundo año.	40
2.4. Clasificación del medidor de energía eléctrica por su complejidad.	44
5.1. Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.1.	70
5.2. Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.2.	72
5.3. Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.3.	74
5.4. Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.4.	76
5.5. Análisis de eficiencia del IPS.	78
6.1. Información proporcionada por los medidores inteligentes.	83
6.2. Estructura de la trama de datos.	84
6.3. Valor de la tarifa diferencial.	85
6.4. Listado de las conmutaciones que es posible realizar con el IPS.	86
6.5. Funcionalidad de las tablas que componen la base de datos.	88
6.6. Funcionalidad de las vistas que componen la base de datos.	89
7.1. Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.2 y 7.3.	96
7.2. Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.4 y 7.5.	98
7.3. Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.6 y 7.7.	100
7.4. Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.8 y 7.9.	102

7.5. Análisis de eficiencia del IPS. 104

7.6. Especificaciones técnicas del prototipo. 105

RESUMEN

TÍTULO:

INTEGRACIÓN DEL CONMUTADOR INTELIGENTE DE POTENCIA Y LA SUB-MEDICIÓN POR CIRCUITO EN LA RED DE ÁREA DOMÉSTICA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DEL HOGAR INTELIGENTE¹

AUTOR:

LUIS FERNANDO RUEDA VÁSQUEZ²

PALABRAS CLAVE: Redes inteligentes, Hogar inteligente, Conmutador inteligente de potencia, Sub-medición, Raspberry Pi

DESCRIPCIÓN:

La creciente demanda energética del mundo y su influencia en el calentamiento global hace necesaria la búsqueda de herramientas que permitan mitigar los efectos negativos del sector energético en el medio ambiente. Así mismo, el sector residencial en Colombia muestra un alto porcentaje de influencia en la demanda del país, presentando posibilidades de desarrollo en materia de gestión y ahorro energético.

Este documento presenta la implementación de un sistema de gestión que permite modificar la conexión entre diferentes fuentes de energía (convencionales y renovables no convencionales) y los circuitos ramales de un hogar inteligente por medio del uso de un Conmutador Inteligente de Potencia (*Intelligent Power Switch –IPS*) y la sub-medición por circuito. Para esto, se muestra el concepto de un hogar inteligente, sus componentes y sus aplicaciones desde el punto de vista de ahorro y gestión energética, describiendo las características y el funcionamiento de cada uno de sus sub-sistemas. Asimismo, se muestra la reglamentación y normativa colombiana que promueve el uso racional y eficiente de energía y la utilización de fuentes no convencionales de energía eléctrica. Igualmente, se describe la implementación y el funcionamiento del sistema de gestión y de un aplicativo web por medio del cual es posible monitorizar el funcionamiento del sistema. Finalmente, se realizan los experimentos, se analizan los resultados y se obtienen las conclusiones del trabajo realizado.

¹Trabajo de investigación para optar por el título de Magister en Ingeniería Electrónica

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director MSC. Jaime Guillermo Barrero Pérez, Codirector PhD. César Antonio Duarte Gualdrón

ABSTRACT

TITLE:

INTEGRATION OF INTELLIGENT POWER SWITCH AND SUB-METERING CIRCUIT IN HOME AREA NETWORK OF SMART HOME MANAGEMENT SYSTEM

AUTHOR:

LUIS FERNANDO RUEDA VÁSQUEZ²

KEYWORDS: Smart grid, Smart home, Intelligent power switch, Sub-metering, Raspberry Pi

DESCRIPTION:

The growth in worldwide energy demand and its influences on the global warming makes it necessary to seek tools to mitigate the negative effects of the energy sector on the environment. Likewise, the residential sector in Colombia shows a high percentage of influence in the national demand, generating possibilities of development in terms of management and energy saving.

This document presents the implementation of a management system, which allows controlling the energy flow through different energy sources (conventionals and non conventional renewable energy sources) and the branch circuits of a smart home by means of the use of an Intelligent Power Switch and sub-metering by circuit. For this, the concept of Smart Home, its components and applications in terms of saving and energy management are shown, as well as the characteristics and operation of each of its sub-systems. In addition to that, the regulation and Colombian legislation promoting the rational and efficient use of energy and the use of non-conventional sources of electricity, are exposed. The present study also addresses the implementation and operation of the management system and a web application through which it is possible to monitor the operation of the system.

Finally, the experiments, the analysis and the findings of the investigation are presented.

²Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications School. Advisor MSC. Jaime Guillermo Barrero Pérez, Co-advisor PhD. César Antonio Duarte Gualdrón

Introducción

La energía es un importante eslabón en las estrategias globales para reducir el cambio climático. La expectativa de reducción de los impactos globales ha propiciado alternativas como: la generación distribuida, la respuesta a la demanda, las tarifas diferenciales, las microrredes de energía, los sistemas de gestión energética residencial, entre otros. Las nuevas tecnologías convergen bajo el concepto de las redes inteligentes (*Smart Grids*) y están llamadas a generar un nuevo nivel de gestión energética [1].

Considerando la creciente demanda de electrodomésticos, dispositivos móviles de entretenimiento digital y comunicaciones, el sector residencial es un sector con vasto potencial de ahorro energético. Diversos estudios han mostrado que sólo con brindar a los usuarios el consumo desagregado de la energía y proveer retroalimentación frente a su gasto energético se logra reducir el consumo energético hasta en un 18% [2], en especial debido a que la información suministrada al usuario final sobre los patrones de consumo propicia la gestión individual de la demanda. Para esto es necesario mejorar los procesos de medición y monitorización de cargas, permitiendo conocer la frecuencia e intensidad del uso de luminarias, electrodomésticos y en general de todos los dispositivos que utilizan la energía eléctrica para proveer trabajo útil y confort.

En los hogares y en la comunidad, la integración de fuentes no convencionales de energía se ha incrementado rápidamente. Sin embargo, estas fuentes alternativas no cuentan con la capacidad de proveer energía de forma constante, presentando fluctuaciones en la potencia de salida, la frecuencia y la tensión [3]. Como alternativa para superar esa limitante de las fuentes renovables, en 1998, Toyoda et al. propuso el concepto de una red de energía eléctrica abierta (*Open Electric Energy Network - OEEN*), donde el flujo de potencia es controlado por múltiples *electric energy routers* [4]. Este *Power Router* permite que diferentes tipos de fuentes de energía que pueden estar dispersas ser integradas al mercado de energía eléctrica sin causar inconvenientes a los servicios de energía existentes o a los consumidores.

En esta investigación se presenta la implementación de un sistema de gestión que

permita modificar la conexión entre diferentes fuentes de energía eléctrica y los circuitos ramales de un hogar inteligente por medio del uso de un conmutador inteligente de potencia. Para esto, se determinaron los componentes del sistema de gestión para un hogar inteligente, identificando las características de hardware y software con las que deben contar los medidores de energía eléctrica, el conmutador inteligente de potencia y una fuente renovable de energía eléctrica, para su integración con la *Smart Home*. Igualmente, se utiliza la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 como concentrador del sistema; así mismo, se implementó un algoritmo de gestión energética que permite controlar la conmutación entre dos fuentes de energía eléctrica y dos circuitos ramales de un hogar inteligente con base en parámetros de entrada como la tarifa diferencial, la demanda de cada circuito ramal y la potencia suministrada por la fuente renovable de energía eléctrica. A continuación, se implementan los diferentes protocolos de comunicación para conectar el concentrador con los medidores inteligentes y un inversor de energía eléctrica, al igual que fue emulado un entorno de tarifa diferencial. Finalmente se realizan las pruebas experimentales y se contrastan los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas.

Este documento se compone inicialmente por una revisión de las características del entorno eléctrico colombiano, en donde se muestran algunos aspectos generales de generación y demanda. Posteriormente, en el Capítulo 2 se muestra el cambio que ha experimentado la reglamentación y normativa colombiana relacionada con la gestión energética. A continuación, en el Capítulo 3 se presenta un análisis general del hogar inteligente y el Sistema de Gestión Energética Residencial, evidenciando sus aplicaciones, sus funcionalidades y los diferentes sub-sistemas que lo componen. Igualmente, se presenta el concepto y antecedentes del Conmutador Inteligente de Potencia y la sub-medición por circuito. Seguidamente, en el Capítulo 4 se describe el sistema de gestión energética residencial utilizado en el proyecto; en el Capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos a partir de simulación y el Capítulo 6 muestra la implementación del sistema gestión. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos y en el Capítulo 8 las conclusiones del trabajo realizado.

1. Características del entorno eléctrico colombiano

La red eléctrica colombiana se puede clasificar en dos grupos: el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las Zonas No Interconectadas (ZNI). El SIN agrupa a todos los sistemas interconectados del país: sistema de generación, sistema de transmisión nacional y sistema de distribución. En este sistema se incluye el 98,9 % de la generación instalada en Colombia. Por otra parte, las ZNI hacen referencia a las zonas apartadas del país con poca densidad de población y difícil acceso [5].

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) tiene a disposición del público en general el estudio titulado "Smart Grids Colombia Visión 2030", el cual presenta el mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia. Dentro del trabajo se muestran las principales características del sistema eléctrico colombiano (generación, demanda, sistema de transmisión y distribución, mercado eléctrico, infraestructura de TIC y las ZNI); a partir de esto, en el presente documento se exponen algunos de los aspectos más relevantes en las temáticas de generación y demanda.

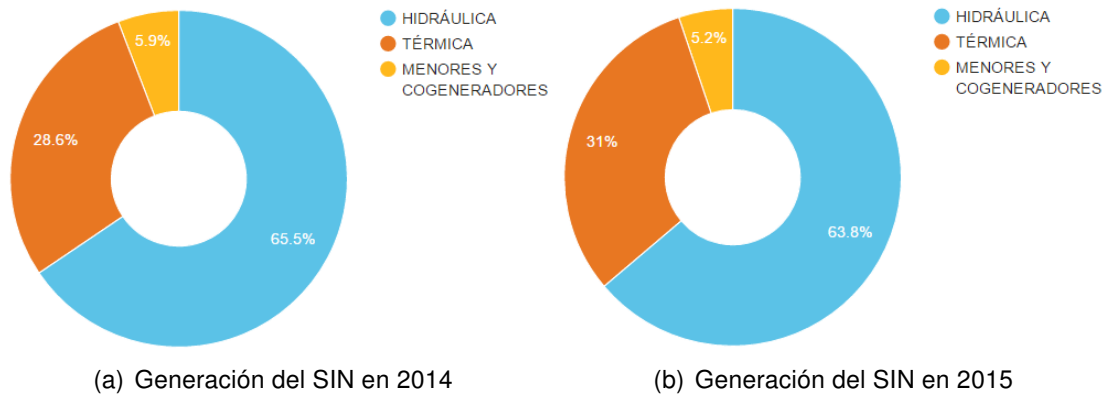
1.1. Generación

A diciembre 31 de 2015, la generación anual de energía eléctrica en Colombia fue de 66548,5 GWh, 3,5 % por encima de la registrada en 2014 para este mismo período (64327,9 GWh). Este crecimiento está asociado principalmente con el aumento en la demanda del SIN.

En 2015 se destaca el incremento de la generación térmica con un crecimiento del 12,1 % frente a 2014, pasando de una participación del 29 % en 2014, al 31 % en 2015 (Figura 1.1), mientras la generación hidráulica para 2015 aumentó en un 0,7 % frente a 2014. El crecimiento en la generación térmica fue consecuencia del déficit en aportes hídricos evidenciado desde septiembre de 2015 (entre septiembre y diciembre de 2015 ingresaron aportes equivalentes al 57,8 % de la media histórica). Este déficit es ocasio-

nado por el fenómeno de El Niño que se desarrolló durante el segundo semestre de 2015 [6].

Figura 1.1: Composición de la generación del SIN en 2014 y 2015.



Fuente: XM Expertos en mercados, "Informe de operación del SIN y administración del mercado", 2015.

1.1.1. Capacidad efectiva neta

La capacidad efectiva neta del SIN al finalizar el 2015 fue 16420 MW. Al comparar la capacidad con la registrada en 2014 se observa un crecimiento en 931 MW, equivalentes al 6%. Este aumento obedece principalmente a la entrada en operación de las centrales hidroeléctricas El Quimbo 396 MW, Carlos Lleras 78 MW, Cucuana 58 MW, San Miguel 44 MW, Bajo Tuluá 19,9 MW y PROVIDENCIA 4,9 MW y las centrales térmicas Gecelca 3 164 MW y Tasajero 2 160 MW y a la actualización en térmicas de los combustibles principales que respaldan las obligaciones de energía firme para la vigencia diciembre 1 de 2015 a noviembre 30 de 2016 para el cargo por confiabilidad [6].

Como se puede observar en la Tabla 1.1, Colombia es un país cuya mayor parte de la energía es suministrada por sus recursos hídricos y cuenta con el soporte de la generación térmica. Sin embargo, esto lo hace vulnerable a eventos como el fenómeno del Niño del año 2015 - 2016, lo cual hace evidente la necesidad de buscar nuevas fuentes de generación como las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR),

Tabla 1.1: Capacidad efectiva neta del SIN a 31 de diciembre de 2014 y 2015.

Recursos		2014 (MW)	2015 (MW)	% de participación	% de variación 2014-2015
Hidráulicos		1.0315	10892	66,6 %	5,59 %
Térmicos	Gas	1.757	1.548		-13,50 %
	Carbón	1.003	1.339		25,09 %
	Combustible	297	299		0,67 %
	ACPM	1.023	1.247		17,96 %
	Jet1	46	46		0,00 %
	GAS-Jet A1	276	264		-4,55 %
Subtotal Térmicos		4.402	4.743	28,42 %	7,19 %
Menores	Hidráulicos	584,88	608,55		3,89 %
	Térmicos	91,35	71,45		-27,85 %
	Eólica	18,42	18,42		0,00 %
Subtotal Menores		694,65	698,42	4,48 %	0,54 %
Cogeneradores		77,3	86,6	0,50 %	10,74 %

Fuente: XM Expertos en mercados, "Informe de operación del SIN y administración del mercado", 2015.

las cuales en un futuro pueden tener mayor importancia dentro del mix de generación eléctrica con el que cuenta actualmente el país.

A continuación, se presenta un análisis del potencial energético que tienen las fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia:

1.1.2. Fuentes no convencionales de energía renovable

La Ley 1715 de 2014 define las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable como aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleadas o son utilizadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente [5].

Dentro de las fuentes no convencionales de energía renovable disponibles en Colombia se tienen:

- Energía eólica

En la actualidad Colombia no se destaca por tener un gran desarrollo de parques eólicos, tan solo cuenta con 19,5 MW de capacidad de generación conectada al SIN y ésta no ha aumentado desde el año 2003. El potencial eólico en Colombia se

encuentra localizado en ciertas regiones como la Costa Norte o los departamentos de Santander y Norte de Santander. En concreto, el departamento de Guajira es considerado como una de las zonas con mayor potencial eólico de Sudamérica. Este departamento, presenta vientos con velocidades promedio cercanas a las 9 m/s que se traducen en una capacidad instalable del orden de 18 MW eléctricos. En la Tabla 1.2 se resume el potencial eólico para diferentes regiones de Colombia [5].

Tabla 1.2: Potencial eólico en Colombia.

Área	Potencial eólico (MW)
Costa Norte	20.000
Santanderes	5.000
Boyacá	1.000
Risaralda - Tolima	1.000
Huila	2.000
Valle del cauca	500

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, et al, "Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia", 2016.

- Energía solar fotovoltaica

La energía solar es la segunda fuente de energía renovable instalada en el mundo, con una capacidad instalada de 130 GW en 2013. Las condiciones de Colombia para el aprovechamiento de la energía solar son muy favorables, ya que presenta una irradiación promedio de $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$, cifra por encima de la media mundial de $3,9 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$. En la Tabla 1.3 se muestran los valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país [5].

- Energía de la biomasa

La biomasa genera aproximadamente el 1,5 % del total de electricidad producida en el mundo (331 TWh en el año 2010). En los últimos 3 años esta cifra a aumentado un 0,22 % hasta alcanzar los 405 TWh en 2013. En Colombia, se generan aproximadamente 804 GWh de electricidad por medio de biomasa, un 1,3 % de la

generación total. Sin embargo, debido a la gran cantidad de residuos agrícolas y pecuarios del país, se cuenta con un gran potencial energético. Las Tablas 1.4 y 1.5 presentan de manera resumida el potencial mencionado [5].

Tabla 1.3: Valores de irradiación promedio.

Área	Irradiación promedio ($KWh/m^2/dia$)
Guajira	6,0
Costa atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Amazonía	4,2
Región andina	4,5
Costa pacífica	3,5

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, et al, "Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia", 2016.

Tabla 1.4: Potencial energético de residuos pecuarios.

Residuos pecuarios	Toneladas de residuo (2008)	Potencial energético (TJ/año)
Bovino	99.168.608	84.256
Avícola	3.446.348	29.183
Porcino	2.803.111	4.308
Total		117.743

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, et al, "Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia", 2016.

- Energía geotérmica

La energía geotérmica contaba con una capacidad instalada de aproximadamente 11,7 GW a nivel mundial en el año 2013. En Latinoamérica, países como México (980 MW instalados), Costa Rica (200 MW instalados), el Salvador (200 MW instalados) y Nicaragua (155 MW instalados) se destacan por su desarrollo en la explotación de este recurso. De igual forma, en términos mundiales, los países con mayor participación de la geotérmica entre sus fuentes de generación eléctrica son Islandia (30 %), Filipinas (27 %) y El Salvador (25 %) [5].

Tabla 1.5: Potencial energético de residuos agrícolas.

Cultivo	Residuo agrícola	Toneladas de residuo (2012)	Potencial energético (TJ/año)
Palma	Cuesco	246.714	3.428
	Fibra	712.936	8.845
	Raquis	1.206.490	8.622
Caña de azúcar	RAC	8.741.194	42.761
	Bagazo	7.186.013	78.814
Caña panelera	Bagazo	4.817.888	52.841
	RAC	3.250.469	15.901
Café	Pulpa	2.327.929	8.354
	Cisco	224.262	3.870
	Tallos	3.303.299	44.701
Maíz	Rastrojo	1.126.840	11.080
	Tusa	325.746	3.389
	Capacho	254.564	3.863
Arroz	Tamo	5.447.359	19.476
	Cascarilla	463.605	6.715
Banano	Raquis	1.834.822	788
	Vástago	9.174.108	5.172
	Rechazo	275.223	484
Plátano	Raquis	3.201.476	1.374
	Vástago	16.007.378	9.024
	Rechazo	480.221	844
Total			335.346

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, et al, "Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia", 2016.

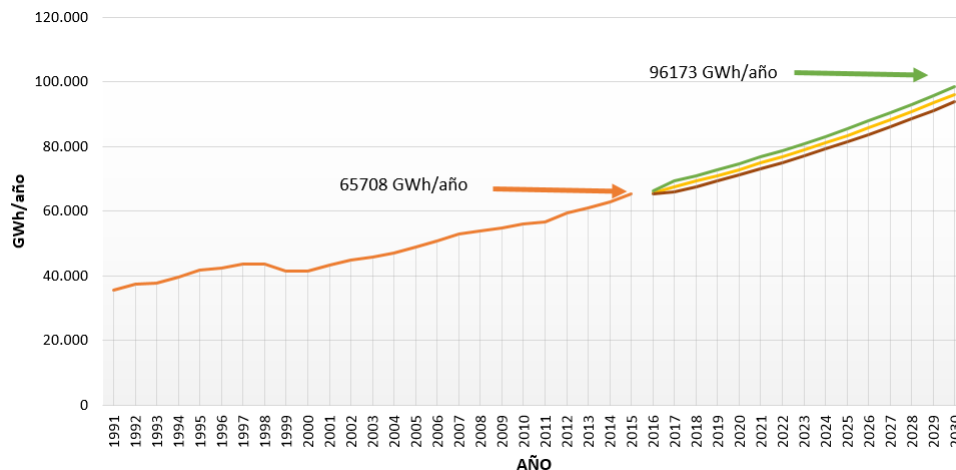
Por su parte, Colombia no cuenta con un gran potencial para el aprovechamiento del recurso geotérmico. Cuenta con la zona volcánica del Nevado del Ruiz y la región de influencia de los volcanes Chiles, Cerro Negro y Azufral, que pueden ser aprovechados para la generación de aproximadamente 1 a 2 GW. Sin embargo, Colombia no dispone todavía del marco regulatorio necesario para la administración del recurso que haga factible su explotación [5].

Estas condiciones, sumadas a la volatilidad en el costo de los combustibles fósiles y el objetivo de la Ley 1715 de 2014 por mantener una baja huella de carbono y desarrollar una industria energética ambiental, social y económica sostenible a largo plazo, hacen que el planeamiento energético en Colombia requiera necesariamente considerar la utilización de FNCER [5].

1.2. Demanda

Colombia ha mantenido un incremento continuo de su demanda de energía eléctrica total desde el año de 1991 (Figura 1.2), aumento propiciado por factores como el crecimiento poblacional y la comercialización de nuevos dispositivos electrónicos. De igual forma, la Figura 1.2 muestra la proyección de la demanda de energía eléctrica del país para los próximos 15 años, observando un crecimiento del 46,36 % para el periodo 2016 - 2030 en el escenario medio [7].

Figura 1.2: Proyección de la demanda de energía eléctrica.



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, "Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2016)", 2016.

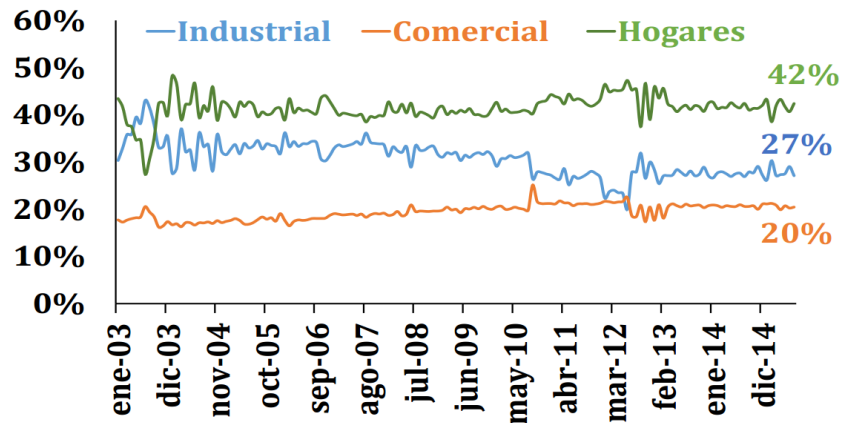
1.2.1. Sectores de consumo

En Colombia la mayor parte del consumo de energía eléctrica durante la última década provino de los hogares. El consumo residencial pasó de representar el 41 % del consumo total de energía eléctrica en el 2003, a ser el 42 % del consumo total en 2014 (Figura 1.3) [8].

Por su parte, el consumo industrial redujo su participación en el consumo total de energía eléctrica entre 2003 y 2014, pasando del 40 % al 27 % . Mientras que el sector comercial, mantuvo su participación en el consumo total de energía eléctrica entre 2003

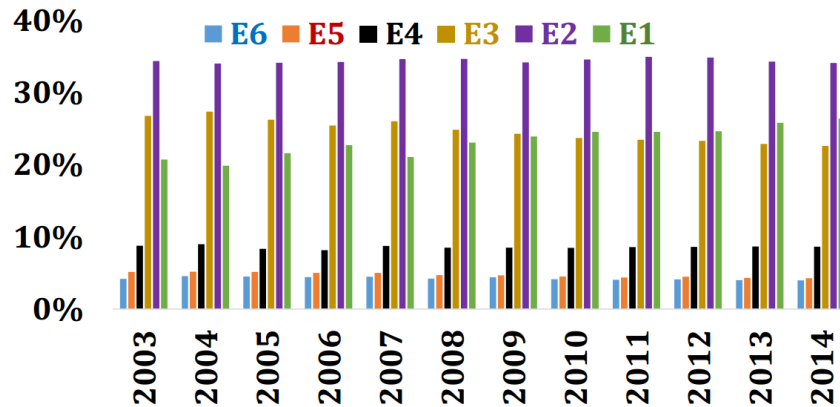
y 2014 en un 20 %, en consistencia con la mayor dinámica de la actividad terciaria en Colombia [8].

Figura 1.3: Consumo anual de energía eléctrica por sectores.



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, “Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2015)”, 2015.

Figura 1.4: Distribución del consumo de energía eléctrica (kWh) por estrato.



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, “Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2015)”, 2015.

Por otra parte, la regulación ha contribuido con una mayor distribución del consumo de energía eléctrica en sectores de la población con bajos ingresos. En promedio, entre 2003 y 2014, el 58 % del consumo de energía eléctrica provino de los estratos 1 y 2, 33 % de los estratos 3 y 4, y 9 % de los estratos 5 y 6 (Figura 1.4) [8].

2. Marco político y regulatorio colombiano

La estructura del mercado de energía eléctrica se fundamenta en las Leyes 142 (Ley de Servicios Públicos) y la Ley 143 (Ley de Electricidad) de 1994, las cuales establecen al ente regulador CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) los siguientes principios: promover y regular la competencia para desarrollar un mercado competitivo que garantice la calidad y confiabilidad del servicio público de energía eléctrica, crear un mercado eficiente para la generación, transmisión y distribución con la participación de sectores públicos y privado, y establecer criterios de eficiencia económica, normas de calidad y precios de energía [9], [10].

La gestión energética residencial en Colombia está en un nivel reglamentario bajo para la introducción de tecnologías como: redes inteligentes, la Infraestructura de Medición Avanzada (*Advanced Metering Infrastructure - AMI*) y los Sistemas de Gestión Energética Residencial (*Home Energy Management Systems - HEMS*). A continuación, se describen las características más relevantes de las iniciativas y esfuerzos en aras de la reglamentación y promulgación de la eficiencia energética por parte de las entidades gubernamentales.

2.1. Ley 143 de 1994

Define la estructura y la reglamentación del mercado mayorista de energía eléctrica. Así mismo, es el punto de partida del marco legal para las energías renovables, estableciendo el ahorro, la conservación y el uso eficiente de energía eléctrica como objetivos prioritarios en el desarrollo de las actividades del sector eléctrico [11].

2.2. Ley 164 de 1994

Por medio de esta ley, el Congreso de la República de Colombia aprobó la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992. La CMNUCC establece la importancia de desarrollar una política de alcance global para enfrentar los retos relacionados a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Igualmente, establece los compromisos y obligaciones de reducción de emisiones, sin embargo, para el caso de Colombia no se exige un porcentaje de reducción [11].

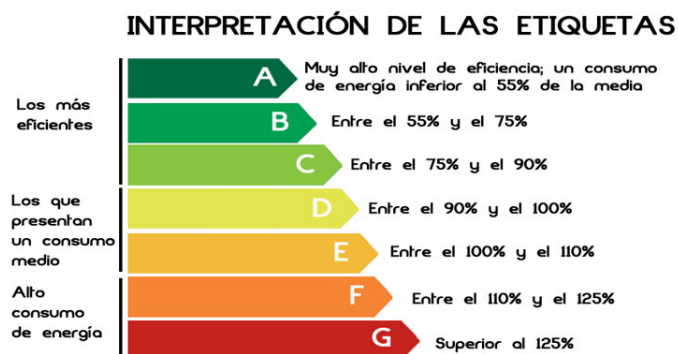
2.3. Programa CONOCE

El contexto de eficiencia energética se sitúa en el Programa Colombiano de Normalización, Certificación y Etiquetado de Equipos de Uso Final de Energía (CONOCE) que nace como consecuencia de la Resolución CREG 097 del 2000, la cual establece las pautas para el diseño, normalización y uso eficiente de equipos y aparatos eléctricos. El programa es una herramienta que pretende el óptimo aprovechamiento de los recursos naturales en toda la cadena energética, como mecanismo práctico para el establecimiento de condiciones de mercado que promuevan la penetración de tecnología energéticamente eficiente y como estrategia para la generación de una cultura de uso racional y eficiente de la energía en la sociedad colombiana.

El objetivo del programa es mejorar los indicadores energéticos en los usos finales, es decir, obtener una misma unidad de servicio prestado con menor consumo de energía sin perjuicio de la calidad del servicio [12]. La Figura 2.1 presenta la etiqueta de eficiencia energética implementada en Colombia.

Con la implementación de la etiqueta energética se desea promover el uso de equipos con altos niveles de eficiencia energética, logrando ser un medio de información entre el fabricante y el consumidor; además consolida la capacidad y el conocimiento del usuario en términos energéticos y económicos para una acertada toma de decisiones en el momento de la adquisición de un equipo.

Figura 2.1: Etiqueta energética colombiana, con su respectiva explicación.



Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, "Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos de Uso Final de Energía (CONOCE)", 2001.

2.4. Ley 697 de 2001 (Ley URE)

Por medio de esta ley se fomenta el Uso Racional de la Energía (URE) y se define un nuevo escenario normativo, con políticas y directrices de obligatorio cumplimiento para el desarrollo de todas las normas posteriores de eficiencia energética en Colombia. La ley designa incentivos y responsabilidades dentro del desarrollo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE). Esta ley decreta en su artículo quinto la creación del PROURE, cuyo objeto es aplicar gradualmente programas de ahorro energético y unos niveles mínimos de eficiencia preestablecidos por la ley para todo el sistema energético [13]. La Figura 2.2 presenta los objetivos y las metas finales en eficiencia energética del PROURE.


A continuación, se describen los Decretos Reglamentarios de la Ley 697 de 2001.

2.4.1. Decreto 3683 de 2003

Reglamenta la Ley 697 de 2001 y tiene como objetivo promover el uso racional y eficiente de la energía, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad del merca-

Figura 2.2: Metas finales y objetivos del PROURE para el año 2015.

METAS FINALES DEL PROURE			OBJETIVOS DEL PROURE
EFICIENCIA ENERGÉTICA			
Sector	Potencial de Ahorro de Energía Eléctrica a 2015	Meta de Ahorro de Energía Eléctrica a 2015	
Residencial	10.6%	8.7%	
Industrial	5.3%	3.4%	
Comercial, Público y servicios	4.4%	2.7%	
TOTAL	20.2%	14.8%	



Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. "Informe final PROURE", 2001.

do energético colombiano, la protección al consumidor y la promoción de fuentes no convencionales de energía, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables [14].

Además, el Decreto 3683 de 2003 crea la Comisión Intersectorial para el uso Racional y Eficiente de la Energía y Fuentes No Convencionales de Energía (CIURE), con el fin de asesorar y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en la coordinación de políticas sobre uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales en el sistema interconectado nacional y en las zonas no interconectadas.

2.4.2. Decreto 802 de 2004

Establece disposiciones para incentivar el uso del Gas Natural Comprimido para uso Vehicular (GNCV) [15].

2.4.3. Decreto 139 de 2005

Modifica los párrafos 2 y 3 del artículo 23 del Decreto 3683 de 2003 [16].

2.4.4. Decreto 1008 de 2006

Adiciona el Decreto 802 de 2004 y ordena a la CREG introducir incentivos tarifarios en distribución de gas natural para el GNVC [17].

2.4.5. Decreto 2501 de 2007

Las medidas señaladas en el presente decreto son para propiciar el uso racional y eficiente de energía eléctrica en los siguientes productos y procesos [18]:

- En los productos destinados para el uso final de energía eléctrica, tanto de fabricación nacional como importados para su comercialización en Colombia, en los siguientes procesos: iluminación, refrigeración, acondicionamiento de aire, fuerza motriz, calentamiento de agua para uso doméstico, calentamiento para cocción.
- Las edificaciones donde funcionen entidades públicas.
- Las viviendas de interés social.

2.4.6. Decreto 2629 de 2007

Se dictan disposiciones para promover el uso de biocombustibles y medidas aplicables a los vehículos y demás artefactos a motor que utilicen combustibles para su funcionamiento [19].

2.4.7. Decreto 3450 de 2008

Lo dispuesto en el Decreto 3450 de 2007 señala que en el territorio de la República de Colombia, todos los usuarios del servicio de energía eléctrica sustituirán las fuentes de iluminación de baja eficacia lumínica por fuentes de iluminación de mayor eficacia lumínica disponibles en el mercado [20].

2.4.8. Decreto 1135 de 2009

Modifica el Decreto 2629 de 2007, en relación con el uso de alcoholes carburantes en el país y con las medidas aplicables a los vehículos automotores que utilicen gasolinas para su funcionamiento [21]

2.5. Ley 788 de 2002

Esta Ley exime durante quince años del impuesto de renta las ventas de energía eléctrica generada a partir de biomasa, viento y residuos agrícolas, si se obtienen los certificados de reducción de emisiones de carbono previstos en el Protocolo de Kioto. Para gozar de exención del impuesto, el 50 % de los ingresos provenientes de la certificación, se tienen que destinar a programas de beneficio social.

También se exime del Impuesto al Valor Agregado (IVA) la importación de maquinaria y equipos destinados al desarrollo de proyectos o actividades que sean exportadores de certificados de reducción de emisiones de carbono y que contribuyan a reducir la emisión de los GEI y, por lo tanto, al desarrollo sostenible [22].

2.6. Resolución 180919 de 2010 (Plan de acción PROURE)

Con el objetivo de cumplir lo establecido en el PROURE, se adoptó el Plan de Acción Indicativo 2010-2015, el cual define sus objetivos, subprogramas, metas e indicadores para la aplicación gradual en toda la cadena energética a fin de crear las condiciones de uso racional y eficiente de la energía y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía en Colombia [23]. En la Tabla 2.1 se muestran los subprogramas prioritarios para el sector residencial.

Tabla 2.1: Subprogramas prioritarios para el sector residencial.

Subprograma Prioritario Residencial	Objetivo
Sustitución de bombillas incandescentes	Reemplazo de 32 millones de bombillas incandescentes por bombillas fluorescentes compactas en los estratos 1,2 y 3.
Uso eficiente de energía en equipos de refrigeración, aire acondicionado y demás electrodomésticos	Reemplazo y chatarrización de 2.000.000 de neveras.
Hornillas eficientes	Inversión en capacitación e investigación aplicada
Diseño, construcción y uso eficiente y sostenible de viviendas	Inversión en capacitación e investigación aplicada.
Gas Licuado de Petróleo-GLP en el sector rural y zonas marginales	Consultoría básica

Fuente: W. Gómez y G. Archila, "Caracterización tecnológica de la topología de un sistema de gestión energética residencial", 2012.

2.7. Ley 1450 de 2011

Esta Ley consiste en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, en el cual se hace mención de la eficiencia energética desde el punto de vista del uso de energía renovables [24].

2.7.1. Artículo 3. Propósitos del estado y el pueblo colombiano:

Una sociedad para la cual la sostenibilidad ambiental, la adaptación al cambio climático, el acceso a las tecnologías de la información y las comunicaciones y el desarrollo cultural sean una prioridad y una práctica como elemento esencial del bienestar y como principio de equidad con las futuras generaciones.

2.7.2. Artículo 105. Energías Renovables:

El Gobierno Nacional diseñará e implementará una política nacional encargada de fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en las energías solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, undimotriz y demás alternativas ambientalmente sostenibles, así como una política nacional orientada a valorar el impacto del carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país.

2.8. Resolución 065 de 2012

Esta resolución establece las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicable en el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Particularmente, en el Anexo 3.1.1 “Características de los equipos de medida” describe las características y requerimientos de los equipos de medida para garantizar una gestión eficiente de la energía [25]:

- El medidor debe contar con un sistema de almacenamiento de información que le permita conservar los valores medidos ante fallas en el sistema de comunicación.
- También debe contar con un sistema de procesamiento de datos capaz de realizar descargas de forma remota y automática de las mediciones realizadas.

2.9. Ley 1665 de 2013

Esta ley aprueba el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), hecho en Bonn, Alemania el 26 de enero de 2009. Con este estatuto se pretende impulsar el efecto positivo que las tecnologías de las energías renovables pueden producir para estimular el crecimiento económico sostenible y la creación de empleo, movidas por el enorme potencial que las energías renovables ofrecen para el acceso descentralizado a la energía, sobre todo en los países en desarrollo, y para el acceso

a la energía en regiones remotas, preocupadas por las graves consecuencias negativas que el empleo de combustibles fósiles y el uso ineficiente de la biomasa tradicional pueden acarrear para la salud [26].

Las energías renovables, combinadas con una mayor eficiencia energética, pueden absorber cada vez más el gran incremento mundial de las necesidades energéticas previsto para los próximos años. Por tal motivo, se reafirma el deseo de establecer una organización internacional para las energías renovables que facilite la cooperación entre sus miembros, abriendo camino a una estrecha colaboración con las organizaciones existentes que promueven el uso de las energías renovables [26].

2.10. Ley 1715 de 2014

La Ley 1715 de mayo del 2014 promueve el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. 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 [27].

Con esta ley se busca establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional [27].

La Ley 1715 empieza a reglamentar y estructurar las figuras del autogenerador, el autogenerador a gran escala, el autogenerador a pequeña escala y la cogeneración, al igual que permite la incorporación de equipos importantes en *Smart-Grid* y *Smart-Home* como lo son los contadores bidireccionales. De la misma manera contempla las

diferentes fuentes de energía no convencionales existentes, la generación distribuida, la gestión energética, la tarifa diferencial, la respuesta a la demanda y los cambios que deben irse presentando en el sistema eléctrico nacional.

El aporte de la Ley 1715 es significativo y abre nuevas oportunidades para el desarrollo de las *Smart-Grid*, ahora se debe esperar a que las entidades designadas por el estado reglamenten y definan los lineamientos para este nuevo campo de trabajo y desarrollo del país.

2.10.1. Incentivos tributarios

Por medio del Decreto 2143 de 2015 se aprueban incentivos tributarios para la promoción, desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía. Con esta iniciativa se busca aumentar la rentabilidad de los proyectos, apoyar la reconversión tecnológica por equipos más eficientes, con el fin de evitar desperdicios y consumir menos energía, estimular la inversión en proyectos de tecnologías limpias para producción de energía y la eficiencia energética [28].

El decreto contempla cuatro beneficios para todos los proyectos de generación de energía limpias [28]:

- Deducción en el pago del impuesto de renta del 50 % de las inversiones en un periodo de 5 años
- Depreciación acelerada de los activos
- Exclusión de IVA de los bienes asociados al proyecto
- Exención del gravamen arancelario

2.11. Resolución 038 de 2014 - Código de Medida

Esta resolución modifica el Código de Medida contenido en el anexo general del Código de Redes. Conforme a lo dispuesto en el Código de Medida adoptado por la

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), en su proyecto de Resolución No. 120 de 2007, los sistemas de medición a nivel residencial deben cumplir los siguientes requisitos y/o características técnicas [29]:

- La mínima clase de exactitud debe ser de 1,0 para el medidor de energía activa y el error máximo permitido es +/- 2,0 % de la energía activa del sistema de medición [29].
- Certificación de producto: Según lo citado en el Código de Medida, todos los componentes del sistema de medición deben contar un certificado de conformidad de producto.
- Normas de fabricación de los medidores de energía según la norma NTC 5019 “Selección de equipos de medición de energía eléctrica”.

2.12. Guía de construcción sostenible

Encaminados al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y el ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social, el 10 de julio de 2015 el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT) anunció la adopción de la primera reglamentación de índole nacional que fomenta la construcción sostenible. Se trata de la Resolución No. 549 de 2015 del MVCT [30] mediante la cual se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Esta normativa fue precedida por la expedición del Decreto 1285 de junio de 2015 de esa cartera [31], el cual modifica el Decreto 1077 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.

El objetivo de la guía de construcción sostenible es proporcionar una herramienta para la implementación de estrategias de construcción sostenible para ser aplicadas en todo el país. La guía pretende establecer los porcentajes mínimos y medidas de ahorro en agua y energía a alcanzar en las nuevas edificaciones y promover eficiencia energética y conservación del agua durante el uso de las edificaciones [30]

Tabla 2.2: Porcentajes de ahorro para el primer año.

Energía	Año 1			
	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	15	15	15	15
Hospitales	15	15	15	15
Oficinas	15	15	15	15
Centros comerciales	15	15	15	15
Educativos	15	15	15	15
Vivienda NO VIS	10	10	10	10
Vivienda VIS	10	10	10	10
Vivienda VIP	10	10	10	10

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 549. (Julio 10 de 2015). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la Parte 2, del Libro 2 del Decreto número 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.

Tabla 2.3: Porcentajes de ahorro para el segundo año.

Energía	Año 2			
	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	20	35	25	45
Hospitales	35	25	35	30
Oficinas	30	30	40	30
Centros comerciales	25	40	35	30
Educativos	45	40	40	35
Vivienda NO VIS	25	25	25	45
Vivienda VIS	20	15	20	20
Vivienda VIP	15	15	20	15

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 549. (Julio 10 de 2015). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la Parte 2, del Libro 2 del Decreto número 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.

Los porcentajes de ahorro establecidos tienen en cuenta las características de cada zona climática del país, estableciendo los porcentajes de ahorro de las Tablas 2.2 y 2.3

como metas de ahorro para los dos primeros años de vigencia de la resolución.

2.13. Resolución 029 de 2016

Esta resolución define un esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía [32].

Cuando el consumo real del usuario supere la meta de ahorro, el costo unitario (CU) del servicio para el consumo hasta la meta de ahorro será el CU establecido en la Resolución CREG 119 de 2007. Para la parte del consumo que supere la meta de ahorro, de acuerdo con lo que se define en el Anexo 1 de esta resolución, el costo unitario será igual al CU más 450 $\$/kWh$.

Cuando el consumo real es inferior a la meta de ahorro, el costo unitario del servicio para el consumo total será igual al CU establecido en la Resolución CREG 119 de 2007 menos 450 pesos $\$/kWh$ multiplicado por la relación entre la meta de ahorro y el consumo real del mes [32].

2.13.1. Resolución 039 de 2016

En esta resolución se modifica el artículo 2 de la resolución 029, en la cual se aplica la tarifa diferencial de acuerdo a las fórmulas dictadas por el Ministerio de Minas y Energía y se establece que el valor a reconocer a los usuarios que consuman por debajo de su meta de ahorro será el valor de la tarifa mensual y no 450 $\$/kWh$ como estaba definido en la Resolución CREG 029 de 2016 [33].

2.13.2. Resolución 049 de 2016

Con esta resolución, la CREG, busca aclarar los procedimientos para aplicar los incentivos y castigos en el consumo de energía. Se establece que para aquellos usuarios que se encuentren en mora y no se les haya suspendido el servicio de energía, los

incentivos solamente les serán reconocidos cuando se pongan a paz y salvo con el pago de la factura.

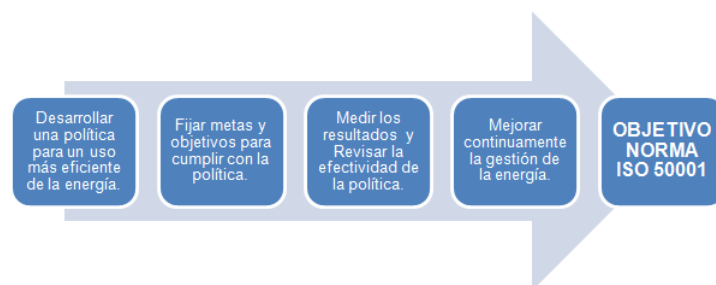
Además, señala que para los usuarios que tengan el servicio suspendido no se aplicará el esquema de tarifas diferenciales contemplados como incentivos por el ahorro de energía.

La resolución precisa que en casos especiales el comercializador de energía podrá retirar de este esquema de tarifas diferenciales a aquellos usuarios que por razones sustentadas presentaron incrementos de consumo que superan su meta y fueron indispensables para la ejecución de su actividad industrial o por razones médicas. Para ello el comercializador solicitará a estos usuarios los soportes que considere necesarios para la auditoría del esquema y las diligencias a que tenga la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en ejercicio de sus funciones[34].

2.14. Norma ISO 50001

A causa de la proliferación de distintos estándares nacionales de gestión de la energía fue desarrollada y presentada la Norma ISO 50001 el 17 de junio de 2011, como un nuevo estándar internacional donde se establecen los requisitos para la adecuada gestión de la energía, orientado a la aplicación en todo tipo de organizaciones y empresas.

Figura 2.3: ISO 50001-Gestión de la energía eléctrica.



Fuente: International Organization for Standardization (ISO), "ISO 50001-Gestión de la energía eléctrica", 2011.

La norma pretende promover planes de acción enfocados a aumentar la eficiencia

energética, reducción de costos y consumos de energía. Como conclusión, todas las organizaciones pueden tener acceso a un estándar único y estructurado para la implementación de una metodología coherente para desarrollar mejoras continuas en materia energética [35]. En la Figura 2.3 se muestra un esquema con el objetivo de la norma ISO 50001.

2.15. NTC 4052 - Equipos de medición de energía eléctrica (C.A). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (clases 1 y 2)

Se refiere a los equipos de medición de energía eléctrica (c.a.) [36].

- Requisitos particulares, medidores estáticos de energía activa Clases 1 y 2. (IEC 62053-21).
- Dispositivos de salida: La norma NTC 5019 “Selección de equipos de medición de energía eléctrica” da una clasificación al medidor de energía eléctrica según su complejidad y una serie de requisitos aplicables a los medidores, tal como se muestra en la Tabla 2.4.
- Para medidores de clase 1 (uso residencial), el registrador debe permitir tomar lecturas con mínimo cinco dígitos enteros y dos dígitos decimales, es decir resolución 0,01.
- Requisitos aplicables a todos los medidores estáticos: Para la verificación y calibración, el medidor debe contar con dispositivos de salida (ópticos y/o eléctricos) para energía activa y reactiva cuando aplique. Estos dispositivos de salida preferiblemente deberían ser independientes; uno para energía activa y otro para energía reactiva.

Tabla 2.4: Clasificación del medidor de energía eléctrica por su complejidad.

Clasificación	Descripción
Básicos	Medidores de energía sencillos, sin dispositivos internos de control de carga o tarifa; con o sin salida de impulso; con o sin puerto de comunicación óptico.
Multienergía	Medidores que, en una única carcasa, miden más de un tipo de energía, con o sin salida de impulso; con o sin puerto de comunicación óptico.
Multifunción	Medidores básicos o de multienergía, que incluyen funciones adicionales a las metrológicas básicas, tales como registro de demanda máxima, registro de tiempo de uso, dispositivo de control de tarifa y/o carga, como un interruptor horario o un receptor de telemando centralizado.
Medidores con funciones adicionales	Medidores con otras unidades funcionales como PLC, comunicación telefónica o por radio, lectores de bonos de pagos, etc.

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "NTC 5019-Selección de equipos para medición de energía eléctrica", 2007.

- Requisitos aplicables a los medidores multifunción: El medidor debe disponer de herramientas de visualización en "display" y/o a través de software que indiquen estado de conexión, alimentación del medidor, diagnósticos de estado y otros.
- Requisitos aplicables a los medidores multifunción con funcionalidad adicional: Para las comunicaciones, el medidor debe tener disponibilidad de utilizar al menos una de las siguientes formas: puerto óptico, puerto RS 232, puerto RS 485, lazo de corriente y módem.

2.16. NTC 6079 - Requisitos para sistemas de infraestructura de medición avanzada en redes de distribución de energía eléctrica

Esta norma ha sido elaborada con el fin de establecer los requerimientos mínimos que deben cumplir los sistemas AMI para su operación y gestión. Aplica para los equipos y sistemas que conforman la medida de energía eléctrica de corriente alterna para

sistemas de Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) que incluyen entre otras funcionalidades AMR (Lectura Automática de Medidores), gestión de alarmas y gestión de conexión y desconexión del servicio en forma remota.

Aplica a unidades de medida para usos interiores o exteriores, en configuración individual o concentrada con medidores monocuerpo o bicuerpo. Asimismo, para medidores monofásicos, bifásicos y trifásicos. De igual manera, aplica para medida directa, semidirecta e indirecta [37].

3. Hogares inteligentes

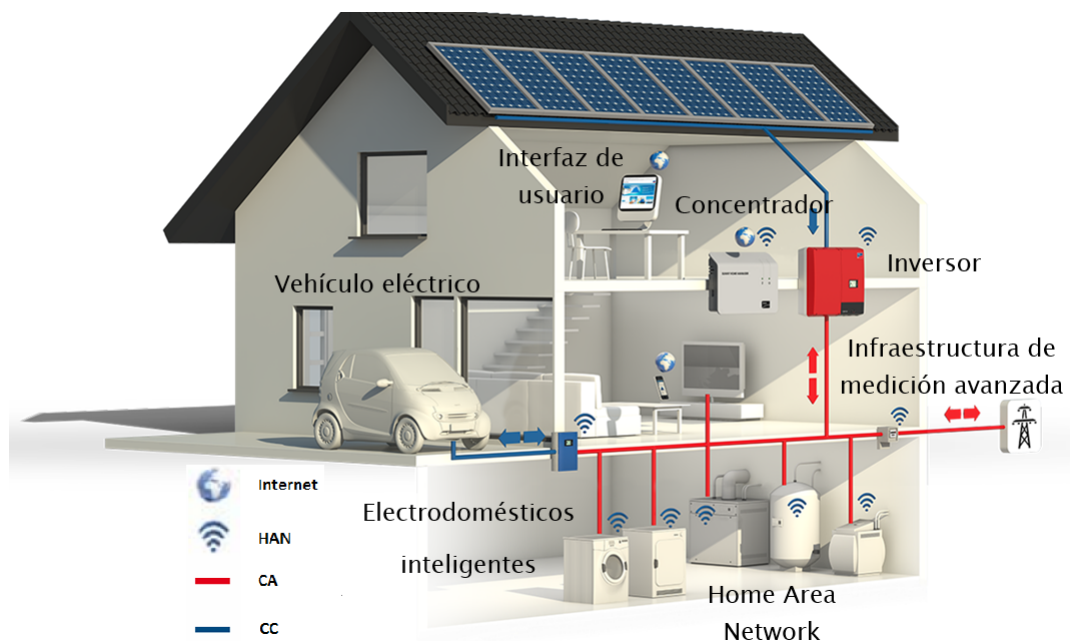
Un hogar inteligente es la integración de diferentes servicios y componentes dentro de una unidad residencial utilizando sistemas de comunicación comunes, capaces de soportar operaciones seguras y económicas, además de brindar confort y gestión de la carga según las preferencias del usuario. Un hogar inteligente en un principio fue concebido como una tecnología para controlar sistemas ambientales de iluminación y temperatura. Actualmente esta tecnología también permite la monitorización de las actividades al interior de la casa, dando la posibilidad de una operación individualizada según las costumbres y las preferencias del usuario previamente censadas. Este nivel de inteligencia, flexibilidad y funcionalidad tienen una vasta variedad de aplicaciones [38], [39].

- **Protección y seguridad:** Incluye sistemas de alarma y monitorización, operaciones seguras de equipos técnicos o asistencia médica en caso de emergencia a usuarios con limitaciones.
- **Gestión energética:** Uso eficiente en el control de cargas en climatización de edificaciones (*Heat Ventilation and Air Conditioning - HVAC*), monitorización y control del consumo desagregado de energía eléctrica e integración de servicios complementarios con la empresa prestadora del servicio.
- **Confort, comunicaciones y entretenimiento:** Sistemas programables de control de iluminación, persianas, puertas y diferentes clases de dispositivos residenciales, dispositivos de entretenimiento como radio, televisión, teatro en casa y dispositivos wifi e integración de los diferentes protocolos de comunicación dentro de una red doméstica.

3.1. Sistema de gestión energética residencial

Un sistema de gestión Energética Residencial (*Home Energy Management System - HEMS*) tiene como objetivo monitorizar y optimizar el consumo de energía eléctrica de una forma segura. Este sistema requiere del uso de medidores inteligentes, un controlador, dispositivos electrónicos inteligentes instalados en los diferentes electrodomésticos, sensores y una infraestructura de comunicaciones [40].

Figura 3.1: Componentes de un hogar inteligente.



Fuente: C. Nahr, "Smart Home with Solar Electricity", [En línea]. Consultado el 01/07/2016. Disponible en: <http://en.sma-sunny.com/2012/08/07/smart-home-with-solar-electricity/>.

La arquitectura de un sistema de gestión energética residencial se muestra en la Figura 3.1, en donde se pueden encontrar los siguientes componentes:

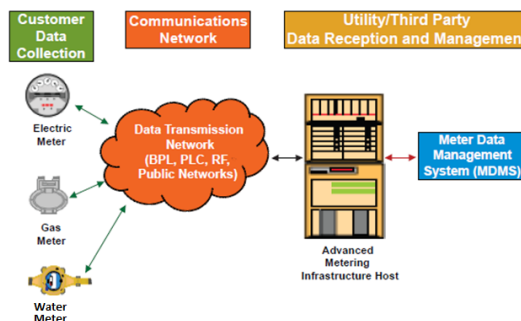
- Infraestructura de medición avanzada (*Advanced Metering Infrastructure - AMI*)
- Red de área doméstica (*Home Area Network - HAN*)
- Concentrador (*HUB*)

- Fuentes de energía renovable y vehículo eléctrico
- Retroalimentación al usuario (Interfaz de usuario)
- Electrodomésticos inteligentes

3.1.1. Infraestructura de medición avanzada

La infraestructura de medición de avanzada (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*), fue definida por la comisión federal de regulación energética (*Federal Energy Regulatory Commission, FERC, 2008*) como “Un sistema que recoge información del consumo (y otros posibles parámetros) de los consumidores cada hora o más frecuentemente y provee transmisión de los mismos mediante una red de comunicación a un punto de recolección de datos, diariamente o más frecuentemente”. Esta definición implica la introducción de una nueva tecnología al sistema eléctrico en todos los niveles con requerimientos específicos como: dispositivos digitales de recolección de datos equipados con comunicación bidireccional, red de comunicación, manejo y almacenamiento de datos como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2: Diagrama de bloques de la AMI.



Fuente: Electric Power Research Institute (EPRI), “Advanced Metering Infraestructura (AMI)”, Data Management, 2014.

Requerimientos de la infraestructura de medición avanzada

La AMI requiere de la integración de los siguientes sistemas [41]:

- Un sistema seguro de almacenamiento de los datos de consumo de los usuarios y de los eventos del sistema.
- Un sistema de comunicación que incorpore diferentes estándares de comunicación que permitan la monitorización y control en tiempo real. Algunos de los posibles estándares de comunicación son: DLC, HAN, PLC, GSM/GPRS, ZigBee, WiMax.
- Un sistema que gestione órdenes remotas, respuesta a eventos, control de carga, seguimiento de la demanda, respuesta a la demanda, medición multi-servicios y precio en tiempo real.
- Una interfaz del usuario con diferentes alternativas, para que el usuario tenga acceso a la información. La complejidad y cantidad de variables manejadas en la infraestructura, demandan interfaces de usuario concisas y en diferentes escenarios tanto para usuarios finales como para operadores de red.
- Un sistema de procesamiento y recolección de datos que permita la lectura y procesamiento de eventos como: tensiones eléctricas, corrientes, frecuencia, potencia activa y reactiva, calidad de la energía eléctrica, pérdidas de potencia, así como respuesta del usuario a requerimientos de la demanda.

Estructura del diseño AMI

La infraestructura de medición Avanzada (AMI) está dividida en cuatro niveles [42]:

Nivel 1: Es la capa superior de la infraestructura y corresponde al centro de gestión de datos y al centro de manejo de comunicaciones. Tiene la estación principal con los equipos de red, los servidores y diversos terminales de gestión.

Nivel 2: Permite la comunicación de la estación principal con los medidores inteligentes. En este nivel se proveen los canales de comunicación que hacen posible la comunicación bidireccional entre las empresas electrificadoras y los usuarios.

Nivel 3: Corresponde a la medida y distribución del acceso a los puntos de potencia requeridos. En este nivel se encuentran los medidores inteligentes, los terminales portá-

tiles y los sistemas de generación distribuida. Los medidores inteligentes son el equipo principal de este nivel, debido a las múltiples funciones que debe realizar y que corresponden a la medida del consumo energético, la transmisión de la señal de precio de la energía eléctrica, las señales de corte y reconexión de cargas, la monitorización del sistema y la transmisión constante de los demás parámetros técnicos. El uso de los terminales portátiles son importantes en la medición y monitorización del sistema de potencia, y también para la sincronización que permite el acceso a la generación distribuida.

Nivel 4: Es del dominio del cliente y está situado dentro de las unidades residenciales. Comprende los sistemas de gestión energética residencial, los cuales mediante el medidor inteligente tienen un vínculo de interacción con el operador de red. Los usuarios están equipados con la infraestructura para conocer el consumo desagregado de energía eléctrica en tiempo real, el consumo de gas y agua, recibir mensajes de alerta de las empresas electrificadoras en aplicaciones como la repuesta a la demanda, los sistemas de alerta de falla y/o mantenimiento. También es posible la integración del funcionamiento de electrodomésticos a la señal de precio de energía transmitida por el medidor con el fin de ahorrar en costo y consumo.

Medidores inteligentes

Un medidor inteligente es el dispositivo que permite medir el consumo de energía e información de otras variables del sistema eléctrico y de la calidad de la energía. Los datos recolectados por el medidor inteligente son una serie de parámetros de diagnóstico del sistema, datos de consumo de energía con fecha y hora de recolección y referenciados con una etiqueta única de identificación del medidor. Los medidores inteligentes pueden leer información en tiempo real y comunicarla de forma segura [43].

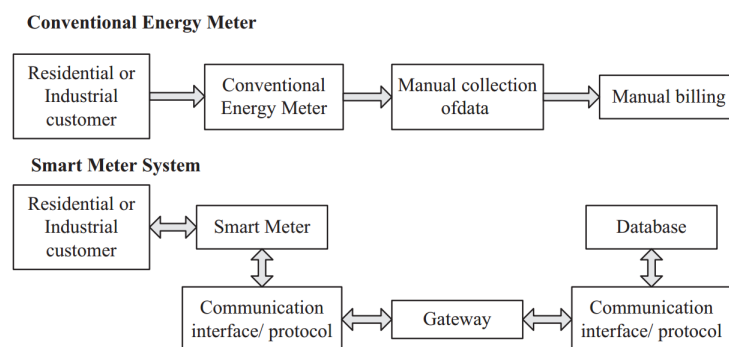
Una ventaja importante de los medidores inteligentes es la comunicación bidireccional, la cual posibilita la retroalimentación para el usuario y el operador de red o el comercializador, permitiendo la recolección y comunicación de la información del sistema eléctrico y las preferencias del usuario.

Los medidores inteligentes funcionan en un escenario de infraestructura de comunicación y dispositivos de control. Esto permite la siguiente serie de funciones complementarias a la medición de consumo de energía [43]:

- La ejecución de comandos e instrucciones remotas y locales.
- La integración de la señal de tarifa diferencial de precio de la energía.
- El funcionamiento de artefactos según las preferencias del usuario.
- La monitorización de parámetros técnicos.
- La discriminación de la energía adquirida del operador de red de la energía obtenida localmente en un escenario de generación distribuida.
- El corte y la reconexión remota del servicio de energía eléctrica para cualquier cliente.

La Figura 3.3, contrasta un sistema de medición tradicional con un sistema con medidores inteligentes.

Figura 3.3: Sistema de medición con medidores convencionales y sistema de medición con medidores inteligentes.



Fuente: Depuru, S.S.S.R., Wang, L., and Devabhaktuni, V., "Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 6 (2011), pp.2736-2742.

3.1.2. Red de área doméstica

Una red de comunicación casera (*Home Area Network - HAN*) es un tipo de red de área local (LAN) que se desarrolla con el fin de facilitar la comunicación y la interoperabilidad entre los distintos componentes de la HEMS.

Para soportar comunicación permanente con un sistema HEMS, la HAN debe satisfacer dos necesidades principales: la primera es la comunicación de los dispositivos dentro de la casa y la segunda es potenciar la conexión del hogar con la empresa electricadora mediante el establecimiento de comunicación bidireccional. Adicionalmente en el contexto de sistemas de gestión energética, el consumo de energía es otra variable importante y por tanto la HAN debe tener características de operación de baja potencia “*ultra-low or low power*” [44].

Al combinar las HAN con la infraestructura AMI los consumidores podrán monitorizar su uso de energía a través de pantallas instaladas en sus hogares o programar sus termostatos o sistema de aire acondicionado en función del precio de la energía, y a las compañías se les garantizará el acceso directo a las cargas, lo que les permitirá gestionar de forma más eficiente su demanda. Estas redes también están conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como los PEV (*Plug-In Electric Vehicle*), fuentes de energía renovable (solar / eólica) y dispositivos de almacenamiento [45].

3.1.3. Concentrador

El concentrador o HUB de monitorización y control es un servidor de adquisición de datos inteligente y flexible que permite la recolección de datos de los medidores inteligentes, de las fuentes de energía renovable y de los sensores y electrodomésticos inteligentes del hogar. El concentrador es un sistema computacional embebido con propósitos de control específicos que se encuentra conectado con la HAN, el cual cuenta con un procesador y unos módulos individuales que integrados, procesan las configuraciones y preferencias de los usuarios junto con los datos recolectados de los diferentes componentes de la *Smart Home*, ejecutando opciones básicas de control en las cargas.

Dentro de las funciones básicas del HUB está la recolección y registro de todos los datos de los dispositivos conectados a la red casera aguas abajo, dichos datos son etiquetados y almacenados en una memoria no volátil hasta que ocurra la próxima carga programada a la base de datos.

Un *Gateway* es un dispositivo que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas completamente diferentes a todos los niveles de comunicación. Dentro del entorno *Smart Home* permiten conectar la red HAN a Internet. Algunas compañías han integrado algunas o todas las funcionalidades del HUB en el mismo *Gateway* o del *Gateway* en el HUB, es por esto que dentro de las ofertas comerciales de algunas empresas se presenta únicamente uno de los dos equipos. Para los casos en que tanto el HUB como el *Gateway* se mantienen como componentes independientes del modelo de red inteligente, este último simplemente actúa como pasarela entre el sistema, el operador de red y el usuario, transmitiendo la información y permitiendo el control y la gestión por parte del propietario o la empresa electrificadora [46].

3.1.4. Fuentes de energía renovables no convencionales

Son energías que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya que por la inmensa cantidad de energía que contiene, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales y que tienen un índice de contaminación casi nulo [47]. El análisis de los diferentes tipos de energía renovable en Colombia se describe en el numeral 1.1.1.

La integración de fuentes de energía renovable (micro-generación en baja tensión) y sistemas de almacenamiento de energía dentro de la red de distribución es un concepto conocido como Recursos Distribuidos (*Distributed Energy Resources - DER*).

La generación distribuida conectada en las redes de media y baja tensión aporta cercanía de la generación al consumidor, lo que reduce las pérdidas técnicas asociadas al transporte y mejora la eficiencia de la red. además, con un sistema de control adecuado, puede prestar servicios complementarios a la red en los momentos críticos, lo que per-

mite aumentar los niveles de calidad de la energía suministrada y reducir la dependencia a los grandes generadores; además esta tecnología habilita la participación de los usuarios como cogeneradores, condición que brinda beneficios económicos a los usuarios, elemento clave en el despliegue de las redes eléctricas del futuro. Los sistemas de almacenamiento distribuido, también enmarcados en las tecnologías DER, complementan a la generación de energía a partir de fuentes renovables, puesto que su naturaleza es variable y no gestionable [5].

3.1.5. Vehículo eléctrico (VE)

La utilización de transporte eléctrico (movilidad eléctrica) es una de las tendencias en la mayoría de los países tanto desarrollados, como en vías de desarrollo en el mediano y largo plazo. Esta tecnología representa un importante desafío para las redes eléctricas del futuro, puesto que deben permitir la integración de este nuevo tipo de demanda, la cual presenta claras ventajas medioambientales al sustituir vehículos basados en combustibles fósiles.

Los vehículos eléctricos suponen una oportunidad para mejorar la eficiencia global del sistema eléctrico dado a que la recarga de sus baterías puede realizarse en el momento elegido por los usuarios y/o por el operador de red. Un adecuado control de dicho proceso implica una capacidad de gestionar la demanda, posibilitando el aplanamiento de la curva de carga.

Un nivel de funcionalidad más avanzado del VE es el llamado V2G (*Vehicle to Grid*), que permite que el vehículo sea capaz no solo de cargar su batería cuando se conecta a la red eléctrica sino también de descargar a la misma la energía existente en su batería. Contar con vehículos V2G conectados a la red con el control y supervisión proporcionado por las redes inteligentes permite disponer de un recurso energético que, en determinadas condiciones, puede proporcionar un suministro eléctrico que mejore la cobertura de demanda en situaciones puntuales [5].

3.1.6. Interfaz de usuario

En el campo de interacción hombre-máquina, la interfaz del usuario es el canal de acción-respuesta entre el hombre y la máquina. La meta de esta interacción es la monitorización y el control efectivo de la máquina, así como la retroalimentación de la misma. Para tal fin, muchos medios y métodos pueden ser considerados efectivos, sin embargo, la forma y la consistencia en la presentación de datos al usuario es determinante en la eficiencia general del sistema. A continuación, se presentan algunas consideraciones requeridas en las características de una interfaz del usuario [48]:

- **Fácil acceso a datos detallados:** En una buena interfaz de usuario los botones deben estar ubicados en la misma pantalla, requiriendo sólo un clic para acceder a información más detallada. La interfaz puede contener varias gráficas importantes con opción de selección según los datos que el usuario demande y debe ser flexible en el acceso del histórico de datos para comparar periodos de consumo y para verificar las metas de ahorro energético.
- **Provisión de información útil para ahorrar energía:** La interfaz debe soportar actividades adicionales a mostrar gráficas y curvas de consumo. Es necesario buscar la manera de sensibilizar al usuario en diferentes perspectivas y en términos fácilmente comprensibles. Para esto, el uso de mensajes de alerta o tips de ahorro permite mostrar datos como el gasto energético en pesos, o la reducción del consumo, lo cual permite orientar al usuario en busca de lograr un mejor uso de la energía eléctrica.
- **Capacidad de almacenamiento de los intereses del usuario:** De permitir la recolección de información acerca de los intereses de cada usuario sobre el consumo de cada electrodoméstico y cómo este interés cambia en el tiempo es muy importante. De igual forma, es necesario conocer acerca de la forma de operación de cada uno de los botones de la interfaz y la respuesta del usuario a cada tip o consejo de ahorro, permitiendo analizar la respuesta de los clientes acerca del

consumo de energía y el potencial ahorro de la misma.

3.1.7. Electrodomésticos inteligentes

Los electrodomésticos o cargas inteligentes son dispositivos que cuentan con la capacidad de responder ante señales provenientes de la empresa proveedora del servicio de energía eléctrica, con la intención de ajustar el nivel de consumo en un hogar; o provenientes del usuario, con el fin de configurar el ambiente del hogar e impartir funciones específicas como por ejemplo activar el uso de la lavadora a cierta hora del día o de la noche, esto con el fin de realizar un uso eficiente de la energía. En un escenario común, los mayores valores de consumo de la energía se encuentran concentrados en determinadas horas del día. El escenario ideal corresponde a la distribución (o traslado) de estos consumos a otras horas del día o de la noche. Debido a esto, la utilización de electrodomésticos inteligentes integrados con actuadores y sistemas de monitorización representa un punto crucial en la gestión de demanda energética [43].

3.2. El conmutador inteligente de potencia

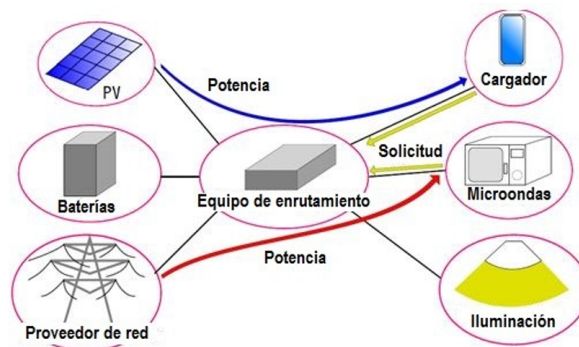
3.2.1. Enrutador de potencia (*AC Power Router*)

La instalación de fuentes renovables de energía como los paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y/o celdas de combustible en conjunto con la red eléctrica comercial, produce electricidad de calidad variable en los hogares debido a las fluctuaciones que las fuentes no convencionales de energía introducen a la red [49]. La calidad de la energía eléctrica implica un suministro de potencia máxima disponible, además de presentar estabilidad de frecuencia y tensión [50]. En general, la energía generada por fuentes renovables es inferior en calidad a la energía comercial [49].

Actualmente, el uso de baterías secundarias es combinado con las fuentes de generación distribuida para compensar los cambios en la potencia de salida, ajustando la calidad de la energía de salida a la de la red comercial por medio de inversores

y convertidores. Sin embargo, este método es ineficiente debido a que incrementa las pérdidas del sistema a causa de las múltiples conversiones [50]. Algunos equipos como los computadores portátiles y los dispositivos móviles son construidos con baterías internas, no siendo necesario que estos sean alimentados con energía de alta calidad. Por tanto, es razonable conectar una determinada fuente de energía con ciertas cargas, dependiendo de las necesidades de cada una de estas [50].

Figura 3.4: Red de distribución AC de un hogar.



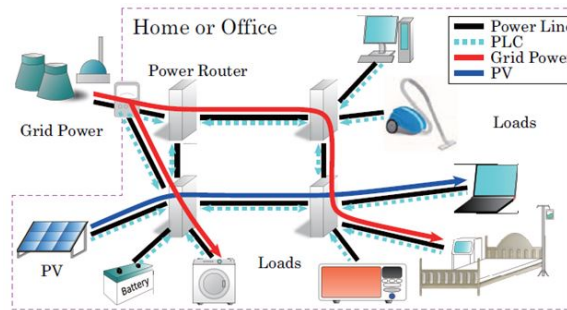
Fuente: Takuno, T., Kitamori, Y., Takahashi, R., and Hikihara, T., "AC power routing system in home based on demand and supply utilizing distributed power sources", *Energies*, vol. 4, no. 5 (2011), pp.717-726.

Por tanto, los requerimientos de energía de cada una de las cargas deben ser conocidos, para lo cual la información puede ser transmitida a través de Ethernet, LAN inalámbrica u otros métodos de radio frecuencia. Sin embargo, los métodos de comunicación convencionales requieren medios físicos de transmisión destinados para su transmisión, presentando inconvenientes en los momentos en que la línea de distribución se divide en varias ramas, por lo cual se propone la superposición de la información en la forma de onda de energía mediante la utilización de *Power Line Communications (PLC)* [50].

La Figura 3.4 muestra el mapa conceptual de la red de distribución AC del hogar. En este, las diferentes fuentes de alimentación externas o propias y los circuitos internos del hogar son conectados al equipo de enrutamiento, de esta manera, cuando el usuario desea utilizar un aparato eléctrico, este envía una solicitud de suministro al enrutador correspondiente a la cantidad de potencia necesaria, la calidad de potencia requerida, el

número de identificación del aparato, la prioridad de las solicitudes, y así sucesivamente. El enrutador recibe la información y selecciona una fuente adecuada a las características de la carga [49]. Esto implica que el sistema esta administrado de forma centralizada, en donde las cargas incorporan baterías, la potencia suministrada es relativamente de baja calidad. Por el contrario, la energía comercial de alta calidad se suministra preferentemente para cargas importantes o equipos, tales como instrumentos médicos, que no tienen la tolerancia a la caída de tensión momentánea. Así, el equipo de enrutamiento decide utilizar fuentes de energía renovables tanto como sea posible [49].

Figura 3.5: Configuración de la red de enrutadores de potencia.



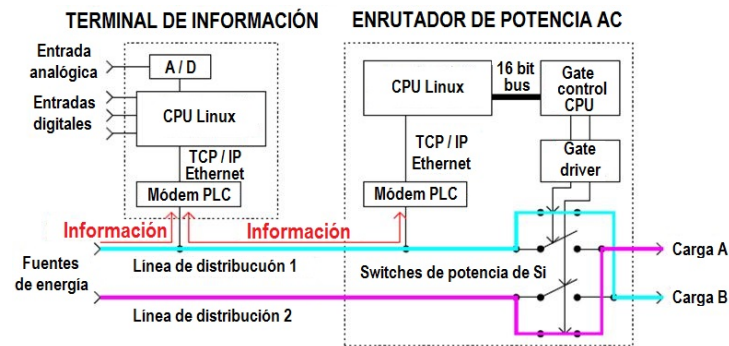
Fuente: Takahashi, R., Kitamori, Y., and Hikihara, T., "AC power local network with multiple power routers", *Energies*, vol. 6, no. 12 (2013), pp.6293-6303.

En [51] se evalúa la factibilidad de crear una red de enrutadores de potencia como la mostrada en la Figura 3.5, presentado resultados satisfactorios, producto de la validación de su funcionamiento por medio de pruebas de la conexión en serie y paralelo de los router, lo cual es realizado de esa manera, debido a que cualquier red puede ser configurada con la combinación de esas dos topologías.

El sistema de la red propuesta es establecido por medio de la conexión de los enrutadores de potencia y la terminal de información. La Figura 3.6 se muestra el diagrama esquemático de los dos componentes, en este se observa que cada dispositivo de la red cuenta con un modem PLC y un microprocesador con Linux OS, permitiendo de esta manera la comunicación con los demás elementos de la red [51]. La función del enrutador de potencia es la conmutación entre las fuentes y las cargas, mientras que la terminal

de información juega el papel de controlar los enrutadores y comunicarse con ellos para compartir la información relacionada con la capacidad de energía, la calidad de cada fuente y la demanda de las cargas [51].

Figura 3.6: Diagrama esquemático del AC Power Router y su terminal de información.



Fuente: Takahashi, R., Kitamori, Y., and Hikihara, T., "AC power local network with multiple power routers", *Energies*, vol. 6, no. 12 (2013), pp.6293-6303.

3.2.2. Nodo verde de potencia inteligente (*Smart Green Power Node - SGPN*)

En esencia el SGPN es un enrutador de potencia inteligente y un componente de la Smart Grid que cuenta con una arquitectura escalable que no sólo está limitada a usos residenciales, sino que también es aplicable para usos comerciales e industriales. Este dispositivo puede adquirir varios tipos de datos e incorpora algoritmos de control para distribuir la energía generada de forma local a las cargas o regresarla a la red pública, produciendo un ahorro de energía para los usuarios y empresas de servicios públicos [52].

La Figura 3.7 muestra la topología general del SGPN, en esta se destacan los siguientes componentes importantes:

1. **Convertidor elevador fotovoltaico DC-DC de 500W:** Controla la potencia de salida de los paneles fotovoltaicos utilizando el seguimiento del punto máximo de potencia (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Recibe información de referencia

cargas por medio de las fuentes renovables, monitorizando la red eléctrica, de tal manera que en el momento en que la falla es solucionada, regresa a su operación con la red pública [52].

4. **Administrador de datos y energía:** Es el encargado de administrar y recolectar toda la información de los diferentes sensores y equipos conectados, transmitiendo las ordenes de control a cada componente del dispositivo y del sistema. Cuenta con conexión a Internet, a medidores inteligentes y a una interfaz de usuario, de los cuales recolecta información del clima, de consumo, de preferencias de uso, etc. que le permite ejecutar los algoritmos de control para administrar la energía dentro del hogar [52].

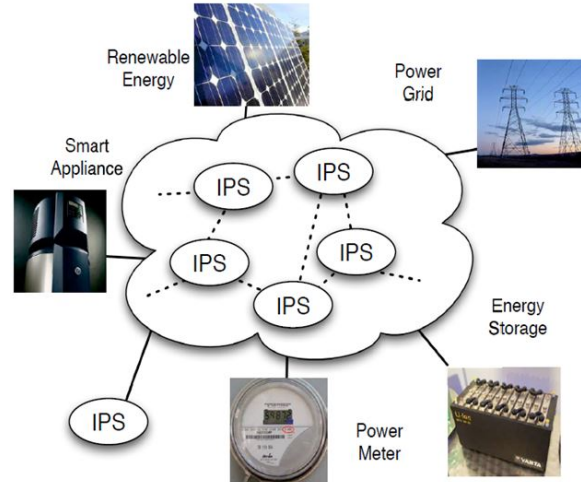
3.2.3. Conmutador inteligente de potencia (*Intelligent Power Switch - IPS*)

En [53] es presentado el concepto de la red eléctrica del futuro; proponiendo una innovadora arquitectura de energía eléctrica que integra funcionalidades tanto de Internet como de las micro-redes. El componente principal de esta arquitectura es un IPS que combina las capacidades de un enrutador de Internet con la conversión de energía y protección de equipos [53].

El diseño de un IPS es propuesto en [54] y [55], este es un dispositivo que puede re-direccionar el flujo de energía de un puerto a otro y que respecto a su funcionamiento, actúa como un enrutador de potencia en la red eléctrica. Además, como se muestra en la Figura 3.8, es posible conectarlo con diferentes electrodomésticos, equipos de hogar y también otros IPS.

El propósito de un IPS es conmutar la energía de un puerto a otro, es decir, que cualquier componente conectado al IPS puede estar conectado otro, o al mismo tiempo múltiples puertos pueden ser conectados juntos [54]. Esto significa que si se tienen dos fuentes, A y B, y dos cargas, C y D, A puede proveer energía a C y B puede suministrar energía a D paralelamente. Para lograr este objetivo, el IPS usa el diseño presentado

Figura 3.8: Arquitectura general de la red eléctrica.



Fuente: Lu, G., De, D., and Song, W. Z., "Smartgridlab: A laboratory-based smart grid testbed", *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm)*, pp. 143-148. IEEE, Oct. 2010.

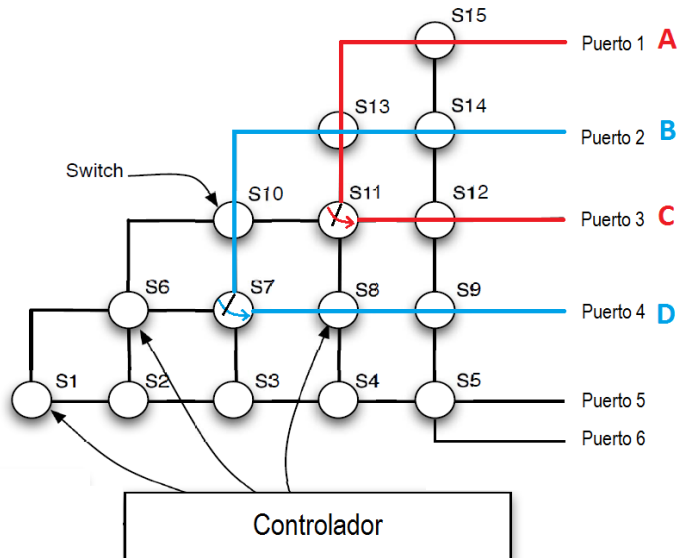
en la Figura 3.9 [54]. Los switches en la intersección de dos líneas pueden controlar la conexión de un par de líneas. Por ejemplo, S6 se encuentra en la intersección de los puertos 3 y 4, de esta manera, si S6 es cerrado, los dos puertos tendrán conexión entre sí, de otra manera estarán aislados [54].

El diseño presentado en la Figura 3.9 corresponde a un IPS en el cual son utilizados quince switches para controlar seis puertos. En caso de ser necesarios más puertos, la cantidad switches necesarios es calculada a partir de la Ecuación 3.1, en la cual N_p corresponde al número de puertos y N_s es el número de switches requeridos [55].

$$N_s = \frac{N_p * (N_p - 1)}{2} \quad (3.1)$$

Así mismo, cuando son necesarios muchos puertos, pueden ser usados dos o más IPS conectados en cascada. La configuración de la conexión puede ser realizada de tres formas: múltiples fuentes a una carga, una fuente a múltiples cargas o conexión en paralelo [55].

Figura 3.9: Diseño del conmutador inteligente de potencia.



Fuente: Lu, G., De, D., and Song, W. Z., "Smartgridlab: A laboratory-based smart grid testbed", *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm)*, pp. 143-148. IEEE, Oct. 2010.

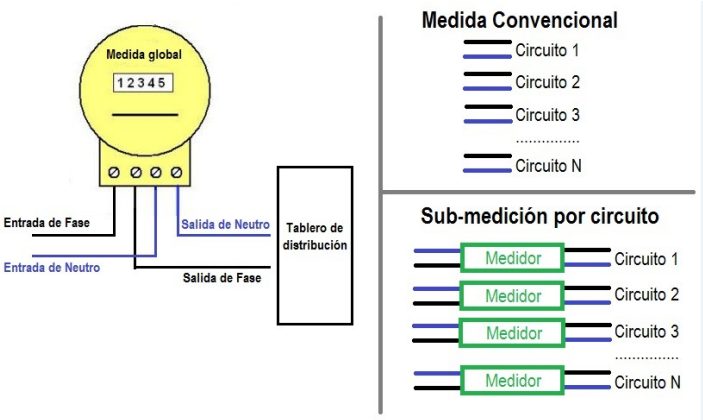
3.3. La sub-medición por circuito

Con estos sistemas se busca brindar información más detallada y en tiempo real del consumo de energía eléctrica de cada sector de la vivienda, lo cual en conjunto con el conmutador inteligente de potencia, hacen posible la implementación de programas de gestión energética y uso racional de la energía que permitan la reducción del consumo y los costos económicos.

Igualmente, dentro de la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones presentada en [30] y [31], la sub-medición por circuito es planteada como una medida pasiva que busca mejorar la eficiencia de las edificaciones, ayudando al usuario a entender la distribución del consumo de energía y proveer suficiente información sobre cual comportamiento de acción/corrección de conservación de energía debe aplicarse.

En la Figura 3.10 se observa la diferencia entre una medida convencional y la realizada por medio de la sub-medición por circuito. Para esto, la recolección de los datos se realiza mediante dispositivos de sub-medida independientes, adicionales a los provistos

Figura 3.10: Diferencia entre la medida convencional y la sub-medición por circuito.

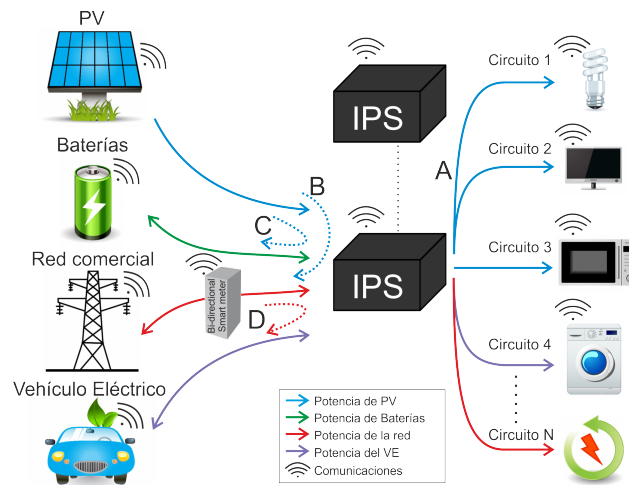


por las compañías de distribución de energía, uno por circuito ramal [56]. Estos dispositivos electrónicos tienen además de su módulo de medición de energía eléctrica, un módulo de comunicación que permite su monitorización y control desde el concentrador de la Smart Home.

4. Sistema de gestión energética residencial utilizado

Partiendo de la información presentada en el capítulo 3, en la Figura 4.1 se muestra el concepto de un sistema de gestión eléctrico residencial, el cual cuenta con el IPS como componente central. Adicionalmente, se observa como por medio de éste es posible re-direccionar el flujo de energía eléctrica de un puerto a otro.

Figura 4.1: Red eléctrica residencial que integra el IPS.



A continuación, se describen los casos de conexión presentados en la Figura 4.1:

- Caso A: la energía generada por los paneles fotovoltaicos es entregada a los circuitos 1, 2 y 3. Adicionalmente, la energía del vehículo eléctrico es suministrada al circuito 4 y simultáneamente, los circuitos restantes son alimentados por la red comercial.
- Caso B: en este escenario la energía generada por el sistema fotovoltaico es vendida a la red comercial. Mostrando que los hogares pasan de ser simplemente consumidores a ser también generadores. Para esto, es indispensable la integración del medidor inteligente bidireccional.
- Caso C: en este caso la energía generada por los paneles fotovoltaicos es utilizada para cargar un banco de baterías. Mostrando al igual que en el caso B, como el

IPS no solo permite la conexión entre fuentes y cargas, sino que también es posible conectar fuentes entre si.

- Caso D: el vehículo eléctrico es cargado con energía de la red comercial. Este es un escenario práctico para momentos en el que el precio de la energía sea bajo.

De acuerdo con lo explicado anteriormente, es importante resaltar que el IPS además de actuar como un enrutador de potencia en la red eléctrica, cuenta con un sistema embebido, comunicación inalámbrica y/o cableada y es posible conectarlo con diferentes fuentes de energía (incluidas las fuentes renovables), electrodomésticos inteligentes, almacenamiento de energía, medidores inteligentes y también otros IPS. De esta manera, el IPS permite crear una red eléctrica distribuida y escalable, controlando eficientemente la interconexión de sus componentes [54].

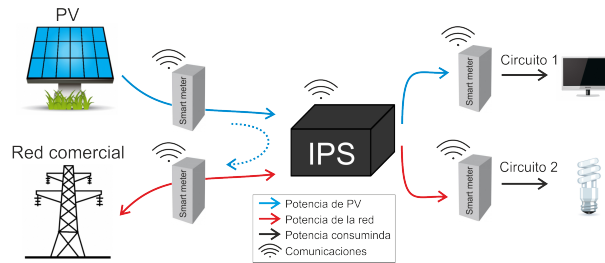
4.1. Topología del sistema de gestión eléctrico residencial experimental

A partir del concepto presentado en la Figura 4.1, se propone la utilización de un sistema de gestión experimental basado en un IPS de cuatro puertos (Figura 4.2). El sistema está compuesto por dos fuentes de energía eléctrica: la red comercial con su medidor de energía y un sistema fotovoltaico. Adicionalmente, se tienen dos circuitos de salida, en donde cada uno de estos está equipado con un medidor inteligente de energía eléctrica, permitiendo integrar el concepto de sub-medición por circuito, y de esta manera, monitorizar con más detalle el consumo de cada uno de los circuitos del hogar.

4.1.1. Componentes

A continuación, se describen las características de los componentes que integran el sistema:

Figura 4.2: Integración del conmutador inteligente de potencia y la sub-medición por circuito.



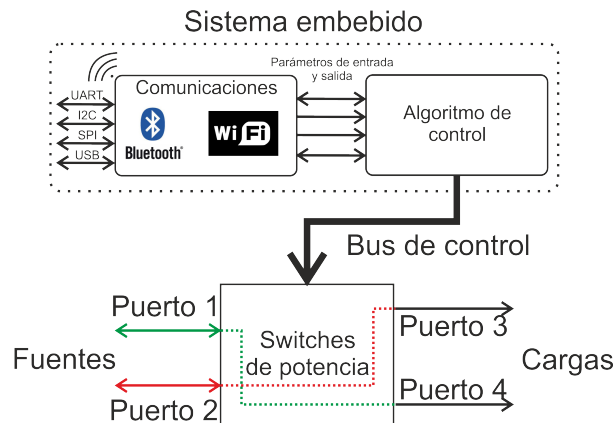
- Red pública: permite el flujo bidireccional de energía con los clientes, realiza la monitorización remota del consumo de la vivienda y se encarga de administrar y comunicar a los usuarios el precio de la energía eléctrica, permitiendo generar un escenario de tarifa diferencial.
- Sistema fotovoltaico (*Photovoltaic System - PV*): compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos y un inversor de energía eléctrica con capacidad de funcionar en forma aislada o conectado a la red. Adicionalmente, el inversor está dotado con comunicación inalámbrica, por medio de la cual el IPS puede conocer la capacidad de energía que puede suministrar el sistema PV.
- Cargas: las cargas son vistas como circuitos ramales de un hogar. Con esto se busca tener control sobre un conjunto de electrodomésticos divididos según sus características en: iluminación, entretenimiento, cocina, lavado y planchado, climatización y otros electrodomésticos.
- Sub-medidores: la integración de estos medidores inteligentes permiten al IPS tener conocimiento de la demanda de energía eléctrica de cada uno de los circuitos ramales de la vivienda, permitiendo tener un conocimiento más detallado del consumo. La comunicación con el IPS es realizada por medio de protocolos de comunicación inalámbricos o cableados como el ZigBee o el RS485 respectivamente. A partir de esto y los demás parámetros de entrada del IPS, es posible controlar la conmutación de los interruptores.

- Medidor bidireccional: permite monitorizar el consumo de potencia de la red pública y la energía regresada a la red. La comunicación con el IPS es realizada por medio de protocolos como el Ethernet, Wifi, ZigBee o el RS485.

4.1.2. Esquemático del Conmutador Inteligente de Potencia

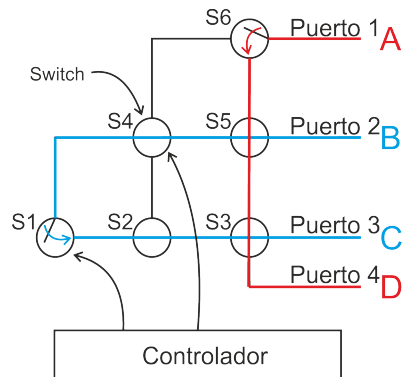
En la Figura 4.3 se presenta el diagrama esquemático de un IPS de cuatro puertos. El cual puede ser dividido en dos componentes: el primero es el sistema embebido y el segundo es la etapa de electrónica de potencia o switches de potencia.

Figura 4.3: Esquemático del IPS.



El sistema embebido se encarga de brindar al IPS las funcionalidades de comunicación y control. Para esto, es posible hacer uso de protocolos de comunicación inalámbrica como el Bluetooth y el Wifi, o protocolos cableados como el UART, el I2C, el SPI o el USB para intercambiar información con las fuentes de energía, las cargas, otro IPS, la red comercial y los usuarios. De esta manera, es posible conocer la información relacionada con la demanda de las cargas, la capacidad de energía que pueden suministrar las fuentes y la tarifa de la energía eléctrica. Esta información es importante ya que son los parámetros de entrada para el algoritmo de control encargado de la apertura o cierre de los interruptores de la etapa de potencia. Adicionalmente, es posible enviar información al proveedor del servicio y a los usuarios por medio de la conexión a internet.

Figura 4.4: Configuración de los switch de potencia.



Fuente: Lu, G., De, D., and Song, W. Z., "Smartgridlab: A laboratory-based smart grid testbed", In Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on, pp. 143-148. IEEE, 2010.

Por otra parte, la función de la etapa de electrónica de potencia es permitir la conmutación de entre las fuentes y las cargas. De esta forma, cualquier dispositivo conectado al IPS puede ser conectado con otro, o al mismo tiempo múltiples puertos pueden ser conectados entre sí. Para lograr esto, el IPS está basado en el diseño presentado en la Figura 4.4, el cual corresponde a un esquema reducido de la topología descrita en el numeral 3.2.3

Para el diseño del IPS presentado son utilizados seis interruptores para controlar cuatro puertos, en donde cada uno de estos puede ser utilizado como entrada o salida. En caso de ser necesarios más puertos, la cantidad interruptores necesarios es calculada a partir de la Ecuación 3.1, la cual fue descrita en el numeral 3.2.3.

5. Simulaciones

El componente de simulación del proyecto fue realizado por medio de las herramientas software PSIM y ORCAD. A partir de las cuales se verifica el funcionamiento del sistema propuesto. Para esto, se presentan diferentes escenarios de conexión en los que se analizan las características de corriente y tensión en las fuentes y las cargas del IPS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

5.1. Simulación en PSIM

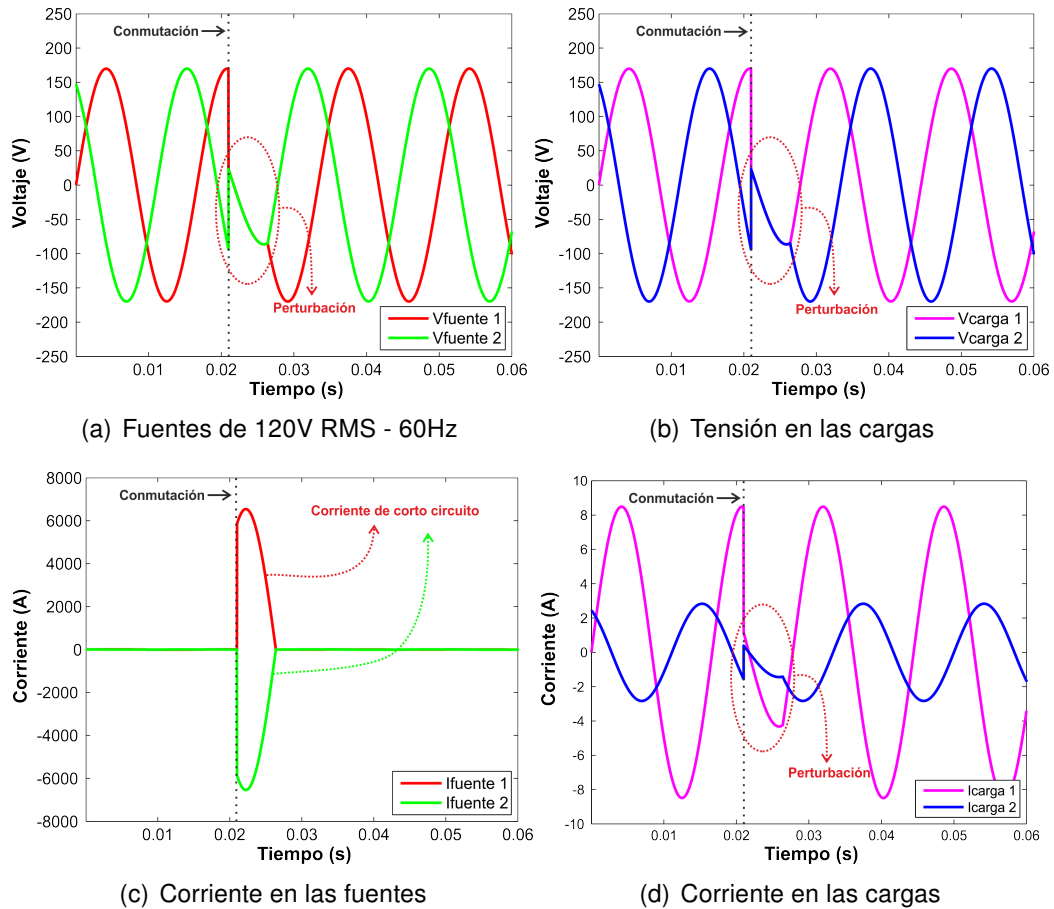
Para el caso de las simulaciones realizadas en PSIM, es importante resaltar que el modelo del alternistor y los demás dispositivos son ideales, por lo que los resultados obtenidos en esta etapa son una referencia que será verificada con la posterior simulación en ORCAD y las pruebas experimentales.

Teniendo en cuenta que para la etapa de electrónica de potencia del IPS se utilizan los alternistores Q8025L6, se debe asegurar que, al momento de realizar una conmutación entre puertos, los interruptores deben desconectarse de forma natural (señal de bajo en el *gate* y cruce por cero de la corriente), ya que de no ser así, se puede presentar la circulación de corrientes muy elevadas (de corto circuito) que pueden acortar la vida útil del IPS o producir su destrucción. Esto puede suceder cuando se conectan fuentes de tensión desfasadas entre sí o por el manejo de cargas RL con diferente factor de potencia.

Tabla 5.1: Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.1.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 2	Carga 1

Figura 5.1: Conmutación equivocada de fuentes desfasadas con cargas R. En (a) se observa el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (c) se evidencia la corriente de cortocircuito producto de la conexión equivocada de los puertos del IPS. En (b) y (d) se observan las perturbaciones en las cargas producto de la conmutación equivocada.



En la Figura 5.1 se muestra una situación en la que son usadas dos fuentes de tensión de 120V RMS - 60Hz con desfase de 100° entre si y resistencias de línea de $0,025\Omega$ y $0,02\Omega$ respectivamente (Fuente 1 y Fuente 2), las cuales son conectadas a dos cargas resistivas de 20Ω y 60Ω (Carga 1 y Carga 2) de acuerdo con el patrón de conexión de la Tabla 5.1. Se puede apreciar que en el instante en que el IPS conecta la Fuente 1 con la Carga 2 y la Fuente 2 con la Carga 1 ($t=0,021s$) aparece una corriente de cortocircuito de aproximadamente 6,5kA (Figura 5.1c) durante un poco más de un cuarto de ciclo de onda. Además, durante el tiempo de duración del cortocircuito, se observan

perturbaciones en la tensión de las fuentes y en la tensión y la corriente de las cargas (Figura 5.1a, Figura 5.1b y Figura 5.1d).

Para evitar esta situación, se propone el uso de optotriacs sincronizados con la red (cruce por cero) y la adición de tiempos de retardo de conexión equivalentes a medio o un ciclo de onda del periodo de la red, de esta manera, se busca permitir que los alternistores en uso puedan abrirse de forma natural y posteriormente proceder con la activación de los switches pertinentes.

A continuación, se presenta el análisis de dos escenarios de conmutación.

5.1.1. Intercambio de fuentes para cargas RL y R

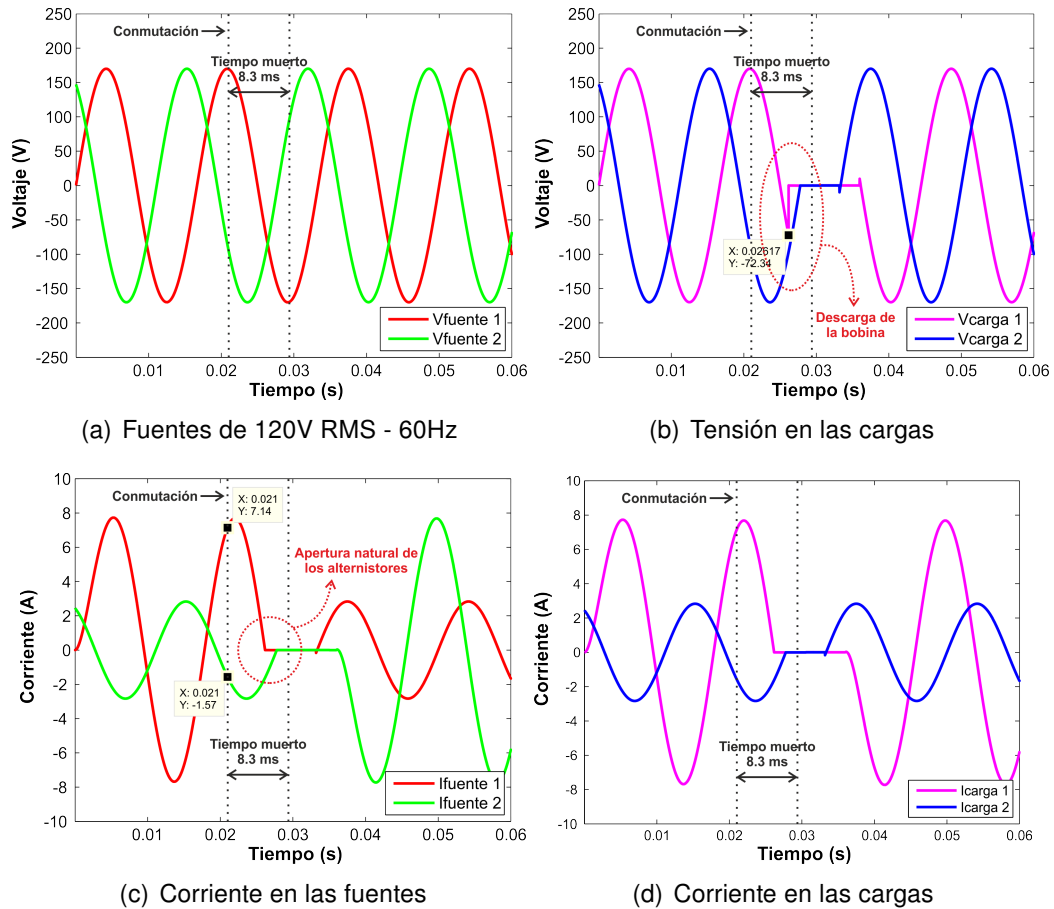
Para este escenario se usan dos fuentes de energía de 120V RMS - 60Hz con un desfase de 100° entre si y resistencias de línea de $0,025\Omega$ and $0,02\Omega$ respectivamente (Fuente 1 y Fuente 2). Adicionalmente, se utiliza una carga RL con $R= 20\Omega$ y $L= 25\text{mH}$ (Carga 1) y una carga de 60Ω (Carga 2). En la Tabla 5.2 se muestra el patrón de conexión utilizado, evidenciando el intercambio en la fuente de alimentación de las cargas.

En la Figura 5.2a se observa que al momento de la conmutación ($t=0,021\text{s}$), la tensión de las fuentes es diferente debido a su desfase y en la Figura 5.2c se muestra que las corrientes en el IPS son de 7,14A (para la Fuente 1) y de -1,57A (para la Fuente 2), lo cual no permite que los alternistores tengan una apertura natural de forma inmediata. Por esta razón, se hace necesario la implementación de un tiempo muerto de 8,3 ms (medio ciclo de onda) para que los alternistores que están en uso puedan realizar su apertura de forma natural en el siguiente cruce por cero de la señal de corriente (Figura 5.2c).

Tabla 5.2: Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.2.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 2	Carga 1

Figura 5.2: Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.2. En (a) se muestra el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (b) se observa el transitorio de descarga de la bobina y el ángulo de desfase adicional producido por el componente inductivo de la Carga 1. Además, en (c) y (d) se evidencia el tiempo muerto requerido para que la corriente de los triac llegue a su cruce por cero.



De la misma manera, las Figuras 5.2b y 5.2d muestran que debido al componente inductivo de la Carga 1, se agrega un desfase adicional a su señal de corriente, lo cual se evidencia en el momento en que finaliza el transitorio de descarga de la bobina, observando que aunque la corriente llega a su cruce por cero, la señal de tensión se encuentra en -72,34V. Por el contrario, para la Carga 2, las Figuras 5.2b y 5.2d permiten ver que las señales de tensión y de corriente se encuentran en fase, lo cual se debe a que ésta es de carácter netamente resistivo.

5.1.2. Conexión simultánea de fuentes a una carga R

Este escenario de conexión utiliza una fuente de energía de 120V RMS - 60Hz con fase cero (Fuente 1), resistencia de línea de $0,025\Omega$ y con posibilidad de entregar una corriente máxima de 12A (potencia limitada del sistema fotovoltaico). Adicionalmente, se utiliza una segunda fuente energía de 120V RMS - 60Hz, con fase cero (Fuente 2), resistencia de línea de $0,02\Omega$ y sin limitaciones de corriente (red comercial). Las cargas utilizadas son resistencias de 20Ω y 60Ω (Carga 1 y Carga 2). En la Tabla 5.3 se muestra el patrón de conexión utilizado, permitiendo ver que las dos fuentes pasan de trabajar de forma independiente, a conectarse de forma simultánea a la Carga 1.

Tabla 5.3: Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.3.

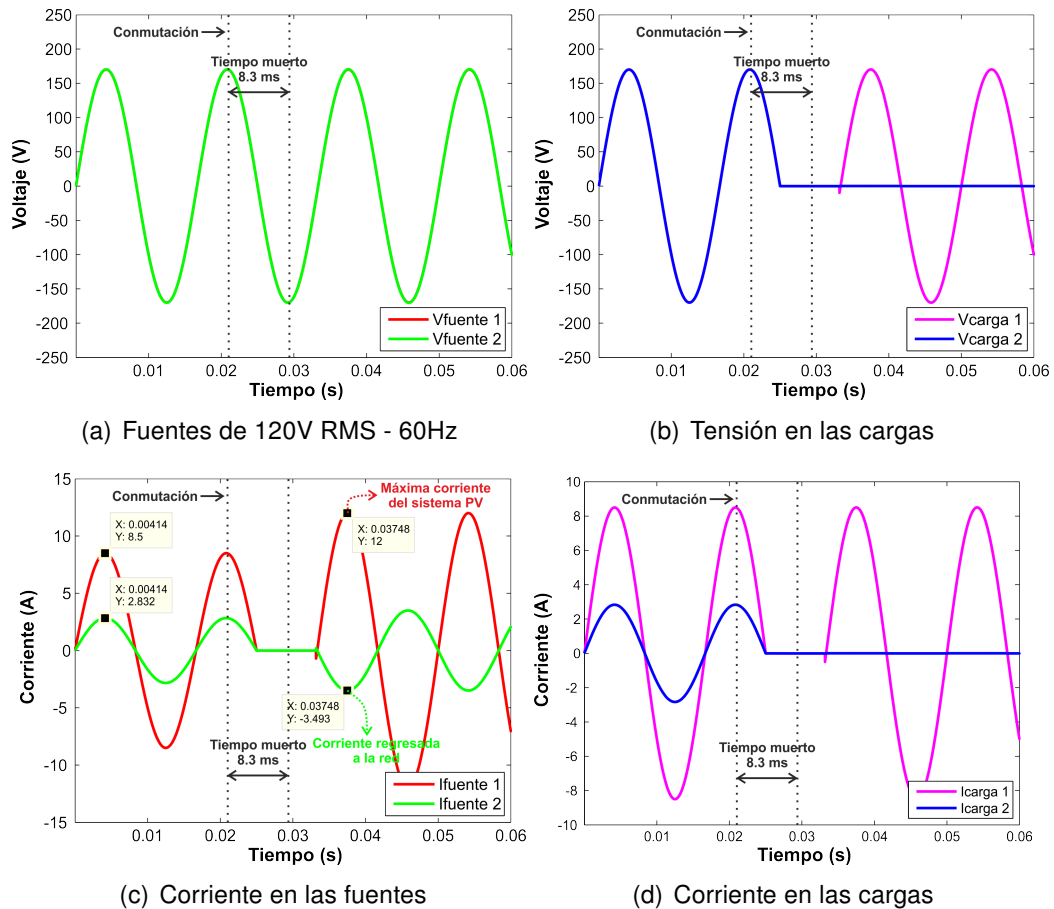
Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 1	Carga 1

La Figura 5.3a muestra que las fuentes de tensión se encuentran en fase, lo cual es posible por medio de inversores que se sincronizan con la red. Igualmente, en las Figuras 5.3b y 5.3d se muestra que antes de la conmutación las cargas se encuentran alimentadas de forma independiente por cada una de las fuentes, sin embargo, después de la conmutación sólo la Carga 1 se mantiene energizada.

Así mismo, en la Figura 5.3c se observa que antes de la conmutación ($t < 0,021s$) las fuentes entregan la potencia requerida por cada una de las cargas (Carga 1 = 8,5A pico / Carga 2 = 2,83A pico), mientras que después de la conmutación ($t > 0,021s$), al conectar las dos fuentes de forma simultánea a la Carga 1, se puede ver que la Fuente 1 (sistema fotovoltaico) entrega su máxima potencia disponible al sistema (Corriente máxima de 12A pico), satisfaciendo la demanda de la Carga 1, y permitiendo que la energía sobrante sea inyectada a la red comercial (3,5A pico). De igual manera, es importante resaltar que en caso de que la potencia instantánea generada por el sistema fotovoltaico no pueda satisfacer la energía requerida por las cargas, la red comercial puede servir como apoyo

para cubrir la demanda faltante.

Figura 5.3: Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.3. En (a) se muestra que las dos fuentes se encuentran sincronizadas. En (b) y (d) se observa que las dos cargas se alimentan de forma independiente antes de la conmutación y que después sólo queda energizada la Carga 1. En (c) se evidencia que antes de la conmutación las fuentes entregan la potencia requerida por las cargas y que después la Fuente 1 entrega su máxima potencia, suministrando lo requerido por la Carga 1 e inyectando el sobrante a la red comercial.



5.2. Simulación en Orcad

Las simulaciones en ORCAD son realizadas utilizando el modelo PSPICE real del alternistor Q8025L6, con el fin de que los resultados obtenidos sean bastante aproximados a la realidad. A partir de esto, se realiza el análisis de los diferentes escenarios de

conexión que se pueden realizar en el IPS y se estudia la eficiencia del dispositivo.

A continuación, se muestra el análisis de un escenario de conmutación y posteriormente se presenta un análisis de eficiencia del IPS.

5.2.1. Cargas alimentadas por fuentes independientes a cargas alimentadas simultáneamente por la misma fuente

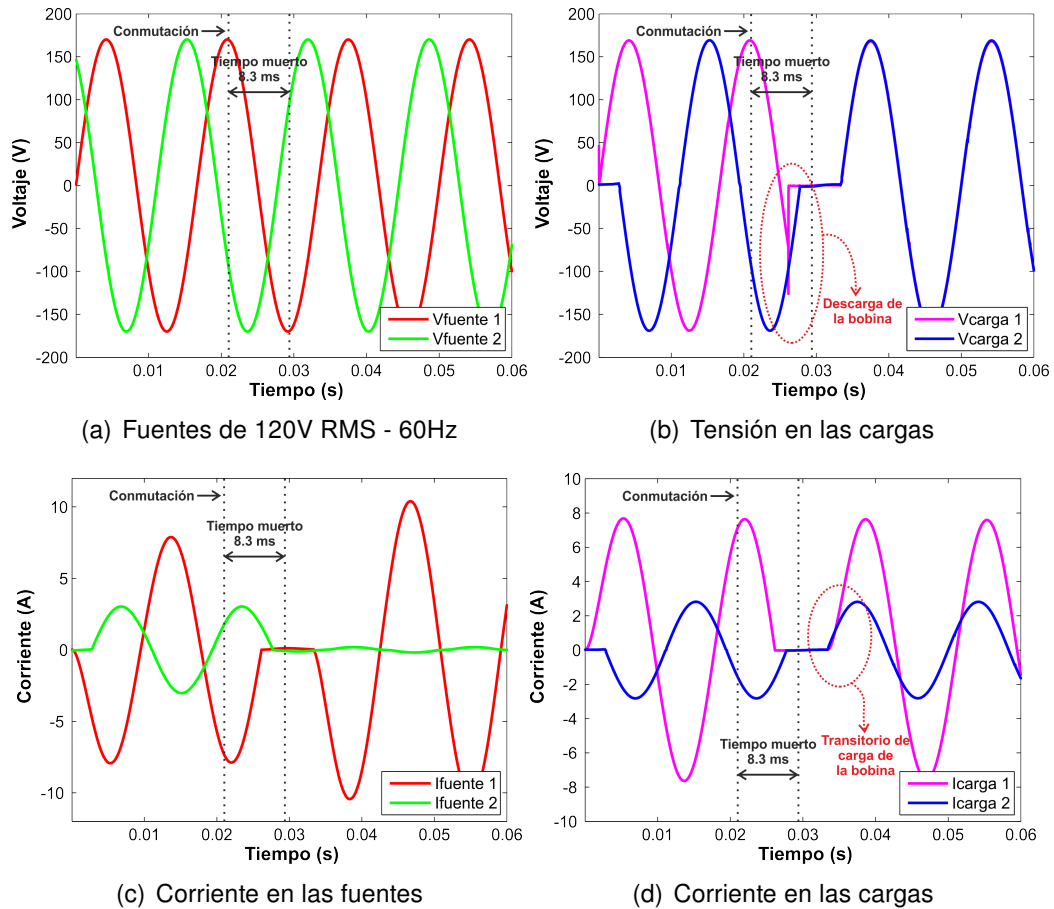
Para esta simulación se utilizan dos fuentes de energía de 120V RMS - 60Hz con un desfase de 100° entre si y resistencias de línea de $0,025\Omega$ y $0,02\Omega$ respectivamente (Fuente 1 y Fuente 2). Adicionalmente, se utiliza una carga RL con $R= 20\Omega$ y $L= 25\text{mH}$ (Carga 1) y una carga de 60Ω (Carga 2). En la Tabla 5.4 se muestra el patrón de conexión utilizado, donde se puede observar que las cargas pasan de estar alimentadas de forma independiente, a estar energizadas de forma simultánea por la Fuente 1.

Tabla 5.4: Conmutación de cargas para el experimento de la Figura 5.4.

Etapas de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 1 y Carga 2	–

En las Figuras 5.4b y 5.4c se muestra que en el momento en que ocurre la conmutación ($t=0,021\text{s}$), la Fuente 2 sale de funcionamiento, quedando las dos cargas energizadas por la Fuente 1. Debido a esto, en la Figura 5.4c se ve un incremento en la corriente suministrada por la Fuente 1, la cual pasa de entregar aproximadamente 7,9A a suministrar aproximadamente 10,4A. Igualmente, la Figura 5.4d permite observar una pequeña diferencia en el comportamiento de la corriente al momento de la reconexión, lo cual se debe a que la Carga 1 tiene un componente inductivo, por lo que presenta un transitorio de carga, lo cual no ocurre con la Carga 2, debido a su característica netamente resistiva.

Figura 5.4: Características de tensión y corriente en el IPS al realizar la conmutación descrita en la Tabla 5.4. En (a) se muestra el desfase de 100° entre las tensiones de las fuentes. En (b) se observa que después de la conmutación, la tensión en las cargas es la misma, ya que pasan a estar alimentadas por la misma fuente. En (c) se evidencia que después de la conmutación, la corriente suministrada por la Fuente 1 aumenta. En (d) se ve que las dos cargas siguen en funcionamiento después de la conmutación.



5.2.2. Análisis de eficiencia

El análisis de la eficiencia se realiza con el fin de identificar la forma en que cambia el rendimiento del dispositivo ante diferentes tipos de cargas.

Los resultados obtenidos en la Tabla 5.5, muestran que a medida que el consumo de potencia de la carga disminuye, la eficiencia del dispositivo aumenta, sin embargo, este incremento es pequeño, ya que si se analizan los valores extremos para cuando se

tienen tres alternistor en funcionamiento, para una carga de 12Ω (1200W) la eficiencia es del 97,87 % y para una carga de 2800Ω (5,23W) la eficiencia es del 99,47 %. Lo cual evidencia que las pérdidas presentes en los alternistores son bajas, permitiendo que el IPS tenga un rendimiento adecuado al funcionar con bajas y altas corrientes.

Con la variación de la carga lo que se busca es emular el comportamiento del IPS ante cargas típicas de una vivienda como: una plancha (1200W), una licuadora (600W), una nevera (400W), una luminaria led (5W), entre otros.

Tabla 5.5: Análisis de eficiencia del IPS.

# de Triacs en serie	Carga	Consumo	Eficiencia
1	R= 12Ω	1200W	99,29 %
1	R= 30Ω	480	99,36 %
1	R= 220Ω	65,45W	99,44 %
1	R= 500Ω	28,8W	99,47 %
1	R= 1500Ω	9,6W	99,55 %
1	R= 2800Ω	5,14W	99,82 %
2	R= 12Ω	1200W	98,52 %
2	R= 30Ω	480W	98,75 %
2	R= 220Ω	65,45W	98,90 %
2	R= 500Ω	28,8W	98,97 %
2	R= 1500Ω	9,6W	99,07 %
2	R= 2800Ω	5,14W	99,64 %
3	R= 12Ω	1200W	97,87 %
3	R= 30Ω	480W	98,09 %
3	R= 220Ω	65,45W	98,34 %
3	R= 500Ω	28,8W	98,44 %
3	R= 1500Ω	9,6W	98,69 %
3	R= 2800Ω	5,14W	99,47 %
2	R= 12Ω / L= 20mH ==> FP=0,846	853,5W	95,44 %
2	R= 220Ω / L= 3000mH ==> FP=0,889	57,56W	97,01 %
2	R= 500Ω / L= 900mH ==> FP=0,827	19,74W	95,62 %
3	R= 12Ω / L= 20mH ==> FP=0,846	853,5W	94,91 %
3	R= 220Ω / L= 3000mH ==> FP=0,889	57,56W	96,22 %
3	R= 500Ω / L= 900mH ==> FP=0,827	19,74W	95,38 %
3	No lineal	1200W	97,22 %
3	No lineal	500W	97,53 %
3	No lineal	5W	99,18 %

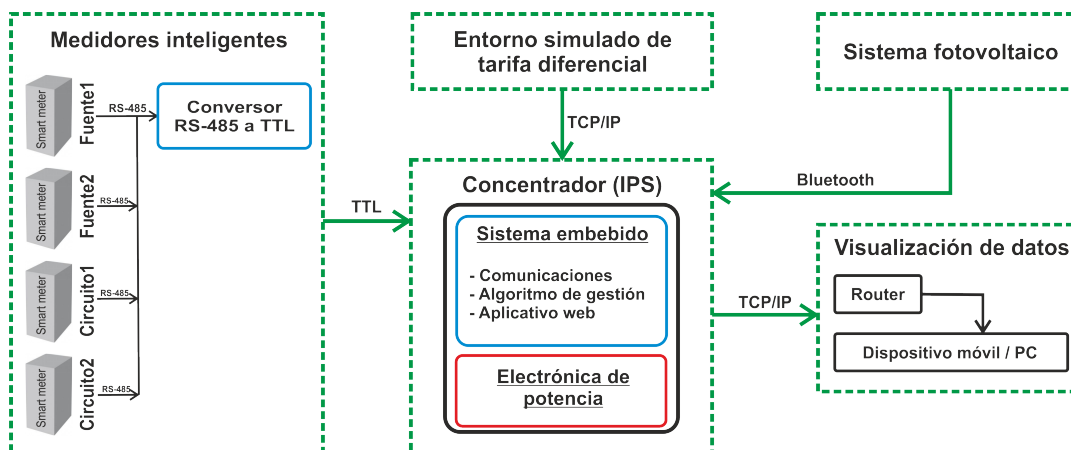
De igual forma, como lo muestra la Tabla 5.5, es importante resaltar que las pérdidas aumentan en la medida en que para realizar algún tipo de conmutación, sea necesario

utilizar más alternistores en serie, sin embargo, para el IPS de cuatro puertos, en el peor de los casos, sólo se necesitan tres alternistores en serie. Igualmente, para cargas RL se observa que la eficiencia se ve un poco afectada dependiendo del factor de potencia (FP) de la carga, sin embargo, para el caso en el que se tienen tres alternistores en serie y un FP de entre 0,8 y 0,9 se observa que el rendimiento del IPS sigue estando entre un 95 % y un 97 %. Finalmente, analizando una carga no lineal compuesto por un Triac con ángulo de disparo de 50° y una resistencia, se observa que la eficiencia continúa siendo superior al 97 %, demostrando que el IPS también tienen un adecuado funcionamiento ante cargas de este tipo.

6. Implementación del sistema

Con base en la revisión realizada de los hogares inteligentes y las HEMS, en la Figura 6.1 se presenta el sistema de gestión energética implementado.

Figura 6.1: Esquema del sistema implementado.



A continuación, se describe cada uno de los componentes:

6.1. Conmutador inteligente de potencia

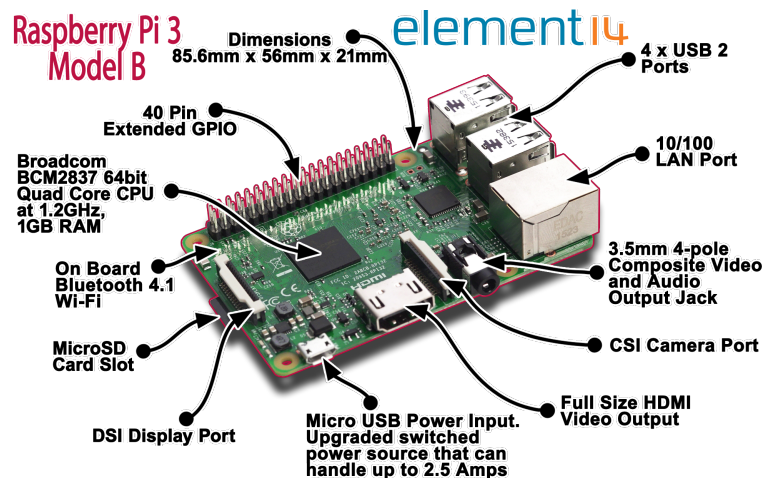
6.1.1. Sistema embebido

El sistema embebido utilizado para realizar la función de concentrador fue la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 3 (Figure 6.2). Este sistema fue seleccionado debido a que sus características hardware y software satisfacen las necesidades del proyecto y están por encima de la mayoría de sistemas de desarrollo existentes en el mercado, además es de fácil adquisición debido a su bajo costo económico. La Raspberry Pi 3 es utilizada con el sistema operativo Raspbian y para los diferentes códigos fue utilizado el lenguaje de programación Python.

Dentro de las características más importantes para resaltar de la Raspberry es su procesador ARM Cortex A53 de cuatro núcleos que trabaja a 1,2GHz y es de 64 bits.

Adicionalmente, está dotado con conectividad Bluetooth 4.1 (de bajo consumo) y Wifi 802.11n integrado. Igualmente, en la Figura 6.2 se pueden observar los otros puertos y funcionalidades con la que cuenta la tarjeta.

Figura 6.2: Sistema de desarrollo Raspberry Pi 3.

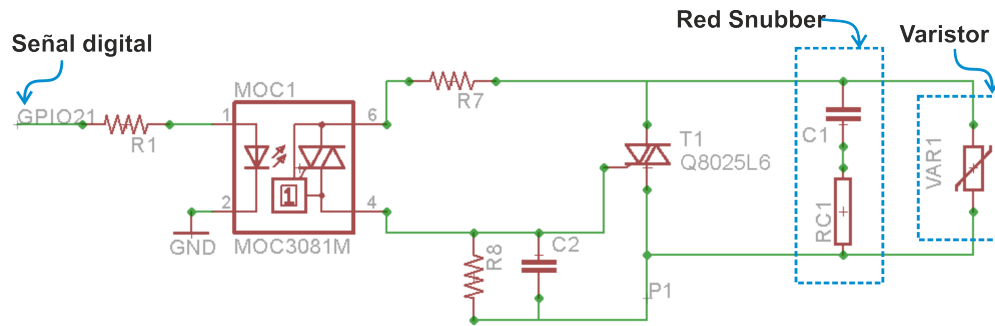


Fuente: Element 14 Community, "Raspberry Pi 3 Model B Technical Specifications", [En línea]. Consultado el 15/12/2016. Disponible en: <https://www.element14.com/community/docs/DOC-80899/l/raspberry-pi-3-model-b-technical-specifications>

6.1.2. Electrónica de potencia

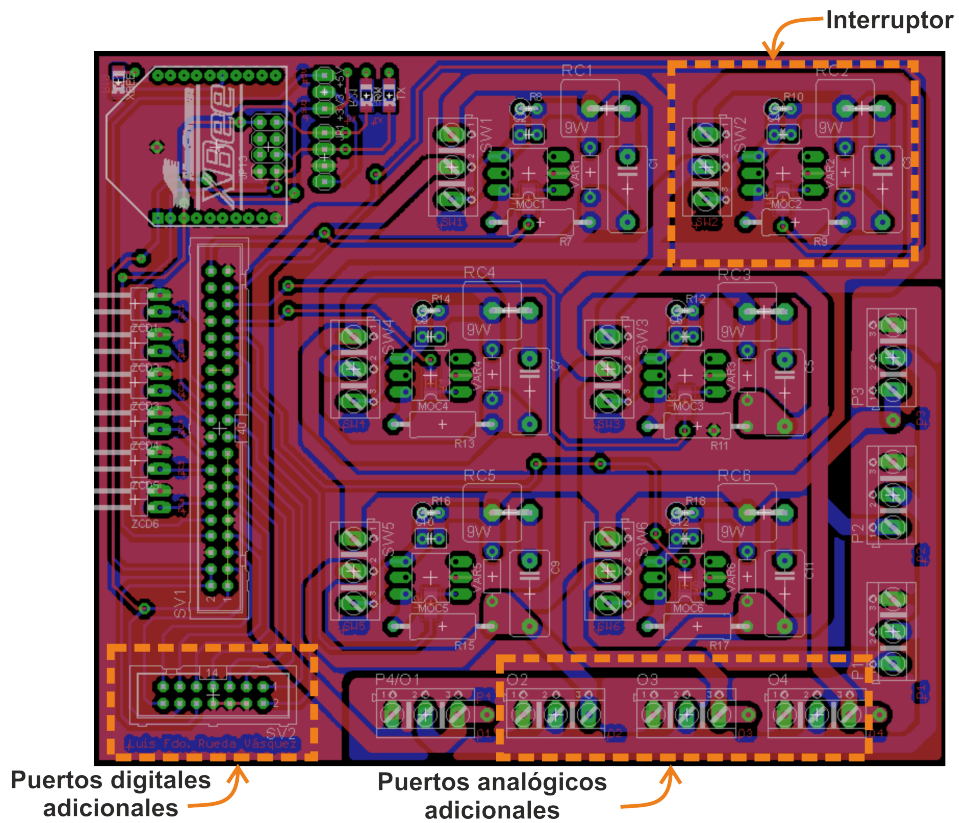
La etapa de electrónica de potencia fue desarrollada en el software CadSoft EAGLE, utilizando las referencias Q8025L6 y MOC3081M. En la Figura 6.3 se puede observar el esquemático utilizado para cada uno de los interruptores del IPS. Evidenciando la presencia de una red snubber y un varistor que fueron agregados al diseño en caso de ser requeridos como elementos de protección, sin embargo, estos no fueron utilizados en los experimentos debido a que no fue necesario.

Figura 6.3: Esquemático utilizado para la implementación de cada uno de los interruptores del IPS.



A partir de esto, el circuito impreso resultante es el presentado en la Figura 6.4, el cual tiene unas dimensiones de 131 mm x 110 mm y cuenta con algunos conectores adicionales que permiten aumentar la cantidad de puertos al IPS, en caso de ser requerido para trabajos futuros.

Figura 6.4: Tarjeta de circuito impreso realizada en CadSoft EAGLE.



6.2. Componente de comunicaciones

6.2.1. Comunicación con los medidores

La comunicación del concentrador con los medidores DDS-1Y de la empresa *Zhejiang Yong Tailong Electronic Company* se realiza por medio de los protocolos de comunicación RS-485 (utilizado por los medidores) y TTL (protocolo serial utilizado por la Raspberry Pi 3). De esta forma es posible adquirir la información que los medidores pueden proporcionar (Tabla 6.1).

Tabla 6.1: Información proporcionada por los medidores inteligentes.

Información	Abreviatura	Unidades
Potencia activa	PAI	kW
Potencia reactiva	PRI	kVAR
Potencia activa acumulada	PA	kWh
Potencia reactiva acumulada	PR	kVARh
Tensión	V	V
Corriente	C	A
Frecuencia	F	Hz
Factor de potencia	FP	-
Relé	R	-
Fecha	FEC	-
Identificación	ID	-

Cabe resaltar que el ítem identificador (ID) del medidor hace referencia a la dirección Modbus asignada a cada medidor y Relé se refiere al estado (*On/Off*) del relé interno con el que cuentan los medidores.

Después de tener la información proporcionada por los medidores, es necesario organizarla, esto con el fin de tener las medidas en el orden que se guardan en la base de datos (Tabla 6.2). La lectura de los medidores es realizada cada 10 minutos, y a partir de los valores leídos, se crea un archivo .CSV que es enviado a la base de datos cada hora, dejando un *backup* en la memoria interna de la Raspberry en caso de que pueda ocurrir un fallo con la base de datos.

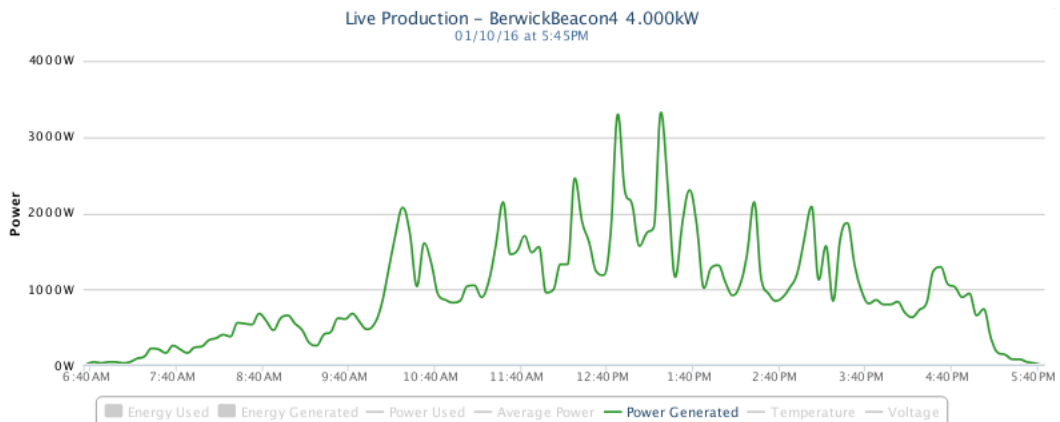
Tabla 6.2: Estructura de la trama de datos.

PA	PR	PAI	PRI	V	I	FP	F	R	FEC	ID
----	----	-----	-----	---	---	----	---	---	-----	----

6.2.2. Comunicación con el inversor

La comunicación con el inversor es realizada a través de *Bluetooth*, sin embargo, debido a que no fue posible contar con un sistema fotovoltaico real, este es emulado utilizando la fase B de un sistema trifásico y un computador portátil para enviar el valor de potencia generada cada 5 minutos, lo cual se realiza de acuerdo con un patrón de generación (Figura 6.5) que ha sido descargado de [57]. El sistema fotovoltaico seleccionado para emular el funcionamiento de la fuente de energía renovable se encuentra ubicado en Sídney, Australia y tiene la capacidad de generar hasta 4000 W, para lo cual utiliza 16 paneles de 250 W (marca Sun Earth) y un inversor SMA4000TL.

Figura 6.5: Patrón de generación utilizado para emular el sistema fotovoltaico y la generación de una fuente de energía renovable.



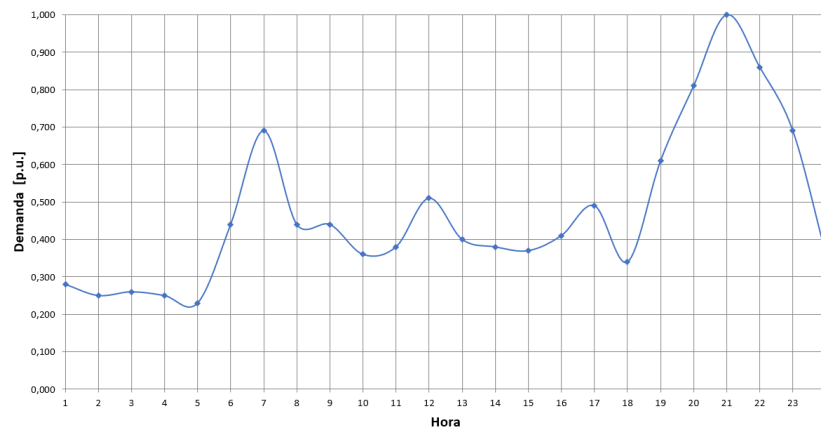
Fuente: PVOutput, "Live Production - BerwickBeacon4 4000W", [En línea]. Consultado el 28/10/2016. Disponible en: <http://pvoutput.org>

La lectura de la potencia generada es realizada cada 5 minutos, almacenando esta información en un archivo .CSV que es enviado a la base de datos cada hora, dejando un *backup* en la memoria interna de la Raspberry en caso de que pueda ocurrir un fallo con la base de datos.

6.2.3. Entorno de tarifa diferencial

El entorno de tarifa diferencial es emulado, para lo cual, se hace uso del módulo Wifi NodeMCU (programado en LUA), el cual es muy utilizada en aplicaciones del Internet de las Cosas (*Internet of Things - IoT*). De esta forma, el módulo es programado para generar el precio del kWh, de acuerdo con tres rangos de precios que fueron asignados a cada una de las horas, tomando como base para esto la curva de demanda promedio de un usuario estrato 4 presentada por la electrificadora de santander (Figura 6.6).

Figura 6.6: Curva típica de consumo de un usuario promedio estrato 4.



Fuente: Electrificadora de Santander, "Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución".

A partir de esto, en la Tabla 6.3 se presentan el valor del kWh para cada hora del día.

Tabla 6.3: Valor de la tarifa diferencial.

Tarifa diferencial		Horarios
Tipo	Rango de precio (pesos)	
Bajo	235 - 265	1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 23 - 24
Medio	310 - 330	9 - 10 - 11 - 15 - 16 - 17 - 22
Alto	405 - 415	6 - 7 - 8 - 12 - 13 - 14 - 18 - 19 - 20 - 21

Debido a que el valor del kWh sólo cambia cada hora del día, este valor es almacenado en un archivo .CSV y posteriormente enviado a la base de datos 1 minuto antes de que se reciba el nuevo precio de la energía, dejando un *backup* en la memoria interna de la Raspberry en caso de que pueda ocurrir un fallo con la base de datos.

6.3. Algoritmo de gestión

El algoritmo implementado es un control basado en reglas por medio del cual se busca darle prioridad al uso de la fuente de energía renovable. Para la toma de decisiones, es necesario contar con los valores instantáneos de potencia de las cargas, el valor de la tarifa diferencial, la potencia generada por el sistema fotovoltaico (PV) y el ángulo de desfase entre las fuentes, ya que, de no estar sincronizadas, no es posible realizar algunos tipos de conexión. Sin embargo, el valor de desfase debe ser ingresado manualmente antes de ejecutar el código.

La Figura 6.7 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado en Python y la Tabla 6.4 describe las posibles conexiones a realizar en el IPS.

Tabla 6.4: Listado de las conmutaciones que es posible realizar con el IPS.

Nombre	Descripción
Opción 1	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 3 y el Puerto 4
Opción 2	Conexión del Puerto 2 con el Puerto 3 y el Puerto 4
Opción 3	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 3 y del Puerto 2 con el Puerto 4
Opción 4	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 4 y del Puerto 2 con el Puerto 3
Opción 5	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 2
Opción 6	Conexión del Puerto 1 y el Puerto 2 con el Puerto 3
Opción 7	Conexión del Puerto 1 y el Puerto 2 con el Puerto 4
Opción 8	Conexión del Puerto 1 y el Puerto 2 con el Puerto 3 y el Puerto 4
Opción 9	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 3
Opción 10	Conexión del Puerto 2 con el Puerto 4
Opción 11	Conexión del Puerto 1 con el Puerto 4
Opción 12	Conexión del Puerto 2 con el Puerto 3

6.4. Aplicativo web desarrollado

El aplicativo web desarrollado permite al usuario monitorizar el funcionamiento del sistema, teniendo a la mano información del consumo de potencia global y por circuito, generación, tarifa diferencial, la conexión entre las fuentes y las cargas en el IPS y cuenta con un módulo de tiempo real, que permite observar el consumo de potencia de las cargas o la potencia entregada por las fuentes, actualizando los valores cada segundo.

Figura 6.7: Algoritmo de control utilizado para las conmutaciones del IPS.



Es importante aclarar que actualmente el aplicativo se encuentra almacenado en la Raspberry Pi 3, debido a esto su acceso sólo es posible realizarlo a través de la red de internet local en donde se encuentre conectado el sistema.

El aplicativo web se divide en dos componentes, la base de datos y el entorno gráfico.

6.4.1. Base de datos

Para la creación, edición y manipulación de la base de datos se utiliza el sistema de gestión de bases de datos MySQL, el cual es de uso libre y cuenta con la capacidad de almacenamiento suficiente para el proyecto. Adicionalmente, el lenguaje de programación PHP es utilizado para realizar las consultas y el envío de información a la base de datos.

Dentro de la estructura de la base de datos se encuentran cinco tablas (Figure 6.8), por medio de las cuales se realiza el manejo y administración de la información. En la Tabla 6.5 se describe la funcionalidad de cada una de estas y la periodicidad con la que cada una es actualizada.

Figura 6.8: Tablas utilizadas para organizar la información en la base de datos.

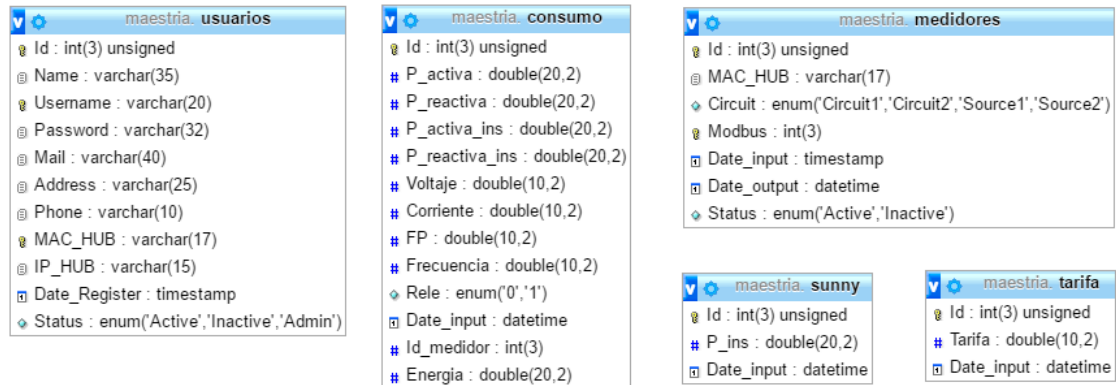
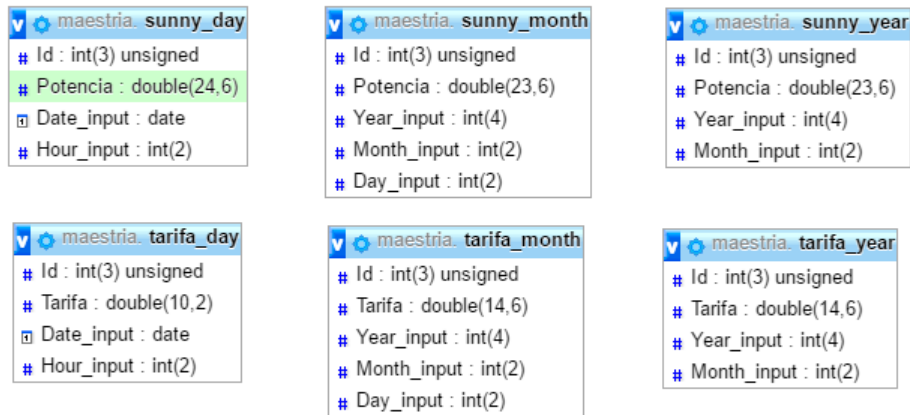


Tabla 6.5: Funcionalidad de las tablas que componen la base de datos.

Nombre	Descripción	Actualización
Usuarios	Almacena la información de registro de cada uno de los usuarios	Registro de un nuevo usuario
Consumo	Contiene los valores obtenidos de cada uno de los medidores	Cada hora
Medidores	Listado de los medidores activos e inactivos dentro del sistema	Cada novedad de ingreso o cambio de un medidor
Sunny	Guarda los valores de potencia generados por el sistema fotovoltaico (PV)	Cada hora
Tarifa	Contiene el valor del kWh para cada hora	Cada hora

De igual forma, dentro de sistema de gestión de bases de datos, es posible hacer uso de las vistas, las cuales son consultas a la base de datos que se realizan de forma automática y que presentan sus resultados en forma de tablas. En la Figura 6.9 se presentan las vistas utilizadas para la administración de la información y para realizar las consultas de forma más sencilla y rápida.

Figura 6.9: Vistas utilizadas en el aplicativo web.



En la Tabla 6.6 se describe la funcionalidad de cada una de las vistas. Mostrando la ventaja que cada una de éstas proporciona al momento de organizar y visualizar la información obtenida del entorno de tarifa diferencial y el inversor. Permitiendo discriminar los datos por día, mes y año, brindando mayor claridad a los usuarios sobre del funcionamiento del sistema.

Tabla 6.6: Funcionalidad de las vistas que componen la base de datos.

Nombre	Descripción
Sunny_day	Permite discriminar por día los valores de generación del sistema PV
Sunny_month	Organiza los valores de generación del sistema PV de acuerdo con el mes requerido
Sunny_year	Permite discriminar por año los valores de generación del sistema PV
Tarifa_day	Organiza los valores de tarifa diferencial de acuerdo con el día de interés
Tarifa_month	Permite filtrar los valores de tarifa diferencial de acuerdo con el mes que se quiera observar
Tarifa_year	Discrimina los valores de tarifa diferencial de acuerdo con el año que se desea analizar

Figura 6.11: Pantalla inicial del perfil del usuario.



Consumo

En esta pestaña es posible ver la información obtenida de la sub-medición por circuito (Figura 6.12), para esto se debe seleccionar el medidor y la variable de interés.

Figura 6.12: Información de consumo por circuito.



El consumo de potencia es posible observarlo por día, mes o año (Figura 6.13).

Figura 6.13: Visualización del consumo de potencia por día.



Generación

Esta opción permite analizar la potencia promedio generada por el sistema PV cada hora del día, al igual que es posible observar la potencia por mes y año (Figura 6.14).

Figura 6.14: Potencia generada por el sistema fotovoltaico durante un día.



Tarifa diferencial

En esta ventana se puede observar el comportamiento del precio de la energía durante un día, además de conocer el promedio por día, mes y año (Figura 6.15).

Figura 6.15: Comportamiento del precio del kWh durante parte del día.



IPS

Esta opción muestra la forma en que el IPS tiene conectado sus puertos, mostrando una sencilla animación que simula el sentido en el que circula la corriente (Figura 6.16).

Figura 6.16: Topología de conexión de los puestos del IPS.



Tiempo real

Finalmente, la pestaña de tiempo real es una opción que muestra el consumo de potencia activa en intervalos de un segundo (Figura 6.17), permitiendo observar cambios al momento de la conexión o desconexión de alguna carga y la forma en que estas se comportan.

Figura 6.17: Visualización del consumo de potencia activa en intervalos de un segundo, ante la conexión de una plancha.

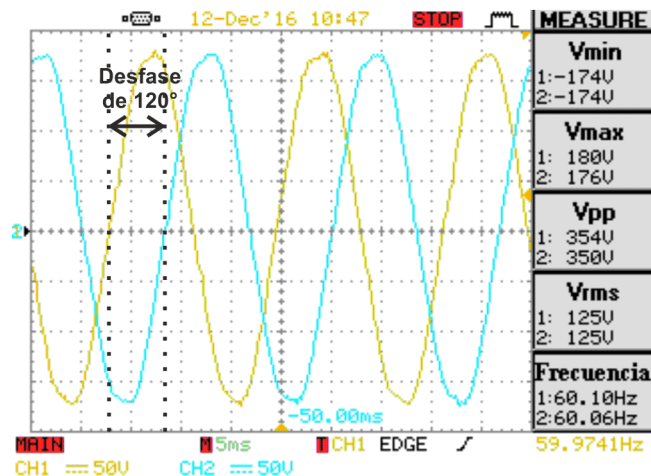


7. Experimentos y resultados

Después de realizada la implementación del sistema, se precede con la fase de experimentación. Para esto se estudian cuatro escenarios de conexión que permiten evidenciar el funcionamiento del sistema propuesto y verificar que los resultados de simulación fueron adecuados. De esta manera, se analiza el comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas, teniendo como referencia el patrón de conmutación utilizado para cada una de las pruebas.

Para la realización de los experimentos son utilizadas dos fuentes de tensión de 120V RMS, 60Hz desfasadas 120° entre sí (Figura 7.1), y dos cargas, la primera es una carga RL compuesta por un bombillo halógeno con un consumo de potencia de 70 W y un ventilador con consumo de potencia nominal de 20 W. La segunda es una carga resistiva (bombillo halógeno) con un consumo de potencia de 70 W. Adicionalmente, es importante aclarar que las señales de corriente medidas están amplificadas por un valor de cinco, lo cual se debe tener en cuenta para el análisis realizado.

Figura 7.1: Desfase de 120° entre las tensiones de las dos fuentes de energía utilizadas como entradas del IPS.



A continuación, se presentan los escenarios de conmutación estudiados.

7.1. Intercambio en la fuente de alimentación de las cargas

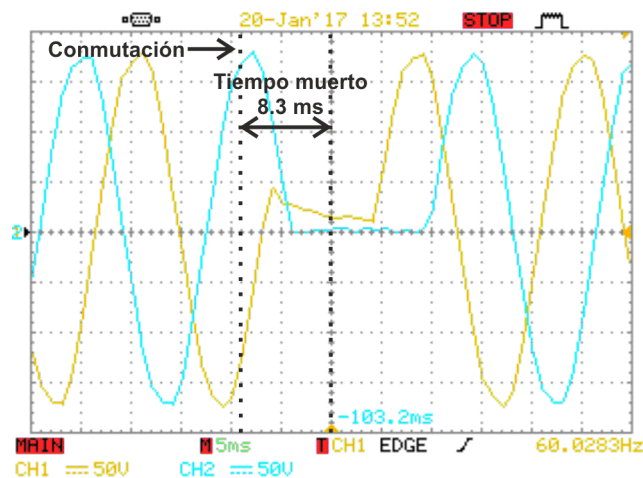
En la Tabla 7.1 se muestra el patrón de conexión utilizado para este experimento, evidenciando que se realiza un intercambio en la fuente de alimentación de las cargas.

Tabla 7.1: Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.2 y 7.3.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 2	Carga 1

De acuerdo con la Tabla 7.1 y la Figura 7.2, se observa que antes de la señal de conmutación, la Carga 1 está siendo alimentada por la Fuente 1 (onda amarilla=tensión en la Carga 1) y la Carga 2 está conectada con la Fuente 2 (onda azul=tensión en la Carga 2). Posteriormente, se muestra que durante el tiempo muerto implementado, ocurre la apertura de los alternistores y después de finalizado el tiempo de espera, se realiza nuevamente la reconexión de la Carga 1 con la Fuente 2 y la Carga2 con la Fuente 1.

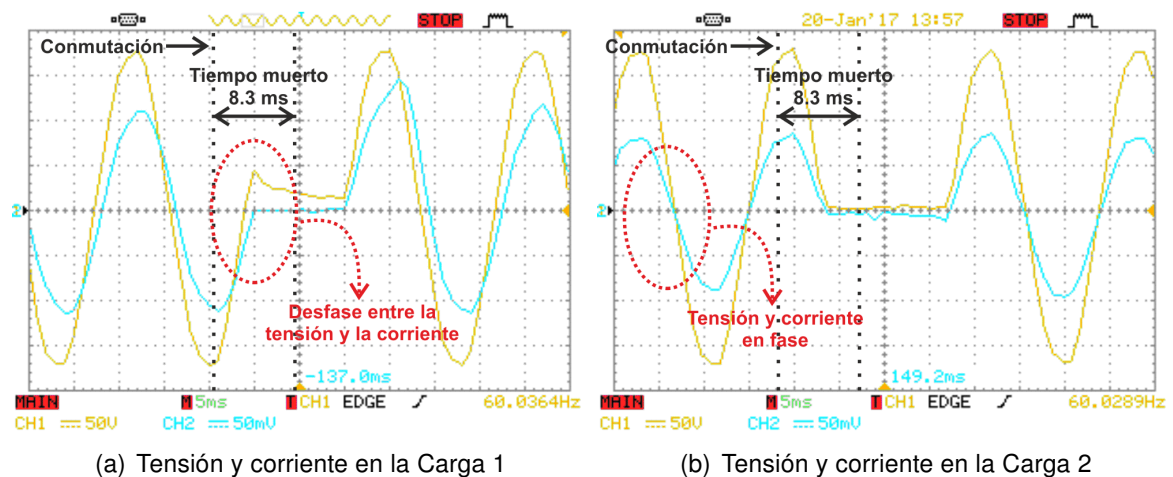
Figura 7.2: Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.1



En la Figura 7.3a se observa que después de dar la señal de conmutación, la apertura de los alternistores se realiza en el cruce por cero de la señal de corriente, sin

embargo, debido a que es una carga es RL, existe un ángulo de desfase entre la tensión y la corriente. Lo cual se ve reflejado al momento de la apertura de los alternistores, ya que aunque la corriente es igual a cero (0A), la tensión tiene un valor de aproximadamente 50V. Igualmente, a raíz de la componente inductiva de la carga, después de la desconexión de los interruptores se evidencia el proceso de descarga de la bobina.

Figura 7.3: Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.1. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=74,4mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=127V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=62mA$).



Por el contrario, en la Figura 7.3b se puede apreciar que debido a que la Carga 2 es netamente resistiva, la corriente y la tensión se encuentran en fase. Por tal motivo, para este caso se muestra que la desconexión de los interruptores ocurre tanto en el cruce por cero de la señal de corriente como en el cruce por cero de la señal de tensión.

Debido a esto, se evidencia que al tener presencia de cargas RL, es importante dar un tiempo de espera de por lo menos medio ciclo de onda, con el fin de que los interruptores del IPS se puedan desconectar de forma natural, teniendo la certeza de que al momento de dar la señal de reconexión todos los interruptores se encuentran abiertos y no existe riesgo de un corto circuito entre las dos fuentes.

7.2. Cargas alimentadas por fuentes independientes a cargas alimentadas simultáneamente por la misma fuente

En la Tabla 7.2 se muestra el patrón de conexión utilizado para este experimento, permitiendo observar que antes de la conmutación cada una de las cargas es alimentada por fuentes independientes y después de la conmutación las dos cargas pasan a ser alimentadas de forma simultánea por una sola fuente.

Tabla 7.2: Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.4 y 7.5.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1	Carga 2
Después	Carga 1 y Carga 2	–

Para este experimento, en la Figura 7.4 se muestra que después de la señal de conmutación, la Fuente 2 sale de operación, quedando ambas cargas conectadas a la Fuente 1. Este escenario de conexión es un caso que se puede dar en la práctica cuando una de las fuentes presenta una falla o un mantenimiento; siendo necesario alimentar las cargas con otra fuente de energía (si las otras fuentes cuentan con capacidad suficiente para cubrir la demanda de las cargas), permitiendo que el sistema siga operando de forma normal.

En caso de que una sola fuente no pueda suministrar la potencia suficiente para todo el sistema, se le puede dar prioridad a las cargas más importantes o delicadas.

De igual forma, en la Figura 7.5a y la Figura 7.5b se puede apreciar que después de la conmutación, la tensión de las dos cargas quedan en fase, sin embargo, para la Carga 2, se puede ver que debido al tiempo muerto utilizado, la corriente y la tensión presentan una desconexión de corta duración (valor de tensión y corriente en cero) y además, las señales quedan con dos semi-ciclos positivos seguidos, lo cual se ve reflejado en un parpadeo momentáneo en los bombillos y una disminución temporal de la velocidad del ventilador.

Figura 7.4: Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.2

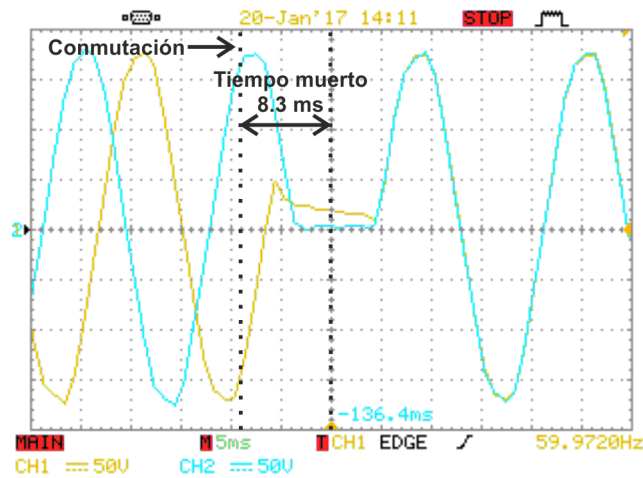
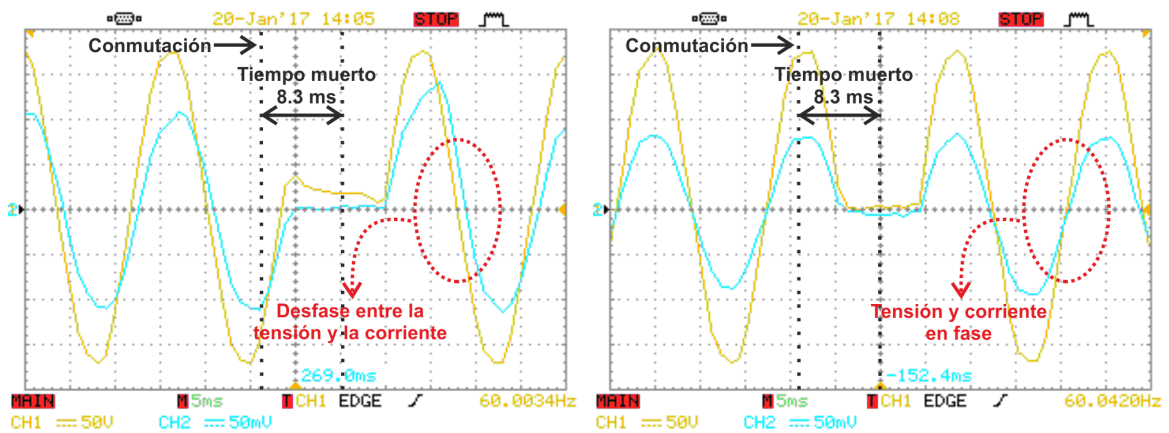


Figura 7.5: Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.2. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=124V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=79,7mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=118V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=55,2mA$)



(a) Tensión y corriente en la Carga 1

(b) Tensión y corriente en la Carga 2

En este caso de estudio se evidencia nuevamente la importancia del tiempo de espera entre la señal de desconexión y conexión de los atornilladores, ya que debido al desfase de las fuentes y a la presencia de cargas inductivas, ante una conexión inadecuada de los interruptores se pueden producir corrientes elevadas o daños en los equipos.

7.3. Cambio en la fuente de alimentación de las cargas

Para este escenario de conexión es utilizado el patrón mostrado en la Tabla 7.3, permitiendo observar que antes de la conmutación las dos cargas son alimentadas de forma simultánea por la Fuente 1 y después de la conmutación las dos cargas pasan a ser alimentadas de forma simultánea por la Fuente 2 (Figura 7.6).

Tabla 7.3: Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.6 y 7.7.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	Carga 1 y Carga 2	–
Después	–	Carga 1 y Carga 2

Con este caso de estudio se pretende mostrar la flexibilidad y las funcionalidades del sistema para responder ante diferentes condiciones de operación. El intercambio de las cargas de la fuente uno a la fuente dos es un escenario que en la práctica se puede dar cuando por ejemplo se quiere migrar cargas de una fuente convencional a otra de características renovables (sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, vehículo eléctrico, etc.), con el fin de buscar un ahorro económico.

De igual forma, esta topología de conexión también permite el caso en que dos fuentes de energía sincronizadas sean conectadas entre sí, pudiéndose presentar el escenario analizado en el numeral 5.2.2, en dónde una de las fuentes tiene suficiente potencia para satisfacer la demanda de las cargas y además inyectar la energía sobrante a la red; o por el contrario, las fuentes se repartan el suministro de energía, de acuerdo con sus capacidades y a lo solicitado por las cargas.

En la Figura 7.6 se observa nuevamente que la tensión en las cargas presenta una desconexión momentánea y adicionalmente, quedan con dos semi-ciclos negativos seguidos, lo cual es un efecto no deseado producto de la conmutación. Debido a esto, es necesario continuar con la investigación, de manera que sea posible corregir estas perturbaciones.

Figura 7.6: Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.3.

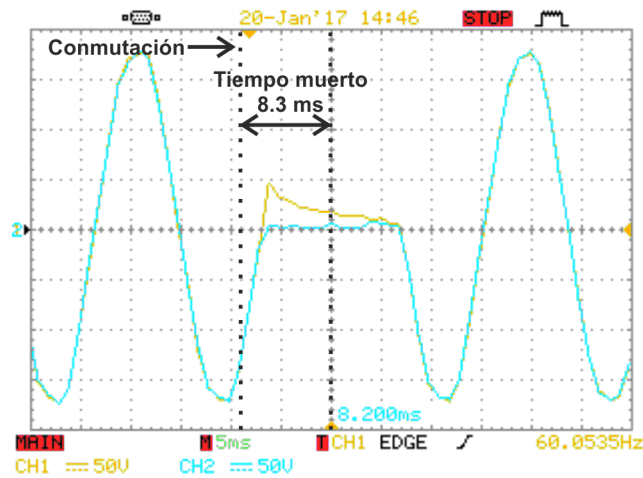
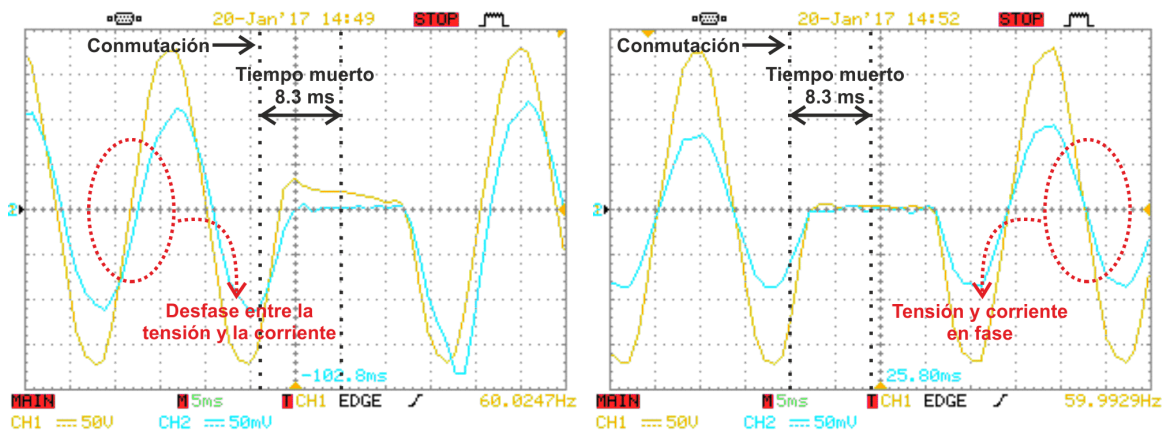


Figura 7.7: Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.3. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=130V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=79mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=124V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=61,1mA$).



(a) Tensión y corriente en la Carga 1

(b) Tensión y corriente en la Carga 2

Igualmente, la Figura 7.7a muestra que para la Carga 1 se mantiene el desfase entre la corriente y la tensión, y el mismo comportamiento de descarga de la bobina durante el tiempo muerto de la conmutación. Así mismo, en la Figura 7.7b se evidencia que para la Carga 2, la corriente y la tensión se mantienen en fase y por tanto la desconexión y

conexión de los alternistores se produce en el cruce por cero de las señales de corriente y tensión.

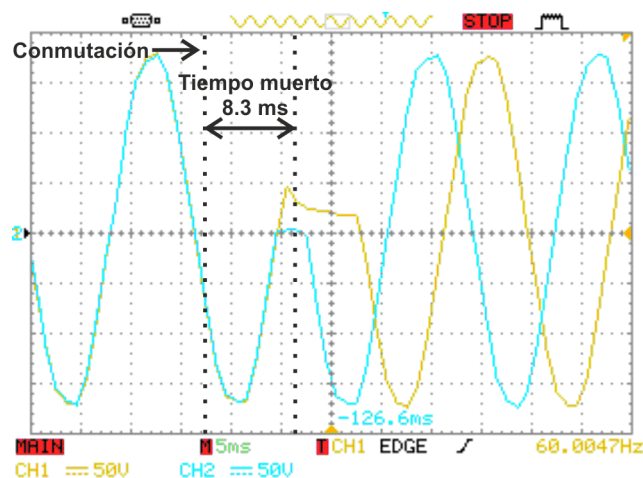
7.4. Cargas alimentadas simultáneamente por la misma fuente a cargas alimentadas por fuentes independientes

El patrón de conexión utilizado para este caso de estudio es presentado en la Tabla 7.4, en la cual se muestra que antes de la conmutación, las cargas son alimentadas de forma simultanea por la Fuente 1 y después de la conmutación, cada una de las cargas pasa a ser alimentada por una fuente independiente (Figura 7.8).

Tabla 7.4: Conmutación de cargas para el experimento de las Figuras 7.8 y 7.9.

Etapa de la conmutación	Fuente	
	1	2
Antes	–	Carga 1 y Carga 2
Después	Carga 1	Carga 2

Figura 7.8: Comportamiento de la tensión en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.4.

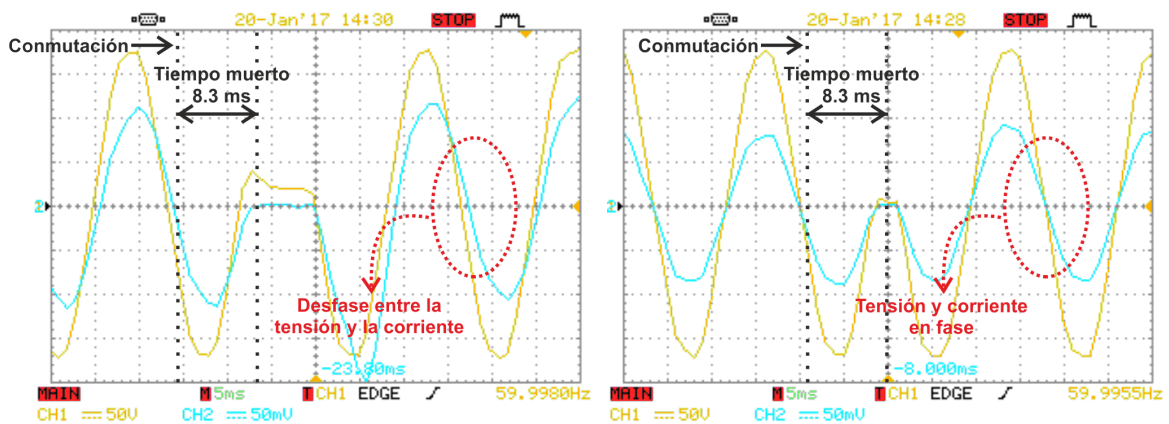


Este escenario de conexión se puede presentar en la práctica si una de las fuentes no está en capacidad de suministrar la totalidad de la potencia requerida por las cargas;

para lo cual, es posible migrar parte del exceso de carga a una segunda fuente con capacidad de suministro disponible.

Al igual que en los casos de estudio anteriores, la Figura 7.9a muestra el comportamiento de la tensión y la corriente de la carga RL y la Figura 7.9b presenta el comportamiento de la Carga R, observando que en ambos casos, el tiempo muerto de la conmutación deja como resultado que dos semi-ciclos negativos queden seguidos. Además, es importante resaltar que cuando las cargas son netamente resistivas, los cambios de tensión en las cargas son más suaves que cuando la carga tiene componente inductivo, debido a que en esta última, con el desfase entre la corriente y la tensión, se presentan pequeños picos de tensión y variaciones durante el tiempo de descarga de la bobina.

Figura 7.9: Comportamiento de la tensión y la corriente en las cargas al realizar la conmutación descrita en la Tabla 7.4. En (a) la curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 1 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 1 ($I_{rms}=75,2mA$). En (b) a curva de color amarillo muestra la tensión de la Carga 2 ($V_{rms}=125V$) y la curva de color azul la corriente de la Carga 2 ($I_{rms}=60,1mA$).



(a) Tensión y corriente en la Carga 1

(b) Tensión y corriente en la Carga 2

De esta forma, como se puede observar en todos los casos estudiados, el tiempo de espera durante la conmutación es importante para evitar conexiones que puedan producir corrientes de corto circuito o daños en el sistema. Además, el uso de optoacopladores sincronizados con la red también permite que las conexiones se realicen de forma adecuada. Sin embargo, se observa que es necesario monitorizar el cruce por cero de las

señales de corriente del IPS, debido a que cuando se utilizan cargas que no son netamente resistivas, la señal de tensión no se encuentra en fase con la corriente, lo cual hace que el tiempo muerto requerido pueda variar (aumentar o disminuir) dependiendo del factor de potencia de la carga.

Así mismo, se observan variaciones en el funcionamiento de las cargas, debido a las desconexiones momentáneas y a los casos en los que como resultado de la utilización del tiempo muerto, las señales de tensión y corriente quedan dos semi-ciclos positivos o negativos seguidos. Por tal motivo, se debe continuar con la investigación, con el objetivo de corregir estas perturbaciones y mejorar el desempeño del IPS.

7.5. Análisis de eficiencia

Finalmente, con el fin de verificar el rendimiento del IPS, se realiza el análisis de la eficiencia del dispositivo, para lo cual se utilizan los medidores inteligentes para realizar la medida de la potencia suministrada por la fuente y la consumida en la carga. Es importante resaltar que los medidores son clase 1, permitiendo tomar lecturas de potencia activa instantánea con 5 dígitos enteros y dos decimales, es decir, con una resolución de 0,01kW.

En la Tabla 7.5 se muestran las cargas utilizadas, su consumo de potencia y la eficiencia obtenida.

Tabla 7.5: Análisis de eficiencia del IPS.

# Triacs en serie	Carga	Consumo	Eficiencia
1	Resistencia 2.2k	5W	99.21 %
1	Bombillo halógeno	70W	99.36 %
1	Plancha	1200W	97.45 %
1	Cargador de PC	47W	100 %
1	Lámpara led	12W	100 %
1	Bombillo led	5W	100 %

Los resultados presentados en la Tabla 7.5 permiten ratificar lo analizado por medio de simulación, mostrando que el IPS presenta un rendimiento adecuado para cargas

residenciales lineales de bajo (5W) y alto (1200W) consumo de potencia, evidenciando que las pérdidas en los alternistores son bajas. Por otra parte, para cargas no lineales, la lectura de los medidores no permite discriminar las pérdidas en el IPS, debido a que la resolución con la que cuentan los medidores no hace posible registrar diferencias en la potencia suministrada por la fuente y la consumida por la carga. Sin embargo, el funcionamiento del sistema sigue siendo adecuado para cargas residenciales no lineales como bombillos led o cargadores de PC.

7.6. Especificaciones técnicas del IPS

Adicionalmente, en la Tabla 7.6 se describen algunas de las especificaciones técnicas más importantes del sistema embebido y de la etapa de potencia del prototipo desarrollado.

Tabla 7.6: Especificaciones técnicas del prototipo.

Característica	Valor
Sistema embebido	
Fuente de alimentación	5V vía Micro USB
Consumo de energía	800mA (4,0W)
Conectividad de red	10/100 Ethernet (RJ-45), Wifi 802.11n, Bluetooth 4.1 (alcance máximo 30m)
Sistema operativo	GNU/Linux: Debian (Raspbian)
Etapas de potencia	
Tensión	110V / 60Hz
Corriente	Máximo 12A para cada una de las topologías de conexión
Potencia	Máximo 1500W para cada una de las topologías de conexión
Eficiencia	Superior al 95 %

8. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de investigación presenta el conmutador inteligente de potencia y la sub-medición por circuito como herramientas para la gestión energética en un hogar inteligente. Para esto se analiza el comportamiento de la tensión y la corriente de las fuentes y las cargas conectadas al IPS ante diferentes escenarios de operación. Debido al desfase de las fuentes de energía y al factor de potencia de las cargas, se evidencia la presencia de corrientes de cortocircuito producto de conexiones equivocadas entre puertos. Para solucionar este inconveniente, se utilizaron optoacopladores con cruce por cero y adicionalmente, fue utilizado un tiempo muerto entre la desconexión y reconexión de los alternistores del IPS.

Los resultados experimentales muestran que el uso de un tiempo de espera de medio ciclo de onda del periodo de la red permite que los alternistores tengan una desconexión (apertura) natural, lo cual es posible debido que durante el tiempo muerto la corriente cruza por cero. De la misma manera, es importante resaltar que, al momento de utilizar cargas inductivas, las señales de corriente y tensión se encuentran en desfase, haciendo que el tiempo de desconexión puede cambiar dependiendo de su factor de potencia.

De igual manera, se pudo verificar por medio de experimentación, que la desconexión momentánea de las cargas durante la conmutación produce variaciones en el funcionamiento de los electrodomésticos. Por ejemplo, para un bombillo halógeno de 70W, se observa un parpadeo en la iluminación, y para un ventilador de 20W, se alcanza a percibir una disminución de corta duración en su velocidad de giro. Igualmente, ante la presencia de cargas no lineales como un bombillo led de 5W, una lámpara led de 12W o un cargador de PC el funcionamiento del IPS continúa siendo adecuado, permitiendo que las cargas siguen funcionando de forma normal.

Por otra parte, los resultados experimentales y de simulación permiten verificar que la eficiencia del IPS es mayor al 95%. Lo cual es adecuado y garantiza que el dispositivo puede operar satisfactoriamente para cargas residenciales tanto de bajo como alto

consumo de potencia.

La sub-medición de energía eléctrica por circuito ramal es un componente importante del sistema de gestión que permite brindar información adicional a los usuarios en busca de mejorar hábitos de consumo y lograr una adecuada gestión energética. A partir de esto, se desarrolla un aplicativo web que permite que el usuario tenga conocimiento del funcionamiento del sistema de forma remota, brindándole una herramienta intuitiva y amigable que le puede ayudar a lograr un uso más eficiente de la energía. De igual forma, es necesario continuar con el desarrollo y la realización de mejoras al aplicativo web, con el fin de poder brindar al usuario mayor información acerca del funcionamiento del sistema, así como permitir mayor cobertura, de tal manera que se pueda tener acceso a la información del hogar desde cualquier lugar en que se encuentre.

La integración del conmutador inteligente de potencia en un hogar inteligente permite administrar los recursos energéticos de la vivienda y controlar el flujo de energía entre las diferentes fuentes y cada uno de las cargas, con el fin de reducir y optimizar el consumo de potencia, así como disminuir la compra de energía a la red pública. De esta manera, es posible contribuir con la reducción de la demanda de energía del país, apoyar el desarrollo de las redes inteligentes y fomentar el uso de fuentes no convencionales de energía renovable.

Por medio del uso del *Intelligent Power Switch* es posible integrar fuentes de energía renovable en el hogar y en la red de distribución comercial de forma flexible y controlada. Sin embargo, se observa la importancia de que las fuentes de energía renovables se puedan sincronizar con la red, esto con el fin de poder conectar simultáneamente dos o más fuentes para satisfacer la demanda de las cargas o para inyectar energía a la red.

De igual forma, es importante resaltar que para el desarrollo del proyecto fue necesario el uso de diferentes protocolos de comunicaciones como RS-485, Bluetooth y TCP/IP, además de la utilización de diferentes sistemas de desarrollo y lenguajes de programación (Pytho, Lua, Java Script, PHP) que permiten realizar aplicaciones de forma rápida y a bajo costo. Así mismo, se logra la realización de un prototipo integrable a un entorno del Internet de las Cosas (IoT), además del desarrollo de un aplicativo web, como

herramienta de realimentación para el usuario.

Colombia ha realizado avances significativos en el contexto legal, normativo y reglamentario para la integración de las redes inteligentes en el sistema eléctrico nacional. Fomentando la investigación en temáticas como la gestión energética residencial y el Internet de las Cosas (*Internet of Things - IoT*), permitiendo el desarrollo y la mejora del sistema energético. Adicionalmente, el progreso en esta temática es importante, ya que abre la puerta a diversos escenarios como la integración de la tarifa diferencial, la generación distribuida, la gestión de la demanda y en general, fomenta la gestión y el uso racional y eficiente de la energía eléctrica.

Como parte de los resultados de este trabajo de investigación se tiene la presentación de un artículo en el *2016 IEEE Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2016)*, la presentación de un póster en las Cuartas Jornadas Iberoamericanas de Generación Distribuida y Microredes Eléctricas Inteligentes (RIGMEI 2016), la presentación de un artículo en la revista UIS Ingenierías (artículo en etapa de revisión), la co-dirección de un proyecto de pregrado que ya fue finalizado (artículo en etapa de revisión en la revista INGE CUC) y la co-dirección de tres proyectos de pregrado que actualmente se encuentran en etapa de desarrollo.

Como trabajo futuro se sugiere identificar alternativas que permitan disminuir el tiempo muerto en las conmutaciones, analizando casos en los que no sea necesaria la desconexión de ambas cargas o haciendo uso del factor de potencia suministrado por los medidores y la monitorización del cruce por cero de las corrientes para ajustar el tiempo muerto de acuerdo a las necesidades de cada una de las cargas y a las características de las fuentes, permitiendo mejorar el funcionamiento del sistema.

Finalmente, se propone realizar pruebas del funcionamiento del sistema en un hogar real o en entorno controlado, con el fin de poder cuantificar los efectos positivos y negativos que se pueden presentar en el funcionamiento, así como estimar las posibles reducciones en el consumo de energía y también identificar los problemas por solucionar y las mejoras que se deben realizar.

Referencias

- [1] S. S. S. R. Depuru, L. Wang, and V. Devabhaktuni, "Electricity theft: Overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft", *Energy Policy*, vol. 39, no. 2, pp. 1007–1015, Feb. 2011.
- [2] K. Ehrhardt-martinez, J. A. S. Laitner, and K. A. Donnelly, "Beyond the Meter: Enabling Better Home Energy", *Energy, Sustainability and the Environment 2011*, Elsevier, pp. 273–303, 2011.
- [3] Y. Kitamori, R. Takahashi, T. Hikiyama, "Circuit Switching by Power Routers in Power Distribution Network", *IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GC-CE)*, pp.160–161, IEEE, 2013.
- [4] J. Toyoda and H. Saitoh, "Proposal of an Open-Electric-Energy-Network (OEEN) to Realize Cooperative Operations of IOU and IPP". In *Proceedings of the 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD)*, vol. 1, pp. 218–222, IEEE, 1998.
- [5] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, "Smart Grids Colombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia,"2016.
- [6] XM Expertos en mercados, "Informe de operación del SIN y administración del mercado,"2015.
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2016),"2016.
- [8] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2015),"2015.

- [9] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 142. (Julio 11 de 1994). Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
- [10] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 143. (Julio 11 de 1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, trasmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.
- [11] Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y Organización de las Naciones Unidas para Desarrollo Industrial (ONUUDI), "Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe - Caso Colombia,"2011.
- [12] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos de Uso Final de Energía (CONOCE),"2001.
- [13] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 697. (Octubre 3 de 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
- [14] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 3683. (Diciembre 19 de 2003). Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial.
- [15] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 802. (Marzo 15 de 2004). Por medio del cual se establecen algunas disposiciones para incentivar el consumo del Gas Natural Comprimido para uso Vehicular, GNCV.
- [16] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 139. (Enero 25 de 2005). Por el cual se modifican los parágrafos 2 y 3 del artículo 23 del Decreto 3683 del 19 de diciembre de 2003.

- [17] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1008. (Abril 3 de 2006).
Por el cual se adiciona el Decreto 802 de 2004.
- [18] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2501. (Julio 4 de 2007).
Por medio del cual se dictan disposiciones para promover prácticas con fines de uso racional y eficiente de energía eléctrica.
- [19] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2629. (Julio 10 de 2007). Por medio del cual se dictan disposiciones para promover el uso de biocombustibles en el país, así como medidas aplicables a los vehículos y demás artefactos a motor que utilicen combustibles para su funcionamiento.
- [20] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 3450. (Septiembre 12 de 2008). Por el cual se dictan medidas tendientes al uso racional y eficiente de la energía eléctrica.
- [21] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1135. (Marzo 31 de 2009). Por el cual se modifica el Decreto 2629 de 2007, en relación con el uso de alcoholes carburantes en el país y con las medidas aplicables a los vehículos automotores que utilicen gasolinas para su funcionamiento.
- [22] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 788. (Diciembre 27 de 2002).
Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones.
- [23] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 180919. (Junio 1 de 2010). Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto.
- [24] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1450. (Junio 16 de 2011). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.

- [25] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución 065. (Junio 25 de 2012). Por el cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional.
- [26] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1665. (Julio 16 de 2013). Por medio de la cual se aprueba el "Estatuto de la Energía Internacional de Energías Renovables (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.
- [27] COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715. (Mayo 13 de 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
- [28] COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2143. (Noviembre 4 de 2015). Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.
- [29] Comisión de Regulación de Energía y Gas. "Actualización del Código de Medida - Documento CREG-019,"2014.
- [30] COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 549. (Julio 10 de 2015). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la Parte 2, del Libro 2 del Decreto número 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.
- [31] COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1285. (Junio 12 de 2015). Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones.

- [32] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución 029. (Marzo 7 de 2016). Por la cual se define un esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía.
- [33] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución 039. (Marzo 15 de 2016). Por la cual se modifica, aclara y simplifica la Resolución CREG 029 de 2016.
- [34] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Resolución 049. (Abril 6 de 2016). Por la cual se aclaran la Resolución CREG 025 de 2016 y la Resolución CREG 029 de 2016.
- [35] International Organization for Standardization (ISO), "ISO 50001-Gestión de la energía eléctrica,"2011.
- [36] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "NTC 4052-Equipos de medición de energía eléctrica (C.A). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (clases 1 y 2),"2003.
- [37] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), "NTC 6079-Requisitos para sistemas de infraestructura de medición avanzada (AMI) en redes de distribución de energía eléctrica,"2014.
- [38] R. Lutolf, "Smart Home Concept and The Integration of Energy Meters Into a Home Based System", *Seventh International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Electricity Supply*, pp. 227–278, IET, 1992.
- [39] M. A. A. Pedrasa, S. Member, T. D. Spooner, and I. F. Macgill, "Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services", *Energy*, vol. 1, no 2, pp 134 -143, 2010.
- [40] J. Lotfi, F. Abbou, F. Mohamed and F. Abdi, "Overview of home energy management systems architectures and techniques,"*2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 1–4, IEEE, 2015.

- [41] R. H. L. Rodríguez and G. R. H. Céspedes, "Challenges of advanced metering infrastructure implementation in Colombia," *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–7, IEEE, 2011.
- [42] Z. Luhua, Y. Zhonglin, W. Sitong, Y. Ruiming, Z. Hui and Y. Qingduo, "Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on relations of Power Supply and Application in smart grid," *Proceedings in CIGRE 2011*, pp. 1–5, Sept 2010.
- [43] S. S. S. R. Depuru, L. Wang and V. Devabhaktuni, "Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 15, no. 6, pp. 2736-2742, 2011.
- [44] UtilityAMI OpenHAN Task Force Core Development Team, "UtilityAMI 2008 Home Area Network System Requirements Specification," 2008.
- [45] L. Acero and C. Fonseca, "Análisis de las alternativas tecnológicas del medidor y transferencia inteligente y su compatibilidad para la integración en una red inteligente residencial," 2013.
- [46] M. Ortiz-Rangel, L. Rueda-Vasquez, C. Duarte-Gualdron, J. Petit and G. Ordóñez-Plata, "Towards a smart city: Design of a domestic smart grid," *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES*, pp. 863–868, IEEE, 2015.
- [47] E. Inga and J. Rodríguez, "Estrategias de negocio para medición inteligente acoplando energías renovables," *Prim. Congr. Int. y Expo Científica: Investigación Sostenible: Energías Renovables y Eficiencia Energética*, pp. 281–291, 2013.
- [48] T. Ueno, R. Inada, S. Osame, and K. Tsuji, "Effectiveness of displaying energy consumption data in residential houses Analysis on how the residents respond", *Proceedings, European Council for an Energy-efficient Economy, paper*, vol. 6, p. 19, 2005.

- [49] T. Takuno, Y. Kitamori, R. Takahashi, T. Hikiyara, "AC Power Routing System in Home Based on Demand and Supply Utilizing Distributed Power Sources", *Energies*, vol. 4, no. 5, pp. 717–726, 2011.
- [50] T. Takuno, M. Koyama and T. Hikiyara, "In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching", *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 427–430, IEEE, Oct. 2010.
- [51] R. Takahashi, Y. Kitamori and T. Hikiyara, "AC Power Local Network with Multiple Power Routers", *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 6293–6303, 2013.
- [52] B. P. Stalling, T. Clemmer, H. A. Mantooth, R. Motte, H. Xu, T. Price and R. Dougal, "Design and evaluation of a universal power router for residential applications," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 587–594, IEEE, 2012.
- [53] M. He, E. Reutzel, X. Jiang, R. Katz, S. Sanders, D. Culler, and K. Lutz, "An architecture for local energy generation, distribution, and sharing", in *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE 2008*. IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2008.
- [54] G. Lu, D. De and W. Z. Song, "SmartGridLab A Laboratory-Based Smart Grid Testbed", *First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 143–148, IEEE, Oct. 2010.
- [55] Y. Xiao, "Communication and networking in smart grids", *CRC Press*, 2012.
- [56] J. M. Rodríguez, "Submetering como pieza clave en la gestión eficiente de la energía," *II Congreso de Eficiencia Energética Eléctrica*, 2012.
- [57] PV-output, "Live Production - BerwickBeacon4 4000W", [En línea]. Consultado el 28/10/2016. Disponible en: <http://pvoutput.org>.

Bibliografía

ACERO, L. and FONSECA, C., Análisis de las alternativas tecnológicas del medidor y transferencia inteligente y su compatibilidad para la integración en una red inteligente residencial, 2013.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 142. (Julio 11 de 1994). Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 143. (Julio 11 de 1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 697. (Octubre 3 de 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 3683. (Diciembre 19 de 2003). Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una Comisión Intersectorial.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 802. (Marzo 15 de 2004). Por medio del cual se establecen algunas disposiciones para incentivar el consumo del Gas Natural Comprimido para uso Vehicular, GNCV.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 139. (Enero 25 de 2005). Por el cual se modifican los parágrafos 2 y 3 del artículo 23 del Decreto 3683 del 19 de

diciembre de 2003.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1008. (Abril 3 de 2006).
Por el cual se adiciona el Decreto 802 de 2004.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2501. (Julio 4 de 2007).
Por medio del cual se dictan disposiciones para promover prácticas con fines de uso racional y eficiente de energía eléctrica.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2629. (Julio 10 de 2007).
Por medio del cual se dictan disposiciones para promover el uso de biocombustibles en el país, así como medidas aplicables a los vehículos y demás artefactos a motor que utilicen combustibles para su funcionamiento.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 3450. (Septiembre 12 de 2008).
Por el cual se dictan medidas tendientes al uso racional y eficiente de la energía eléctrica.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 1135. (Marzo 31 de 2009).
Por el cual se modifica el Decreto 2629 de 2007, en relación con el uso de alcoholes carburantes en el país y con las medidas aplicables a los vehículos automotores que utilicen gasolinas para su funcionamiento.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 788. (Diciembre 27 de 2002).
Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 180919. (Junio 1 de 2010).
Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el

Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1450. (Junio 16 de 2011). Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1665. (Julio 16 de 2013). Por medio de la cual se aprueba el "Estatuto de la Energía Internacional de Energías Renovables (IRENA)", hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715. (Mayo 13 de 2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Decreto 2143. (Noviembre 4 de 2015). Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, en lo relacionado con la definición de los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en el Capítulo 111 de la Ley 1715 de 2014.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 549. (Julio 10 de 2015). Por la cual se reglamenta el Capítulo 1 del Título 7 de la Parte 2, del Libro 2 del Decreto número 1077 de 2015, en cuanto a los parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1285. (Junio 12 de 2015). Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único

Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 065. (Junio 25 de 2012). Por el cual se ordena hacer público un proyecto de resolución de carácter general, que pretende establecer las normas de calidad de la potencia eléctrica aplicables en el Sistema Interconectado Nacional.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. "Actualización del Código de Medida - Documento CREG-019,"2014.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 029. (Marzo 7 de 2016). Por la cual se define un esquema de tarifas diferenciales para establecer los costos de prestación del servicio de energía eléctrica a usuarios regulados en el SIN para promover el ahorro voluntario de energía.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 039. (Marzo 15 de 2016). Por la cual se modifica, aclara y simplifica la Resolución CREG 029 de 2016.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Resolución 049. (Abril 6 de 2016). Por la cual se aclaran la Resolución CREG 025 de 2016 y la Resolución CREG 029 de 2016.

DEPURU, S. S. S. R.; WANG, L. and DEVABHAKTUNI, V. , Electricity theft: Overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft, Energy Policy, vol. 39, no. 2, pp. 1007–1015, Feb. 2011.

DEPURU S. S. S. R.; WANG, L. and DEVABHAKTUNI, V., Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status, Renewable and sustainable energy re-

views, vol. 15, no. 6, pp. 2736-2742, 2011.

EHRHARDT-MARTINEZ, K.; LAITNER, J. A. S. and DONNELLY, K. A., Beyond the Meter: Enabling Better Home Energy, Energy, Sustainability and the Environment 2011, Elsevier, pp. 273–303, 2011.

HE, M., et al, An architecture for local energy generation, distribution, and sharing, Conference in Energy 2030 , 2008. ENERGY 2008. IEEE 2008. IEEE, pp. 1–6, IEEE, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), ISO 50001-Gestión de la energía eléctrica, 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), NTC 4052-Equipos de medición de energía eléctrica (C.A). Requisitos particulares. Medidores estáticos de energía activa (clases 1 y 2), 2003.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC), NTC 6079-Requisitos para sistemas de infraestructura de medición avanzada (AMI) en redes de distribución de energía eléctrica, 2014.

INGA, E. and RODRÍGUEZ, J., Estrategias de negocio para medición inteligente acoplando energías renovables, Prim. Congr. Int. y Expo Científica: Investigación Sostenible: Energías Renovables y Eficiencia Energética, pp. 281–291, 2013.

KITAMORI, Y.; TAKAHASHI, R. and HIKIHARA, T. , Circuit Switching by Power Routers in Power Distribution Network, IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp.160–161, IEEE, 2013.

LUTOLF, R., Smart Home Concept and The Integration of Energy Meters Into a Home Based System, Seventh International Conference on Metering Apparatus and Tariffs for Electricity Supply, pp. 227–278, IET, 1992.

LOTFI, J., et al, Overview of home energy management systems architectures and techniques, 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IR-SEC), pp. 1–4, IEEE, 2015.

LUHUA Z., et al, Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on relations of Power Supply and Application in smart grid, Proceedings in CIGRE 2011, pp. 1–5, Sept 2010.

LU, G.; DE, D. and SONG, W. Z., SmartGridLab A Laboratory-Based Smart Grid Testbed, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (Smart-GridComm), pp. 143–148, IEEE, Oct. 2010.

ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA (OLADE) y ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA DESARROLLO INDUSTRIAL (ONUDI), Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe - Caso Colombia, 2011.

ORTIZ, M., et al, Towards a smart city: Design of a domestic smart grid, Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES, pp. 863–868, IEEE, 2015.

PEDRASA, M. A. A., et al, Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services, Energy, vol. 1, no 2, pp 134 -143, 2010.

PV-OUTPUT, Live Production - BerwickBeacon4 4000W, [En línea]. Consultado el

28/10/2016. Disponible en: <http://pvoutput.org>.

RODRÍGUEZ, R. H. L. and CÉSPEDES, G. R. H., Challenges of advanced metering infrastructure implementation in Colombia, 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), pp. 1–7, IEEE, 2011.

RODRÍGUEZ, J. M., Submetering como pieza clave en la gestión eficiente de la energía, II Congreso de Eficiencia Energética Eléctrica, 2012.

STALLING, B. P., et al, Design and evaluation of a universal power router for residential applications, 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 587–594, IEEE, 2012.

TOYODA, J. and SAITOH. H., Proposal of an Open-Electric-Energy-Network (OEEN) to Realize Cooperative Operations of IOU and IPP. In Proceedings of the 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD), vol. 1, pp. 218–222, IEEE, 1998.

TAKUNO, T., et al, AC Power Routing System in Home Based on Demand and Supply Utilizing Distributed Power Sources, *Energies*, vol. 4, no. 5, pp. 717–726, 2011.

TAKUNO, T.; KOYAMA, M. and HIKIHARA, T., In-home power distribution systems by circuit switching and power packet dispatching, First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 427–430, IEEE, Oct. 2010.

TAKAHASHI, R.; KITAMORI, Y. and HIKIHARA T., AC Power Local Network with Multiple Power Routers, *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 6293–6303, 2013.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), et al, Smart Grids Co-

lombia Visión 2030 - Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia, 2016.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2016), 2016.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia (Revisión Octubre de 2015), 2015.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), Programa Colombiano de Normalización, Acreditación, Certificación y Etiquetado de Equipos de Uso Final de Energía (CONOCE), 2001.

UTILITYAMI OPENHAN TASK FORCE CORE DEVELOPMENT TEAM, UtilityAMI 2008 Home Area Network System Requirements Specification, 2008.

UENO, T., et al, Effectiveness of displaying energy consumption data in residential houses Analysis on how the residents respond, Proceedings, European Council for an Energy-efficient Economy, paper, vol. 6, p. 19, 2005.

XIAO, Y., Communication and networking in smart grids, CRC Press, 2012.

XM EXPERTOS EN MERCADOS, Informe de operación del SIN y administración del mercado, 2015.