



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Barreras técnicas en las redes de transmisión eléctrica colombianas que dificultan la evolución a redes eléctricas inteligentes

Paula María Roldán Zapata

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2014

Barreras técnicas en las redes de transmisión eléctrica colombianas que dificultan la evolución a redes eléctricas inteligentes

Paula María Roldán Zapata

Trabajo Final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Sistemas Energéticos

Director (a):

Ph.D. Carlos Jaime Franco Cardona

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2014

Dedico este trabajo especialmente a mi esposo que con su apoyo constante y su amor incondicional ha sido amigo y compañero inseparable, fuente de sabiduría, calma y consejo en todo momento.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia, a mis compañeros de estudio y de trabajo y a todos aquellos que de una u otra forma fueron partícipes de este trabajo. Agradezco su apoyo, su comprensión, su motivación e incondicional compañía durante este proceso, los cuales fueron fundamentales para culminarlo con éxito.

Agradezco especialmente a mi director Carlos Jaime Franco Cardona quien siempre estuvo dispuesto a orientarme y con su paciencia encaminó mi trabajo.

Resumen

Las redes eléctricas inteligentes están cambiando los mercados energéticos a nivel mundial, sin embargo, Colombia apenas se está incursionando en el tema con modificaciones en el marco regulatorio e incentivos para la generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales. En este trabajo se presentan los avances en transmisión eléctrica para las redes inteligentes tanto a nivel mundial como para el caso colombiano.

Después de la revisión de literatura se percibe que aún hay mucho por estudiar pues los desarrollos que existen hasta el momento están enfocados a la distribución eléctrica y su interacción con el usuario final. Las redes de transmisión no se han tenido muy en cuenta y los avances en este campo son contados, sin embargo, países como China y Estados Unidos llevan la delantera en investigaciones de transmisión a grandes distancias.

Palabras clave: redes inteligentes, transmisión eléctrica, energías renovables, eficiencia energética

Abstract

Smart grids are changing worldwide energy markets, however, Colombia is just dabbling in the topic with changes in the regulatory framework and incentives for electricity generation from non-conventional sources. In this paper advances in power transmission networks for smart both globally and for the Colombian case are presented.

After the literature review it is perceived that there is still much to study there because the developments so far are focused on electrical distribution and interaction with the end user. Transmission networks have not been taken into account and the advances in this field are counted, however, countries such as China and the United States take the lead in investigations of transmission over long distances

Keywords: smart grids, power transmission, renewable energy, energy efficiency

Contenido

	Pág.
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	19
1.1 COMPONENTES DE LAS REDES INTELIGENTES	22
1.1.1 Medidores Inteligentes	22
1.1.2 FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems	22
1.1.3 Equipos Inteligentes (Smarts)	23
1.1.4 Consumidores Activos del Sistema o Interactividad	23
1.2 MODELO CONCEPTUAL DE REDES INTELIGENTES	23
1.3 CONCLUSIÓN.....	26
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	27
2.1 INTELLIGRID.....	29
2.2 AUTOMATIZACIÓN AVANZADA DE LA DISTRIBUCIÓN (ADA)	29
2.3 MODERN GRID INITIATIVE.	29
2.4 ADVANCED GRID APPLICATIONS CONSORTIUM (GRIDAPPS)	30
2.5 GRIDWORKS.....	30
2.6 CONCLUSIÓN.....	31
CAPÍTULO 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	33
3.1 OBJETIVOS.....	34
3.1.1 Objetivo General.....	34
3.1.2 Objetivos Específicos	34
CAPÍTULO 4. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES EN EL MUNDO	35
4.1 CHINA	36
4.1.1 Smart community.....	37
4.1.2 Integración de la investigación nacional de energía eólica y el centro de pruebas de China	37
4.1.3 Dispositivo digital de simulación del sistema de potencia en tiempo real	38
4.1.4 Xiangjiaba-Shanghai +/- Transmisión DC 800 kV UHV.....	38
4.2 REINO UNIDO	40
4.3 ITALIA.....	41
4.3.1 Enel Distribuzione.....	43
4.3.2 ACEA	43
4.3.3 DEVAL	43
4.3.4 A2A	44

4.4	INDIA	44
4.5	ESTADOS UNIDOS (EE.UU.)	47
4.6	BRASIL	49
4.6.1	<i>Sete Lagoas (Minas Gerais)</i>	50
4.6.2	<i>Aparecida (São Paulo)</i>	50
4.6.3	<i>Buzios (Rio de Janeiro)</i>	50
4.6.4	<i>Parintins (Amazonas)</i>	51
4.7	CONCLUSIÓN	51
CAPÍTULO 5. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES EN COLOMBIA		55
5.1	LECCIONES APRENDIDAS: DEL MUNDO PARA COLOMBIA	55
5.1.1	<i>Oportunidades</i>	55
5.1.2	<i>Retos</i>	56
5.1.3	<i>Barreras</i>	57
5.1.4	<i>Desarrollos tecnológicos</i>	58
5.2	ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA	59
5.2.1	<i>Energía solar</i>	59
5.2.2	<i>Energía hidráulica</i>	60
5.2.3	<i>Energía eólica</i>	60
5.2.4	<i>Energía por biomasa</i>	61
5.2.5	<i>Energía geotérmica</i>	61
5.2.6	<i>Energía oceánica</i>	61
5.2.7	<i>Regulación</i>	62
5.3	FUTURO DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL (SIN)	62
5.3.1	<i>Nuevo nivel de tensión en el SIN</i>	63
5.3.2	<i>Refuerzo del anillo a 220 kV en Guajira – Cesar – Magdalena</i>	63
5.3.3	<i>Redes de transmisión al interior de las ciudades</i>	63
5.3.4	<i>Dispositivos almacenadores de energía</i>	64
5.3.5	<i>Transformadores desfasadores de fase (PST's)</i>	64
5.4	CONCLUSIÓN	64
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		67

Lista de figuras

	PÁG.
FIGURA 1-1: Evolución en las redes de energía.	19
FIGURA 1-2: De las redes eléctricas tradicionales a redes inteligentes.	20
FIGURA 1-3: Esquema de operación de una red inteligente.....	21
FIGURA 1-4: Dominios del modelo conceptual de redes inteligentes.....	24
FIGURA 4-1: Distribución típica de los recursos de generación de energía en china	38
FIGURA 4-2: Proposed smart grid architecture indian power systems	45
FIGURA 4-3: Generación usa	48

Lista de tablas

	PÁG.
TABLA 1-1: Dominios del modelo NIST	25
TABLA 1-2: Componentes del modelo NIST	25
TABLA 4-1: Principal motivación para implementar redes eléctricas inteligentes	52
TABLA 4-2: Generación a partir de fuentes renovables	52
TABLA 4-3: Cambios en el marco regulatorio e incentivos.....	52
TABLA 4-4: Metas conjuntas a nivel internacional.....	52
TABLA 4-5: Retos presentes para la implementación de redes eléctricas inteligentes	53
TABLA 4-6: Implementación de redes eléctricas inteligentes.....	53

Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
AC	Corriente Alterna
ADA	Automatización Avanzada de la Distribución
AEEG	Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas
ANEEL	Agencia Nacional de Energía Eléctrica
CEC	Consejo de Electricidad de China
CEDR	Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma
DC	Corriente Directa
DOE	Departamento Norteamericano de Energía
ERNC	Energías Renovables No Convencionales
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
FER	Fuentes Energías Renovables
GRD	Gestor sistemas de distribución
GRT	Gestor redes de transporte
NIST	National Institute of Standards and Technology
OFGEM	Oficina del Gas y los mercados de electricidad
ONS	Operador del Sistema Nacional
PMUS	Phasor Measure Units
SCADA	Supervisión Control And Adquisición Data System
SERC	Comisión Reguladora de Electricidad del Estado
SGCC	Corporación Estatal de la Red Eléctrica de China
TICS	Tecnologías de la información y comunicaciones
TOU	Time of Use
UE	Unión Europea
UHV	Ultra High Voltage – Ultra Alta Tension
ZNI	Zonas No Interconectadas

Introducción

La perspectiva global y las exigencias del mercado de energía eléctrica hoy en día se centran en la Eficiencia Energética. La creciente presión mundial en el precio de los combustibles fósiles y la polución causada por estos, junto con los aspectos ambientales y de calentamiento global están demandando nuevas tecnologías que se dirijan a mejorar la prestación del servicio de energía eléctrica mientras se preservan los recursos naturales (Blumsack & Fernandez, 2012).

Los sistemas con redes centralizadas y controladas por un único proveedor están llegando a su fin. La tendencia actual es contar con redes descentralizadas altamente eficientes, en las que se mezclan y coexisten diversas tecnologías digitales que se comunican unas con otras a través de redes de comunicaciones de alta velocidad con ancho de banda suficiente para permitir el control en tiempo real de fuentes de generación distribuidas localmente, con el fin de satisfacer la demanda de los clientes (Sun et al., 2011).

Las redes actuales están diseñadas y en funcionamiento desde la mitad del siglo pasado y deben de ser rediseñadas para convertirse en redes más efectivas y robustas, de tal forma que soporten las nuevas tecnologías y sean redes inteligentes. Colombia tiene una alta aplicabilidad para las redes eléctricas inteligentes ya que ha evolucionado en redes y en este momento es un país apto para recibir los beneficios que las nuevas tecnologías traen consigo. Al día de hoy el sistema interconectado nacional cubre las regiones de alta demanda en el país, pero muchos territorios actualmente se encuentran no interconectados, considerados como casos óptimos para la generación distribuida, donde las pequeñas poblaciones podrían generar electricidad con la ayuda de recursos renovables (Díaz, González, Restrepo, Isaac, & López, 2011).

El presente trabajo es una revisión de literatura enfocada en estudiar y comprender las mejores prácticas y lecciones aprendidas a nivel internacional que puedan ser aplicadas en Colombia y permitan una migración de las redes tradicionales de transmisión eléctrica

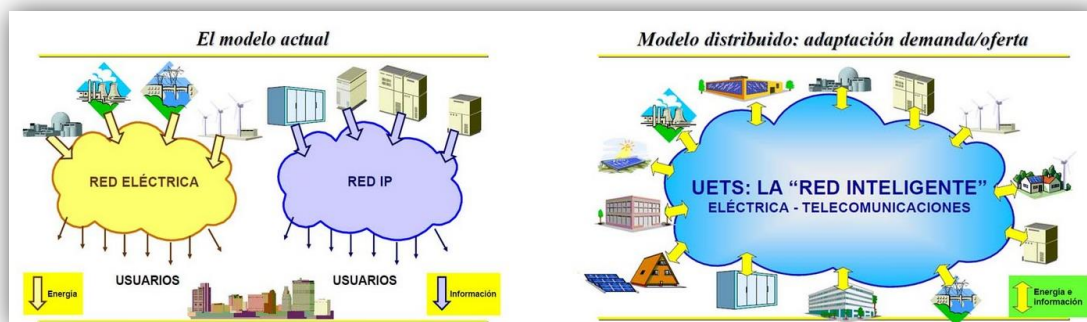
a redes eléctricas inteligentes generando el menor impacto posible tanto al sistema interconectado nacional como a las empresas que conforman el sector eléctrico Colombiano.

En el primer capítulo se presentan los antecedentes de las redes inteligentes, en el segundo se hace un recorrido por el estado del arte y las investigaciones que se han desarrollado hasta el momento sobre el tema. A continuación, el capítulo tres presenta el planteamiento del problema y el cuarto es una revisión de literatura de las redes eléctricas inteligentes a nivel mundial, lecciones aprendidas y recomendaciones que surgen después de la implementación de proyectos pilotos. El capítulo cinco presenta las redes eléctricas inteligentes en Colombia, los avances, la regulación y lo que falta. Y por último se encuentran las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron durante el desarrollo del trabajo.

Capítulo 1. Antecedentes

Las redes eléctricas fueron construidas en 1890 y han evolucionado desde entonces, están compuestas por red de líneas de transmisión, subestaciones, transformadores y otros equipos que posibilitan la entrega de la electricidad desde una planta de generación hasta los usuarios finales ya sean del mercado regulado o del mercado no regulado (Cespedes, 2012).

Figura 1-1: Evolución en las Redes de Energía (Ecoimpulso, 2011).



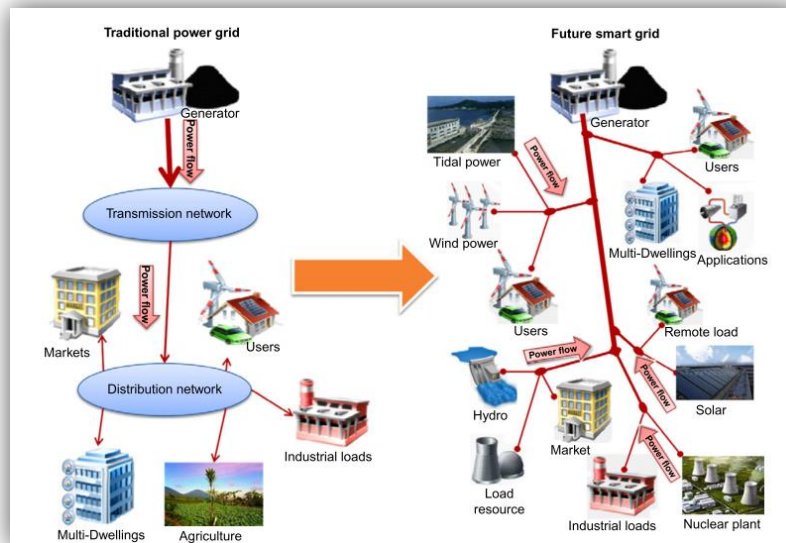
Estas redes de electricidad están supervisadas por un centro de control fundamentado en un sistema de adquisición de datos SCADA (Supervisión Control And Adquisición Data System) que permite el monitoreo y control desde la generación hasta la distribución con el fin de detectar necesidades de incremento/reducción de generación o responder a inestabilidades del sistema (Farhangi, 2010).

El término Redes Eléctricas Inteligentes hace referencia a una red eléctrica que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios que se encuentran conectados a ella. Igualmente consiste en miles de piezas ajustadas entre sí como un rompecabezas, e incorpora elementos como Phasor Measure Units (PMUS), controladores, aplicaciones y servicios de TICS (Tecnologías de la información y comunicaciones) que permiten la administración y control en tiempo real en ambas direcciones de todos los involucrados

en el abastecimiento de electricidad, facilitando la toma de decisiones ante cambios en el comportamiento de la red (Järventausta, Repo, Rautiainen, & Partanen, 2010).

El principal objetivo de las redes inteligentes es realizar un uso eficiente, confiable y sostenible de la energía eléctrica; monitoreando la temperatura y la capacidad de las líneas de transmisión y ajustando los flujos de energía más cerca de los límites de operación sin violarlos, o reconfigurando los flujos para mantener las líneas en su estado óptimo de operación minimizando los riesgos de fallas. Además, permiten adaptar la generación a los picos y valles de la demanda a medida que los usuarios lo requieran y las centrales eléctricas produzcan la energía en un flujo optimizado. Para cubrir un pico de demanda la red podrá suplirse de energía que proviene de una fuente renovable intermitente, como la energía solar o la energía eólica, siempre y cuando estén disponibles en un momento dado, en lugar de poner a trabajar plantas de generación con combustibles fósiles contribuyendo con el cuidado del medio ambiente (Schick & Winthereik, 2013).

Figura 1-2: De las redes eléctricas tradicionales a redes inteligentes (Sechilariu, Wang, & Locment, 2013).

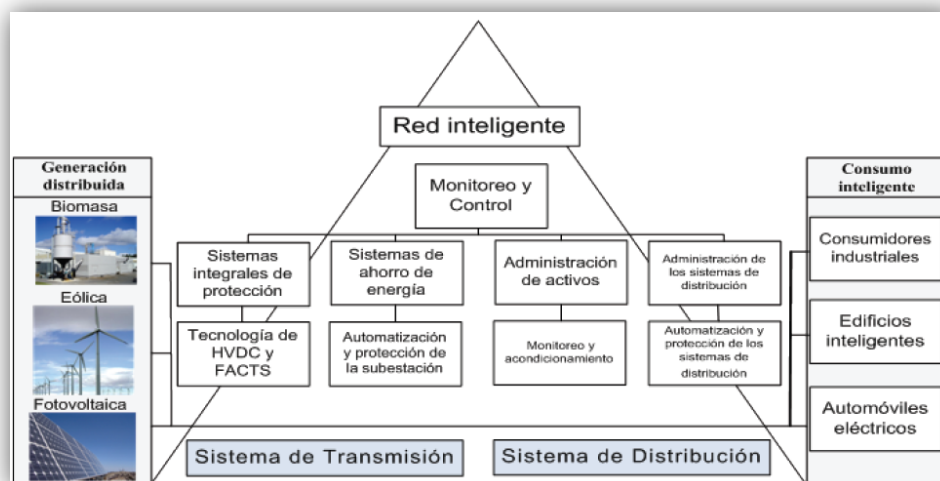


A medida que han ido evolucionando las redes inteligentes se han ido estructurando una serie de pasos o requisitos básicos para la implementación adecuada y puesta en servicio. Son muchos los requerimientos para el funcionamiento óptimo de estas redes,

sin embargo existen unos fundamentales con los que se estructura lo básico de la red y se enumeran a continuación (Komor, Hoke, & Kempener, 2014):

- Establecimiento de incentivos regulatorios.
- Nuevos mecanismos de comercialización para los servicios a los clientes y operadores de red.
- Normalización e interoperabilidad de equipos.
- Protección de datos y confidencialidad de los mismos.
- Despliegue de contadores inteligentes y provisión de información a consumidores y agentes.
- Seguimiento y control de la generación distribuida en la red de distribución.
- Desarrollo de servicios de balance en la red de distribución.
- Integración del vehículo eléctrico y del almacenamiento para aumento de la flexibilidad.
- Agregación de recursos energéticos distribuidos.
- Adecuación de los sistemas para la participación real del cliente en el mercado eléctrico.

Figura 1-3: Esquema de Operación de una Red Inteligente (Velasco, Ángeles, & García, 2013)



Además de la infraestructura de la red y los cambios en las políticas regulatorias del sector, las redes inteligentes cuentan con unos componentes básicos que son los que dan la inteligencia. Algunos de ellos ya están implementados en muchos sistemas pero otros aún se encuentran en desarrollo o están siendo usados como pilotos de prueba. Lo más destacados se presentan en los párrafos siguientes.

1.1 Componentes de las Redes Inteligentes

1.1.1 Medidores Inteligentes

Los medidores inteligentes reemplazan los medidores mecánicos, permitiendo la transferencia de información entre el consumidor y el proveedor de energía sobre el consumo en tiempo real. También permiten registrar los eventos, perfiles de carga y precios en la red (Geelen, Reinders, & Keyson, 2013).

Hoy en día están diseñados de acuerdo con los estándares de redes inteligentes y se cree que en el corto plazo permitirán elegir entre las opciones de electricidad más limpias que se encuentren en oferta (Díaz et al., 2011).

1.1.2 FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems

Los sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna (CA), son sistemas basados en la incorporación de dispositivos de electrónica de potencia y sus métodos de control en las redes de transmisión. Son utilizados para el control dinámico de voltaje, impedancia, y ángulo de fase de líneas de CA de alto voltaje, en sistemas de generación y almacenamiento de energía: pilas de combustible, sistemas eólicos, y fotovoltaicos, micro turbinas, líneas de transmisión, entre otros. La implementación de esta tecnología ha traído múltiples beneficios a la red como (Velasco et al., 2013):

- Aumento de la capacidad de los sistemas actuales de transmisión.
- Mejora de la confiabilidad y disponibilidad de las líneas de transmisión.
- Mayor estabilidad dinámica y transitoria de la red, mejorando la calidad de la energía eléctrica entregada a los usuarios.
- Implementación con bajo impacto ambiental.

1.1.3 Equipos Inteligentes (Smarts)

Hace referencia a todo tipo de objeto o electrodoméstico como aires acondicionados, lavaplatos, neveras, entre otros, que a través de unas aplicaciones especialmente diseñadas respondan a los requerimientos del usuario final como interacciones remotas a través de la red, proporcionando comodidad al mismo e informando a su vez al proveedor de servicios para su supervisión (Järventausta et al., 2010).

Por último y como componente principal se encuentran los consumidores activos y su interactividad con el sistema puesto que son quienes dinamizan el tráfico que circula por la red de acuerdo a sus requerimientos de demanda de electricidad.

1.1.4 Consumidores Activos del Sistema o Interactividad

Con las nuevas tecnologías y las redes inteligentes es posible que los usuarios o los dispositivos instalados en el lado del cliente tomen decisiones para controlar la demanda de tal forma que se adapte mejor a sus necesidades financieras y sociales.

Como efecto de los contadores inteligentes, las tecnologías de control electrónico, los medios modernos de comunicación y la mayor conciencia de los usuarios, la gestión local del consumo de electricidad desempeñará un papel fundamental en la prestación de nuevos servicios que crearán valor para las partes involucradas.

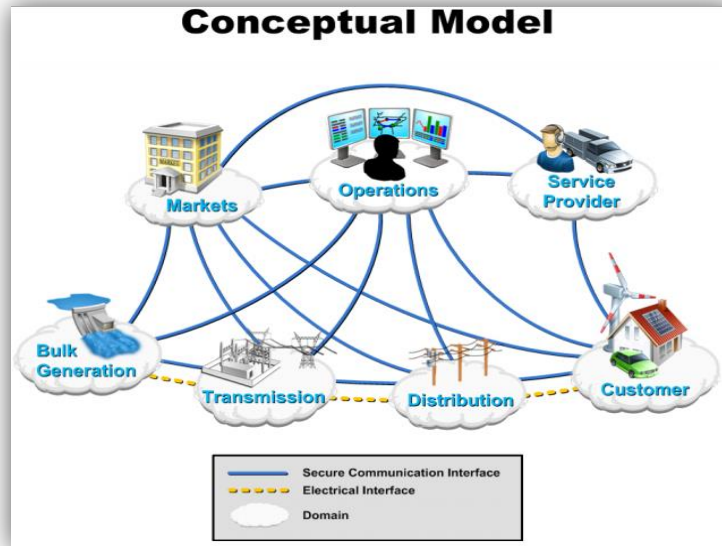
Todos estos nuevos desarrollos y modalidades de gestión de los servicios, impactarán en gran medida la evolución de la demanda de la energía eléctrica. Elementos como los contadores electrónicos, los sistemas de gestión automática de contadores, junto con otros sistemas de comunicación y control que se utilizan en las redes de transmisión y distribución, servirán de apoyo para crear una herramienta que permita la integración de los procesos de negocio en la gestión en tiempo real de la cadena de valor entre los interesados (Geelen et al., 2013).

1.2 Modelo Conceptual de Redes Inteligentes

El National Institute of Standards and Technology (NIST) fue delegado como el encargado para la coordinación y desarrollo de un modelo para las redes inteligentes de

tal forma que se establecieran unas medidas prioritarias que permitieran avanzar en la estandarización del sector y mejorar la interoperabilidad de las redes (Framework, 2010).

Figura 1-4: Dominios del Modelo Conceptual de Redes Inteligentes (Framework, 2010)



El modelo conceptual planteado por el NIST es un conjunto de diferentes diagramas y descripciones para la discusión de las características, usos, comportamientos, interfaces, requisitos y estándares de las redes inteligentes. Éste modelo no representa la arquitectura final sino que es una herramienta para describir y discutir el desarrollo de dicha arquitectura. Asimismo permite identificar y debatir los problemas de interoperabilidad para avanzar en la integración, resalta las áreas clave del problema de interoperabilidad y puede ayudar a resolver problemas de interdependencias entre sistema eléctrico y otras infraestructuras (Framework, 2010).

Se compone de varios dominios, cada uno aplicaciones y actores, que están conectados por las asociaciones, las mismas que tienen interfaces en cada extremo. Los dominios interactúan a través de interfaces de carácter eléctrico o conexiones de comunicaciones. Cada una de las interfaces puede ser bidireccional. Las interfaces de comunicación no representan necesariamente conexiones físicas sino conexiones lógicas de información entre distintos dominios (Borlase et al., 2009).

Los dominios que componen la red del modelo NIST son (Framework, 2010):

Tabla 1-1: Dominios del modelo NIST

Dominio	Descripción
Clientes	Está compuesto por grupo de generadores, almacenadores, administradores y usuarios de la energía. Entre los clientes existen tres tipos: hogar, comercial e industrial.
Mercados	Compuesto por los operadores y participantes en los mercados de electricidad.
Proveedores de Servicios	Organizaciones que prestan servicios a los clientes del mercado eléctrico y a las empresas de servicios.
Operadores	Son los responsables del movimiento de la electricidad, es decir, administran el mercado.
Grandes Generadores	Son las empresas con capacidades de generación muy altas. Cuentan con la capacidad de almacenar energía para su posterior distribución.
Transmisión	Son aquellas compañías que transportan la electricidad a largas distancias con cargas muy altas de voltaje en la red.
Distribución	Son los distribuidores de electricidad desde y hacia los clientes.

En los dominios anteriormente descritos, interactúan los componentes del modelo, los cuales se describen a continuación (Framework, 2010):

Tabla 1-2: Componentes del modelo NIST

Componente	Descripción
Actores	Pueden ser dispositivos, sistemas informáticos y/o organizaciones. Tienen la capacidad de tomar decisiones e intercambiar información con otros actores a través de interfaces.
Aplicaciones	Son las tareas realizadas por los actores dentro de los dominios. Algunas aplicaciones son realizadas por un solo actor, otras son

	ejecutadas por varios actores que trabajan juntos.
Dominios	Los dominios son los actores de la misma área con objetivos similares.
Asociaciones	Son conexiones lógicas entre los actores que establecen relaciones bilaterales. En cada extremo de una asociación se encuentra una interfaz a un actor.
Interfaces	Representan un intercambio de información entre dos dominios y los actores dentro del mismo. No representan conexiones físicas sino conexiones lógicas de interconexión de diferentes dominios.

1.3 Conclusión

La eficiencia energética y los aspectos ambientales como el calentamiento global están demandando nuevas tecnologías en las redes de transmisión eléctrica. Las redes inteligentes son una respuesta a esta demanda ya que permiten la coexistencia de diversas tecnologías que interactúan entre sí para facilitar el control en tiempo real, satisfacer la demanda de los clientes y preservar los recursos naturales.

A nivel mundial se han venido desarrollando proyectos y nuevos estándares que facilitan la migración de redes eléctricas tradicionales a redes inteligentes. Sin embargo, aún existen muchos interrogantes sobre el tema ya que gran parte de las investigaciones están enfocadas a los sistemas de distribución eléctrica y de usuario final más no tienen en cuenta el impacto de estas implementaciones sobre los sistemas de transmisión eléctricos.

En el próximo capítulo se presenta el estado del arte de las investigaciones e implementaciones de redes eléctricas inteligentes hasta el día de hoy.

Capítulo 2. Estado del arte

La tecnología de Redes Inteligentes nace de los intentos por tener controles de consumo mediante medidores y sistemas de supervisión. En la década de los 80, los medidores automáticos eran empleados para monitorear cargas de millones de clientes, motivando el desarrollo de una Infraestructura avanzada capaz de determinar la cantidad de energía que se utilizaba en diferentes momentos del día (Hossain, 2013).

La década de los 90's se destacó por una recesión generalizada en la cual se definieron los mayores acuerdos de comercio de Europa y se generaron las primeras políticas de integración energética. Estas políticas se consolidaron con la creación de la Unión Europea y del mercado interno basado en el principio de libre competencia, el cual garantiza precios justos y particularmente para el mercado eléctrico, seguridad y estabilidad en el abastecimiento energético (Hossain, 2013).

Luego de la reorganización del mercado eléctrico europeo, América Latina recibe múltiples ofertas de inversión extranjera de los grupos empresariales del sector energético, quienes están buscando participación en el mercado interno ya sea a través de fusiones o compra de las empresas locales. Estos grupos empresariales ansiosos por el crecimiento y fortalecimiento económico encontraron una oportunidad de negocio y de diversificación del riesgo ya que la mayoría de los países latinoamericanos tenían deudas externas de gran valor, sistemas eléctricos monopólicos, públicos y centralizados y poca o ninguna capacidad para reinvertir y crecer su infraestructura eléctrica (Borlase et al., 2009).

Sin embargo estas inversiones no fueron suficientes debido a que la apertura del mercado europeo amplió las ofertas y por ende se generó una mayor competencia obligando a todos los involucrados a mejorar sus productos y a cautivar a los clientes con nuevas propuestas. De allí surgieron las primeras implementaciones de redes eléctricas

inteligentes y se han ido perfeccionando a través del tiempo para satisfacer las necesidades de los clientes que cada vez son más exigentes.

Dadas todas estas exigencias se imprimen nuevos desafíos a la red eléctrica convencional como la generación distribuida que permite disminuir las pérdidas por transmisión, promueve la integración de recursos energéticos distribuidos provenientes o no de energías renovables, habilita la red de transmisión para ser alimentada mediante banco de baterías o almacenamiento distribuido y soportar la carga de vehículos eléctricos. Además de este hay muchos otros entre los cuales sobresale el control distribuido e integración de centros de control distribuidos con una capacidad extraordinaria de comunicación en tiempo real de los actores del mercado que permitan la sincronización completa del sistema (El-hawary, 2014).

Para poder llevar a cabo estas actividades sin contratiempos, la red eléctrica inteligente deberá contar con unas características especiales, entre las cuales se destacan (Wissner, 2011):

- Autogestión de incidencias, solucionando los errores producidos en la red y asegurando el flujo eléctrico en todos los puntos. Esta particularidad permite minimizar las interrupciones del servicio con ayuda de tecnologías de adquisición de datos, ejecución de algoritmos para la decisión y el control dinámico del flujo de energía.
- Resistencia a ataques y desestabilizaciones.
- Participación activa de los consumidores, incentivando la generación local de energía y la entrega del exceso energético a la red en horas de alta demanda.
- Capacidad de suministro de energía de calidad adecuada, dado que cuenta con un mayor número de puntos de generación que permitirá la entrega de diferentes calidades energéticas para cada tipo de aplicación.
- De fácil adaptación a las diversas modalidades de generación y almacenamiento.
- Facilitar la evolución de los mercados, con la inclusión de nuevos elementos en la red como el vehículo eléctrico, entre otros.
- Optimización de sus activos y operación, con la automatización de todos los elementos implicados.

-
- Auto restauración (self-healing), que consiste en hacer continuas evaluaciones para detectar, analizar, responder y, restaurar componentes o secciones de la red que han fallado.
 - Capacidad instantánea de recuperación de la red, es decir, que ante cambios en su estructura o pérdida de nodos es capaz de mantenerse viva, conservando o reinventando su identidad y evitando distorsiones en su funcionamiento.

Para alcanzar las especificaciones anteriormente mencionadas, se está trabajando en investigaciones para la implementación de redes inteligentes. Uno de los sectores más impactado y sobre el cual existe un alto número de desarrollos es la distribución eléctrica. A continuación se enumeran algunas investigaciones vigentes en este campo.

2.1 IntelliGrid

Está compuesto por cinco subproyectos que buscan a través de desarrollos e investigaciones crear una nueva infraestructura eléctrica de potencia donde convergen los avances tecnológicos de todos los campos involucrados con las redes inteligentes, de tal forma que la nueva infraestructura eléctrica sea segura, confiable y con energía de alta calidad (Miranda, 2008).

2.2 Automatización Avanzada de la Distribución (ADA)

Tiene como finalidad la estructuración del sistema futuro de distribución donde todo se encuentre automatizado y supervisado para contribuir con la disminución en los tiempos de restauración del servicio ante una interrupción. También contempla las opciones de almacenamiento para casos de generación distribuida (Basak, Chowdhury, Halder nee Dey, & Chowdhury, 2012).

2.3 Modern Grid Initiative.

Es un programa del Departamento Norteamericano de Energía (DOE) que visualiza la red eléctrica inteligente como un todo que se apoya en diferentes tecnologías para llevar la energía a los consumidores (Sun et al., 2011).

2.4 Advanced Grid Applications Consortium (GridApps)

Es un programa desarrollado por Corporation Concurrent Technologies y se encarga de aplicar las tecnologías para la modernización de la transmisión y distribución eléctrica (Geelen et al., 2013).

2.5 GridWorks

Este programa tiene por objetivo mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico a través de la modernización sus principales componentes físicos. Su enfoque actual es mejorar los sistemas de superconductores de alta temperatura y los dispositivos de almacenamiento de energía (Miranda, 2008).

Al igual que en la distribución, en el sector de las comunicaciones se han venido estructurando ideas e investigaciones debido a que la infraestructura de comunicaciones de un país es considerada como el eje principal de las redes inteligentes y es de suma importancia para la incorporación de las mismas (Ancillotti, Bruno, & Conti, 2013).

Todas estas investigaciones están orientadas a que la evolución a nivel mundial hacia redes inteligentes sea lo más transparente posible para todos los involucrados, teniendo en cuenta que implica cambios en el modelo comercial y en la relación industria – generadores.

Hoy en día las transformaciones a las cuales debe someterse la red eléctrica se están visualizando como un proceso de evolución natural, que permitirá obtener el máximo provecho de los recursos necesarios para la producción y el suministro de energía eléctrica. Asimismo, se espera que el mercado de las redes inteligentes crezca dinámicamente impulsado por el cambio climático y por los programas de estímulo económico (Díaz et al., 2011).

Las redes inteligentes utilizan elementos tecnológicos que permiten desarrollar las ventajas que éstas proponen. En Colombia se ha comenzado con la incorporación de algunos de estos desarrollos, como los PMUS instalados actualmente en el sistema de potencia, los cuales permiten adquirir experiencia en el manejo de fasores para medición sincronizada, e ir escalando hacia las redes inteligentes (Rodríguez, 2009).

En el campo de las comunicaciones, Colombia tiene un paso adelante y es que cuenta con amplias redes de fibra óptica y en aquellos lugares donde se dificulta el acceso o las necesidades del lugar implican unas características diferentes tiene la posibilidad de integrar a la red conexiones satelitales o enlaces de radio microondas cubriendo todo el territorio (Díaz et al., 2011).

Teniendo en cuenta que las redes inteligentes tienen la característica de adaptarse fácilmente a las instalaciones y estructuras actuales, el gobierno colombiano creó un proyecto denominado Colombia Inteligente en el cual estudian las posibilidades para el país de migrar hacia redes eléctricas inteligentes y el costo de su implementación. Entre la metas del proyecto se destacan el uso eficiente de los recursos energéticos preservando el medio ambiente y los proyectos de Energía Sostenible.

2.6 Conclusión

En Colombia las redes inteligentes apenas están comenzando su desarrollo, se han dado algunas implementaciones pero todavía falta mucho por explorar en este campo.

Las empresas del sector eléctrico que tienen participación extranjera son quienes más han profundizado en el tema aplicando en Colombia las lecciones aprendidas por sus filiales europeas. Sin embargo estas implementaciones no han completamente satisfactorias debido a que los entornos son muy diferentes y el mercado europeo a diferencia del colombiano es un mercado abierto con políticas puntuales y estructuradas para la libre competencia en el sector energético.

Se percibe entonces que en Colombia aún quedan muchos campos por explorar hacia una infraestructura de redes inteligentes y es mucho más compleja la situación si se analizan las políticas actuales del sector ya que deben ser reestructuradas para acoger y facilitar la interrelación entre todos los agentes que entrarían a ser parte del sistema.

Después de conocer las redes eléctricas inteligentes y su perspectiva a nivel mundial incluyendo el caso colombiano, en el capítulo siguiente se describe el problema a tratar en el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 3. Planteamiento del problema

Una Red Eléctrica Inteligente es una red eléctrica que integra de manera inteligente las acciones de los usuarios conectados a ella. Su objetivo principal es realizar un uso eficiente, confiable y sostenible de la energía eléctrica; monitoreando la temperatura y la capacidad de las líneas de transmisión y ajustando los flujos de energía más cerca de los límites de operación sin violarlos, o reconfigurando los flujos para mantener las líneas en su estado óptimo de operación minimizando los riesgos de fallas por violaciones de límites (Hossain, 2013).

El nuevo modelo energético a nivel mundial busca transformar el sistema actual en un sistema distribuido, que satisfaga los requerimientos de seguridad en el suministro con precios razonables, en el que cualquier agente conectado a la red tenga la posibilidad de aportar energía, promoviendo la autogeneración y usando la red de distribución centralizada como soporte cuando la autogeneración no abastezca completamente la demanda local (Fadaeenejad et al., 2014)

La evolución hacia una red inteligente implica cambios en el modelo comercial actual y la relación de la industria con todos los productores. A raíz de estos cambios se ven afectadas las empresas de generación, los reguladores, los proveedores de servicios de energía, vendedores de tecnología de automatización y los consumidores del servicio, ya que las redes inteligentes optimizan las interconexiones entre todos los actores de la cadena (Luthra, Kumar, Kharb, Ansari, & Shimmi, 2014).

Las transformaciones a las cuales debe someterse la red eléctrica se pueden visualizar como un proceso de evolución natural, con el fin de obtener el máximo provecho de los recursos necesarios para la producción y suministro de la energía eléctrica. Por tal motivo este trabajo de maestría está enfocado al desarrollo de una revisión de literatura a través de la cual se puedan determinar los retos y desafíos que tienen las empresas Colombianas de transmisión eléctrica para migrar sus sistemas tradicionales a redes eléctricas inteligentes.

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo General

Establecer los retos que tiene Colombia a nivel de infraestructura de transmisión para migrar de redes eléctricas tradicionales a redes eléctricas inteligentes.

3.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar lecciones aprendidas y mejores prácticas en la implementación de redes inteligentes a nivel internacional y su aplicabilidad al sistema interconectado nacional colombiano.
- Identificar las dificultades que tendrían las empresas que conforman el sector eléctrico colombiano con la implementación de redes inteligentes.
- Definir políticas a ser implementadas en el sector eléctrico Colombiano para el óptimo funcionamiento de las redes inteligentes.

Capítulo 4. Redes eléctricas inteligentes en el mundo

En los últimos años ha aumentado a nivel mundial el interés en las redes inteligentes, se trabaja en investigaciones sobre el tema y se crean pilotos tanto en países desarrollados como en países en desarrollo. La nueva estructura de la red eléctrica inteligente se ha convertido en un reto importante donde todos quieren aportar ideas para su implementación y gestión. Estas ideas se han materializado en nuevos estándares que permiten aumentar la confiabilidad de las redes y la integración con sistemas de generación de electricidad renovable (Fadaeenejad et al., 2014).

El desarrollo de estas redes implica la evolución de los sistemas técnicos y sociales que vinculan a los interesados en el sistema, es decir, los gobiernos, los ciudadanos y las empresas pertenecientes al sector eléctrico deben trabajar en conjunto para que la red funcione adecuadamente. Estas sinergias permiten a su vez crear un sistema más confiable y seguro, mejorar la economía y contribuir con el mantenimiento de un medio ambiente más limpio para el futuro (Koenigs et al., 2013).

Las redes inteligentes son el futuro de la distribución de energía y representan un frente importante en el esfuerzo por reducir las emisiones globales. Utilizando la tecnología de medición avanzada, crean una comunicación de dos vías entre los usuarios y la red y son capaces de soportar energías renovables sin fluctuaciones en el sistema (Erlinghagen & Markard, 2012).

A nivel mundial son varios los países que han iniciado investigaciones y pruebas piloto en el tema. Conforme a los resultados obtenidos y a las experiencias vividas a la fecha, se han tomado la tarea de proponer una serie de pautas que deben ser consideradas por aquellos países que deseen una implementación exitosa de redes eléctricas inteligentes, con el menor número de contratiempos durante el proceso de migración. No son de estricto cumplimiento debido a que cada país tiene escenarios particulares, pero facilitan

el proceso y hacen que sea menos traumático tanto para el gobierno como para las empresas que conforman el sector y los usuarios del servicio de energía eléctrica. Estas recomendaciones se enumeran a continuación (Fadaeenejad et al., 2014):

- Comprender la importancia que tiene la implementación de las redes eléctricas inteligentes para el futuro del país y su desarrollo en el ámbito económico, social y tecnológico.
- Es fundamental el apoyo del gobierno no solo con modificaciones en las políticas de regulación sino también con inversiones para la investigación y para mejorar la infraestructura eléctrica.
- Los trabajos de investigación deben ser respaldados con la implementación de proyectos pilotos que permitan visualizar fortalezas y debilidades de los trabajos desarrollados.
- Las futuras redes de energía deben estar en la capacidad de integrarse sin ningún problema con las energías renovables de tal forma que vayan de la mano con la filosofía mundial de generación eléctrica amigable con el ambiente.

A continuación se presenta un recorrido por los países considerados a la fecha como pioneros en investigación e implementación de modelos que se aproximan a las redes eléctricas inteligentes. El desarrollo de nuevas tecnologías que permiten la integración con energías renovables ha sido su principal preocupación.

4.1 China

Desde el año 2006 el gobierno Chino ha estado promoviendo políticas y nuevos desarrollos para la implementación de redes eléctricas inteligentes motivado principalmente por tres factores. El primero de ellos es el incremento acelerado de la demanda de energía eléctrica en el país debido a la rápida expansión económica que ha tenido China en los últimos años. El segundo es la motivación que existe a nivel mundial para crear sistemas eléctricos seguros, eficientes y amigables con el ambiente que favorezcan la conservación de los recursos naturales y el fomento de las energías limpias. Por último se encuentran los avances tecnológicos que han desarrollado allí en UHV (ultra-alta tensión) una nueva tecnología de transmisión, que sienta las bases para

mejorar la capacidad de las redes y la asignación óptima de los recursos a través de grandes áreas (Lin, Yang, & Shyua, 2013).

A pesar de la estructura centralizada de China, éste trabajo de incentivos y promoción de una nueva regulación ha sido realizado por el gobierno de forma conjunta con una serie de agencias gubernamentales que comparten responsabilidades para el desarrollo de las redes inteligentes. La Comisión Reguladora de Electricidad del Estado (SERC) supervisa las políticas de regulación y estructuras tarifarias. La Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (CEDR), es la autoridad encargada de la planificación central para todas las iniciativas nacionales importantes de cualquier descripción. La Administración Nacional de Energía, tiene la responsabilidad de administrar los programas relacionados con las condiciones de energía de China y las políticas energéticas. El Consejo de Electricidad de China (CEC) encargado de promover la investigación y el desarrollo de aplicaciones de redes inteligentes y La Corporación Estatal de la Red Eléctrica de China (SGCC), que controla la red de transmisión y distribución, coordina y orienta la evolución de redes inteligentes en China (Xu, Xue, & Wong, 2014).

Todos estos organismos trabajan de la mano y fomentan la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías en redes inteligentes, dentro de los proyectos pilotos más destacados a la fecha se encuentran (Yuan, Shen, Pan, Zhao, & Kang, 2014):

4.1.1 Smart community

Fue el primer proyecto construido bajo las directrices establecidas por la SGCC para las comunidades inteligentes. Está ubicada al norte de China en el complejo residencial Xin'ao Golf Garden en Langfang, provincia de Hebei.

Consta de 655 hogares y 11 edificios, incluye una red eléctrica de baja tensión, una plataforma de servicios interactivos, hogares inteligentes con conexión eléctrica para vehículos, instalaciones de generación distribuida y almacenamiento de energía.

4.1.2 Integración de la investigación nacional de energía eólica y el centro de pruebas de China

El proyecto se centra en el desarrollo de las energías renovables y el almacenamiento de energía limpia en un solo lugar. Con ese objetivo, la SGCC instalará 30 aerogeneradores,

con al menos 78 MW de capacidad de generación, paneles de energía solar fotovoltaica con capacidad de 640 kW y 2,5 MW de almacenamiento de energía en baterías redox.

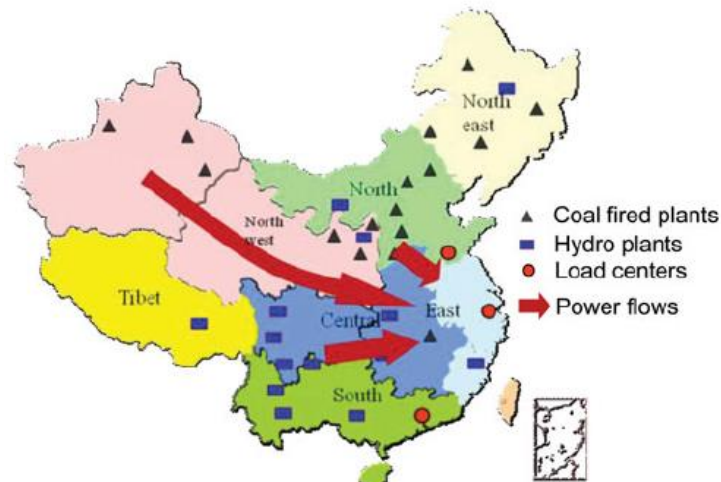
4.1.3 Dispositivo digital de simulación del sistema de potencia en tiempo real

Este proyecto de investigación desarrolló el primer dispositivo de simulación en tiempo real del sistema de potencia a gran escala. Éste dispositivo permite simular un sistema de energía con un máximo de 1.000 generadores y su desarrollo contribuirá con la operación segura de la red eléctrica debido a que permite simular la conexión de nuevos equipos a la red, realizar análisis de diferentes incidentes que se presenten en el sistema de potencia y realizar simulaciones de operación y control de un sistema de transmisión híbrido entre corriente alterna (AC) y corriente directa (DC).

4.1.4 Xiangjiaba-Shanghai +/- Transmisión DC 800 kV UHV

Xiangjiaba-Shanghai es un proyecto piloto en transmisión DC, el cual se ha desarrollado, diseñado y construido en China, y es considerado como el proyecto de transmisión más avanzado a nivel mundial en UHV DC por permitir la distancia más larga, la más alta tensión y estar diseñado con la tecnología más avanzada. Es una innovación de clase mundial realizada por China y representa la tecnología de transmisión DC más avanzada en el mundo.

Figura 4-1: Distribución típica de los recursos de generación de energía en China (Xu et al., 2014)



Además de los proyectos piloto y las constantes investigaciones, para promover el desarrollo sostenible, en el doceavo plan nacional quinquenal se destacó la importancia de desarrollar soluciones de energía renovable, como la eólica y la solar. Teniendo en cuenta que estas energías se deben integrar al sistema de potencia, se manifestó la necesidad de mejorar y adecuar a lo largo de China la infraestructura eléctrica, por lo tanto se determinó que el desarrollo de la red eléctrica inteligente es un área prioritaria de inversión para la nación (Xu et al., 2014).

Ante ésta determinación del gobierno, la compañía dominante en el sector eléctrico de China SGCC formuló una estrategia detallada para la implementación de las redes eléctricas inteligentes en China al 2020. De acuerdo a la planeación realizada durante el período comprendido entre 2009-2020, la implementación de la red eléctrica fuerte e inteligente de China se divide en tres fases de desarrollo (Xu et al., 2014):

- 2009-2010 es la fase de planificación donde se debe hacer estructurar el plan para la construcción de las redes inteligentes y los proyectos piloto seleccionados deben llevarse a cabo.
- 2011-2015 es la fase de construcción integral, donde se deben desarrollar y construir las tecnologías y equipos necesarios para este tipo de redes de tal forma que posteriormente se puedan aplicar extensivamente a toda la red.
- 2016-2020 es la fase de modernización y mejora, donde se construirá una red eléctrica fuerte e inteligente de una manera integral. Ésta nueva estructura permitirá mejorar y optimizar el rendimiento de la red de forma significativa con respecto a la asignación de recursos, nivel de seguridad, eficiencia de operación, y la interacción entre la red de transmisión eléctrica, la generación de energía, y los clientes.

En los últimos años China ha tenido progresos significativos en el desarrollo de redes inteligentes, especialmente en la transmisión UHV. Sin embargo, en otros aspectos como la generación distribuida, las micro redes y la gestión inteligente de la demanda, el progreso es mucho más lento pero no poco significativo para el entorno mundial. En consecuencia, con las nuevas regulaciones y las políticas que se están desarrollando para el sector en energético en China y los avances tecnológicos que tiene a la fecha desempeña un papel central en la implementación de las redes eléctricas inteligentes a

nivel mundial y contribuye en gran medida con la integración de las diferentes fuentes de energías renovables a los sistemas de potencia (Lin et al., 2013).

4.2 Reino Unido

El mercado energético del Reino Unido ha sido considerado como uno de los más competitivos de la Unión Europea (UE), con un gran número de productores, operadores de sistemas y proveedores. Su red eléctrica fue construida entre 1950 y 1960 para incorporar la generación a partir de combustibles fósiles como el carbón. Hoy en día éste tipo de generación de electricidad representa un alto porcentaje de las emisiones de CO₂, que van en contra de la Directiva de Energías Renovables de la UE para el 2020, la cual establece que el 15% de la energía consumida debe ser proporcionada por fuentes de energía renovables (Crispim, Braz, Castro, & Esteves, 2014).

La entidad responsable de la regulación del sector es la Oficina del Gas y los mercados de electricidad (OFGEM). Como un regulador independiente, sus facultades incluyen la emisión, modificación y ejecución de las licencias existentes, así como el ajuste de los precios para los gestores de redes de transporte (GRT) y los operadores de sistemas de distribución (GRD). Ante el compromiso adquirido con la UE de disminuir las emisiones de CO₂ e incrementar las generaciones provenientes de fuentes renovables, ésta entidad ha sido parte activa en la búsqueda de soluciones. En el 2010 la OFGEM después de dos años de trabajo, presentó un nuevo modelo de regulación denominado RIIO (Revenue: incentives + innovation + outputs), que significa ingresos mediante incentivos para motivar la innovación y nuevas alternativas. El nuevo modelo busca que todos los integrantes del sector eléctrico trabajen por un sector de energía sostenible, con valor agregado a largo plazo y añadiendo estímulos para la innovación (Crispim et al., 2014).

Además de la regulación, para alcanzar los objetivos propuestos, el Reino Unido ha destinado una parte significativa de sus inversiones e investigaciones en los hogares como usuarios finales del servicio. Ésta promoviendo la filosofía de hogares carbono cero mediante la cual la demanda energética de un hogar se compara con la energía renovable instalada en el mismo. Para motivar este cambio creo el incentivo RHI o incentivo de calor renovable, el cual proporciona una tarifa fija por unidad de energía térmica producida a partir de diversas tecnologías bajas en carbono, como las calderas

de biomasa, bombas de calor geotérmicas y solar térmica en propiedades domésticas (Balta-Ozkan, Davidson, Bicket, & Whitmarsh, 2013).

Incentivados por los cambios en la regulación y las nuevas tecnologías, cada día más hogares del Reino Unido buscan la forma de ser hogares inteligentes y sin pensarlo contribuyen en gran medida con los objetivos trazados al 2020 en relación a la política energética y de cambio climático. Los jefes de hogar basados en la información de consumo de energía en tiempo real, apoyan el funcionamiento de la red eléctrica ejecutando control y gestión sobre sus demandas de energía, implementando sistemas de generación locales y ajustando sus hábitos de consumo a los horarios donde los precios de la energía sean acordes a sus necesidades. Ésta situación equilibra los picos de demanda y hace que el sistema sea más estable (Balta-Ozkan et al., 2013).

El Reino Unido se encuentra en una fase inicial, en términos de actuación para el desarrollo de una red inteligente, pero lo mismo puede decirse de la mayoría de los países. Lo que hace interesante el Reino Unido es que se encuentra en una etapa de descubrimiento de las posibles dificultades que implica la interacción de las redes inteligentes en una industria donde el suministro de electricidad es altamente liberalizado y competitivo (Connor et al., 2014).

4.3 Italia

Para el año 2010, la demanda de electricidad en Italia estaba por encima de 300 TWh, y era necesario realizar importaciones debido a que la producción nacional solo cubría el 86% de la demanda. Al ser un mercado liberalizado, cada consumidor residencial o comercial escoge su proveedor entre los operadores locales de distribución. Los operadores que más sobresalen en el mercado son: Enel Distribuzione con el 86% del volumen total de distribución, seguido por A2A Reti Elettriche (4%), Acea Distribuzione (3,4%) y AEM Torino Distribuzione (1,3%) (Coppo et al., 2014).

De acuerdo con el regulador italiano "Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas" (AEEG), para el 2011 alrededor del 30% de la producción de electricidad del país provenía de fuentes de energía renovables (FER), con un aporte mayoritario de generaciones hidráulicas. No obstante, para esta fecha se presentaba un incremento significativo en la generación de energía a partir de tecnologías fotovoltaicas, biomasa y viento, motivado

principalmente por el sistema de primas favorables desarrollado por el gobierno. Estos nuevos sistemas se implementaron principalmente en el centro y sur de Italia y fueron conectados directamente a la red de distribución generando problemas de intermitencia (Lo Schiavo et al., 2013).

Estos problemas no fueron considerados cuando se liberalizó el mercado Italiano en 1999, la AEEG a esa fecha no había establecido reglas claras para la operación con múltiples fuentes de generación intermitentes y existía un sistema de primas sin penalizaciones que pretendía subir los niveles de calidad para áreas de alto, medio y bajo nivel de concentración de clientes. Hoy en día se ha actualizado la normatividad tanto para los clientes como para los generadores asegurando el acceso a la red eléctrica de forma no discriminatoria. (Hammons, 2008).

Sin embargo, ésta normatividad se ha visto impacta por los objetivos europeos para la producción de energía renovable y la eficiencia general del sistema, desarrollando una nueva dinámica a la actividad de AEEG, en la cual se plantea la necesidad de considerar la integración de la generación distribuida (DG) y los proveedores de energía renovable a gran escala, estimular las medidas de eficiencia en el lado de la demanda, y permitir los usos innovadores de la energía, como la movilidad eléctrica (Lo Schiavo et al., 2013).

Ante esta nueva dinámica la AEEG promueve entre las empresas de distribución la implementación de proyectos pilotos y programas de despliegue de contadores inteligentes, para que el cliente participe de una manera más activa en el sistema y las empresas recuperen su inversión a través de las tarifas. Uno de los proyectos más exitosos tanto para la empresas como para los clientes fue el Time of Use (TOU), el cual fue puesto en funcionamiento en el 2012 por la AEEG y consiste en tarifas para los consumidores residenciales y comerciales afectadas por la hora del día en que utilice la energía, creando poco a poco conciencia en los consumidores de las diferencias en el precio de la energía a lo largo del día y dando lugar a cambios en los hábitos de consumo (Lo Schiavo et al., 2013).

Entre los proyectos pilotos que se destacan en Italia y que han sido implementados por las empresas distribuidoras locales se encuentran:

4.3.1 Enel Distribuzione

Enel Distribuzione lleva a cabo un proyecto cuyo objetivo es combinar la generación de recursos energéticos distribuidos con una gestión confiable y segura del sistema en condiciones reales de operación. El proyecto ofrece un nuevo enfoque para la gestión de la generación distribuida, que supervisa la participación activa de los distribuidores y clientes. El proyecto incluye la instalación de casi 8.000 dispositivos 'inteligentes Info' para los clientes conectados a la red de baja tensión. Estos dispositivos suministrarán información sobre los cambios en el precio de la energía basado en intervalos de tiempo, promoverán el uso eficiente de la energía y aumentarán la participación activa del cliente en la gestión del sistema. Por último, el proyecto representará una prueba de campo real de un modelo innovador para la protección, automatización y gestión de generación de energía en la red de distribución (Coppo et al., 2014).

4.3.2 ACEA

El proyecto llevado a cabo por la ACEA, está situado en el centro de Italia, tiene como fin realizar un prototipo de red inteligente real, que pueda ser replicable en todo el sistema eléctrico italiano. Por esa razón, el proyecto se implementa en un tramo de la red actual de media tensión, que incluye 2 subestaciones primarias, 28 MVA de generación distribuida y más de 1.000 usuarios finales de baja tensión. El proyecto se centra en la automatización avanzada de la red de media tensión, la optimización de los perfiles de tensión de alimentación, gestión de flujo de energía, minimización de las pérdidas y el diagnóstico de los componentes primarios de subestaciones (Coppo et al., 2014).

4.3.3 DEVAL

El proyecto propuesto por DEVAL, se encuentra en la región de los Alpes y consiste en la reestructuración de una red de media tensión existente mediante el empleo de tecnologías innovadoras que permitan el funcionamiento de la red activa con especial atención a los requisitos de normalización y unificación, reduciendo los costos al mínimo (Coppo et al., 2014).

4.3.4 A2A

A2A se enfocó en el norte de Italia, y está llevando a cabo dos proyectos en los cuales aplica los mismos conceptos a diferentes contextos de la red. Las principales características de los proyectos son: la automatización avanzada de red, la selectividad lógica entre los usuarios finales y la supervisión y gestión de la generación distribuida basándose en la previsión de producción y control en tiempo real (Coppo et al., 2014).

Todos los proyectos han tenido una excelente evolución y aunque muchas de las funciones son comunes a todos, su diseño y realización es en diferentes partes de la red con características particulares para cada caso, por lo tanto toda la información obtenida en cada uno de ellos es valiosa y de alta aplicabilidad para la estandarización de las diferentes funcionalidades probadas (Coppo et al., 2014).

Tomando como insumo los resultados obtenidos en diferentes pruebas piloto, en el año 2013 Italia adoptó la nueva Estrategia Nacional de Energía ("Strategia Energetica Nazionale", SEN), que busca la eficiencia energética, el desarrollo sostenible de las fuentes de energía renovables y el despliegue redes inteligentes de distribución de energía eléctrica como prioridad para una baja emisión de carbono, fomentando el crecimiento al tiempo que garantiza la seguridad del suministro en el mediano (2020) y largo plazo (2050) (Balta-Ozkan, Boteler, & Amerighi, 2014).

En su enfoque hacia las redes eléctricas inteligentes, Italia ha ideado un esfuerzo estructurado que se basa en el conocimiento de sus instituciones y crea incentivos para el desarrollo de soluciones sostenibles. El uso de una remuneración adicional para las inversiones relacionadas con las redes inteligentes es consistente con los modelos que ya están en uso para las mejoras relacionadas con la calidad y la eficiencia del servicio. Por otra parte, el ciclo de realimentación creado para el análisis de resultados de los programas piloto proporciona las herramientas necesarias para la construcción de un enfoque completamente avalado para una futura implementación (Crispim, Braz, Castro, & Esteves, 2014).

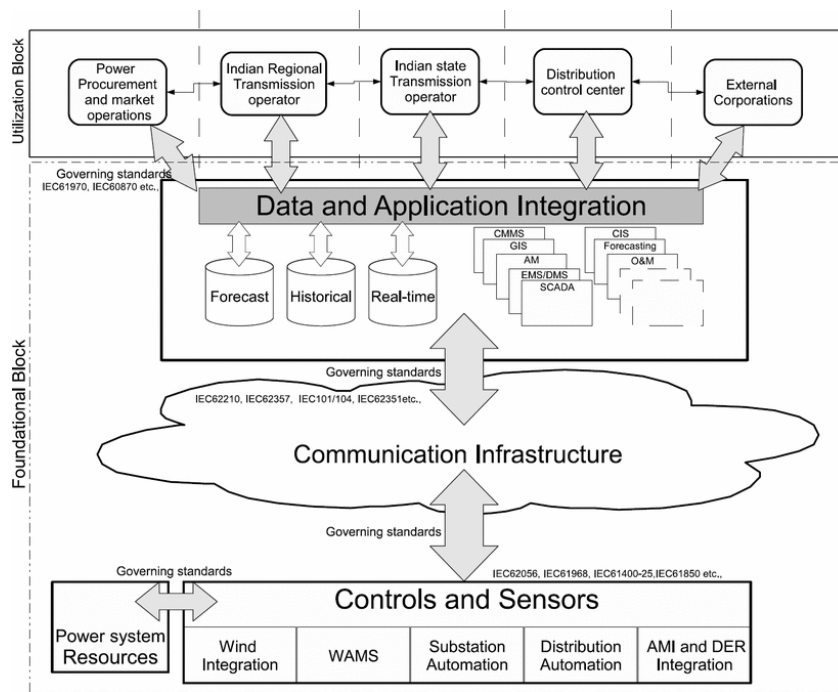
4.4 India

La India es un país que tiene concentrados todos sus esfuerzos en la implementación de redes eléctricas inteligentes por tres razones fundamentales: la primera es el elevado

índice de robo de electricidad generado por las altas tasas de pobreza y la desprotección actual de la red. La segunda es el aumento en la tasa de crecimiento de la demanda de electricidad tanto a nivel urbano como rural y la tercera está dada por las pérdidas que se generan en los sistemas de transmisión y distribución, las cuales suman aproximadamente el 26 por ciento de la producción total y es considerada como la tasa más alta de pérdidas a nivel mundial (Samantaray, 2014).

La red de energía eléctrica de la India necesita ser sometida a una transformación para la implementación de las redes eléctricas inteligentes, por lo tanto el gobierno estructuró una política energética que permite regular la inversión y crear consciencia en todos los habitantes de la necesidad de implementación y del uso adecuado que se le debe dar a la nueva red (Fadaeenejad et al., 2014).

Figura 4-2: Proposed Smart Grid Architecture Indian Power Systems (Balijepalli, Khaparde, & Gupta, 2009)



Además del gobierno, otras organizaciones de la India, como el Foro de Redes Inteligentes (SGF) en coordinación con el Grupo de Redes inteligentes realizan asesorías a todo aquel que se encuentre interesado en el tema y tienen conformados varios grupos de trabajo que comprenden todas las áreas de interés en el ámbito de las redes

eléctricas inteligentes. Los grupos de trabajo son: transmisión avanzada, distribución avanzada, comunicaciones, medición, consumo y control de carga, política y regulación, y arquitectura y diseño (El-hawary, 2014).

Estos grupos interdisciplinarios trabajan de la mano del gobierno en los proyectos de redes inteligentes y definieron unos objetivos que buscan que el sector de la energía eléctrica de la india sea seguro, adaptable, sostenible, amigable con el ambiente, y monitoreado digitalmente de tal forma que proporcione una energía de calidad para todos. Los objetivos se enumeran a continuación (Samantaray, 2014):

- Fin al reparto de carga: implementación de sistemas de gestión dinámicos para la demanda que permitan el cambio de la carga máxima a través de la combinación de control y precios diferenciales en el sistema.
- Energía confiable: sistemas robustos con capacidad de auto recuperación de fallas fundamentados en el monitoreo en tiempo real.
- Electricidad más barata: con la implementación de nuevas tecnologías se busca mejorar el conjunto de infraestructura, rendimiento y monitoreo, minimizando las pérdidas y el costo de mantenimiento del sistema.
- Mover el pico de la demanda donde sea menos costoso: con las nuevas herramientas de gestión se pretende realizar una mejor utilización de los activos y distribución de las cargas.
- Energía más sostenible: se busca la integración energías renovables en una escala masiva, lo suficiente para aumentar la independencia energética.

Para alcanzar estos objetivos se han desarrollado varias iniciativas que van acorde a las normas internacionales y que han posicionado a la India como el país en vía de desarrollo pionero en redes eléctricas inteligentes. La primera iniciativa implementada con resultados favorables fue la automatización de un sistema de distribución rural, su objetivo era mejorar el desempeño real de la red en términos de reducción de pérdidas mediante la adopción de tecnologías de la información y el fortalecimiento de las redes de transmisión y distribución. El primer paso lo dio el gobierno pero ante los resultados, las empresas de distribución locales como como NDPL, BESCO, REL y DHBVNL tomaron la iniciativa y continuaron con la implementación de estas tecnologías en sus redes (Balijepalli et al., 2009).

La red eléctrica en la India ha sido débil en comparación con otros países, pero con la motivación de las empresas de energía locales se han ido construyendo redes inteligentes orientadas al cliente, y que a su vez permiten aumentar la capacidad del sistema, mejorar la eficiencia energética, la confiabilidad y la calidad del suministro. Asimismo se están implementando conjuntamente con las redes, sistemas de gestión de carga y medición avanzada que permiten reducir las pérdidas comerciales y sistemas de automatización para supervisar y controlar el flujo de la energía desde y hacia las cargas en tiempo real (El-hawary, 2014).

A pesar de los avances significativos que ha tenido la India en la implementación de redes inteligentes, aún tiene muchos vacíos en los temas de normalización y regulación, cruciales para el óptimo funcionamiento del sistema eléctrico. El mayor problema que se presenta hoy en día como consecuencia de esos temas sin tratar, es la no interoperabilidad entre los diferentes sistemas de automatización debido a que cada una de las empresas de distribución ha implementado tecnologías propietarias de diferentes proveedores que no conversan con de los demás distribuidores (Balijepalli et al., 2009).

4.5 Estados Unidos (EE.UU.)

La demanda de energía eléctrica en los EE.UU. se pronostica creciendo a una tasa anual de aproximadamente el 1% de 2009 a 2030; por lo tanto, se espera que el consumo de energía eléctrica se incremente de 3.764 millones de kWh a 4.748 millones de kWh aproximadamente en el mismo período de tiempo. Asimismo se tiene la expectativa de que la capacidad instalada en los EE.UU. crecerá a 260 GW distribuidos de la siguiente forma: 25% proveniente de fuentes renovables; 18% utilizará carbón, aproximadamente el 5% serán plantas nucleares; y el 52% restante probablemente utilizará gas natural como fuente de combustible (Suryanarayanan, 2010).

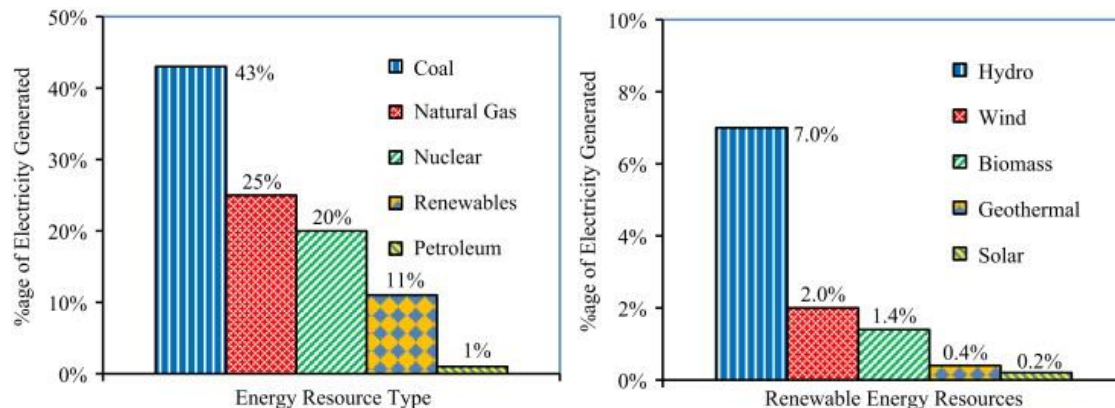
Con estas perspectivas presentes, el Congreso de Estados Unidos en el año 2007 aprobó la Ley de seguridad e independencia energética en la cual se describen los objetivos específicos para el desarrollo de redes eléctricas inteligentes en esa nación. En síntesis, es una política que apoya la modernización de la red eléctrica tanto del sistema de transmisión como del sistema de distribución para mantener una infraestructura

confiable y apta para satisfacer las necesidades futuras de crecimiento de la demanda (Massoud Amin, 2011).

EE.UU. al igual que China, con los cambios en las políticas de regulación y algunos proyectos piloto que ha desarrollado, es considerado como uno de los países pioneros en el tema de redes eléctricas inteligentes. Sin embargo tiene dos falencias que le han impedido ir más adelante. La primera de ellas son las regulaciones interestatales que deben ser modificadas de tal forma que se pueda unificar la planeación y los costos de asignación en la red. La segunda está dada por la infraestructura principal de transmisión que tiene poca inversión y sus activos presentan obsolescencia tecnológica, por lo tanto son incompatibles con los nuevos equipos disponibles en el mercado para redes eléctricas inteligentes. Ante estas dificultades EE.UU. ha disminuido recursos para las investigaciones en transmisión y se ha enfocado principalmente en desarrollos y recomendaciones para el lado de la distribución eléctrica (Lin et al., 2013).

Las nuevas políticas de regulación que plantea el estado promueven el uso de las energías renovables, como la eólica y la solar debido a que tienen un impacto ambiental positivo, favoreciendo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo la integración de estas tecnologías a la red de energía eléctrica afecta negativamente la infraestructura de distribución, la cual no se encuentra preparada para escenarios de generación descentralizada (Koenigs et al., 2013).

Figura 4-3: Generación USA (Osmani, Zhang, Gonela, & Awudu, 2013)



Para mitigar este impacto negativo, el estado incentiva las investigaciones que permitan el fortalecimiento de la red en los campos de integración, operación y control de la

generación distribuida por energías renovables. Asimismo impulsa el perfeccionamiento de los dispositivos creados para el almacenamiento local de la energía generada (Massoud Amin, 2011).

En síntesis, el gobierno de EE.UU. tiene como principal objetivo actualizar la infraestructura de transmisión y distribución del país de tal forma que pueda estar a la vanguardia con la apertura de mercados para las energías alternativas, la generación descentralizada y la innovación en el campo de las redes eléctricas inteligentes. Por otra parte busca incrementar la confiabilidad, la seguridad y la eficiencia del sistema interconectado con la implementación de tecnologías de punta en las áreas de control, comunicación e intercambio de información (Lin et al., 2013).

4.6 Brasil

El mercado brasileño de energía está basado en la generación centralizada y su sector eléctrico es gestionado por las acciones e iniciativas de las empresas de servicios públicos y los reguladores como la Agencia Reguladora (ANEEL - Agencia Nacional de Energía Eléctrica) y el operador del sistema nacional (ONS) (Galo, Macedo, Almeida, & Lima, 2014).

Brasil es el quinto país más grande del mundo y el 80% de su producción de energía se genera a través de plantas hidráulicas. En consonancia con su desarrollo y el crecimiento proyectado de la mayoría de sus sectores económicos, se espera que su demanda de energía eléctrica crezca a un ritmo constante del 4,8% hasta 2020 (Suryanarayanan, 2010)

Actualmente los sistemas eléctricos de generación y transmisión de Brasil están supervisados por sistemas automatizados que utilizan tecnología digital para controlar los procesos de consumo, hacer mandos remotos a los diferentes equipos y supervisar las condiciones de funcionamiento en tiempo real. Sin embargo, la realidad del sistema de distribución es muy diferente, debido a su complejidad y al elevado número de consumidores, la automatización de estos sistemas está apenas iniciando con proyectos piloto y su gestión se sigue realizando de forma convencional (Galo et al., 2014).

La Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL) y el Ministerio de Minas y Energía (MME), en conjunto con los distribuidores nacionales, fabricantes, institutos de investigación, entre otros, están en el proceso de crear un modelo nacional de redes inteligentes que cumpla el perfil del consumidor brasileño y permita usar la infraestructura existente, con todas sus virtudes y defectos. Para este propósito se están llevando a cabo varios proyectos pilotos que se enumeran a continuación (Galo et al., 2014):

4.6.1 Sete Lagoas (Minas Gerais)

La concesión CEMIG ha estado llevando a cabo un proyecto denominado "Ciudades del futuro" desde 2009, que analiza la capacidad y los beneficios de la adopción de una arquitectura de red inteligente basada en pruebas del sistema eléctrico de la ciudad. El proyecto analiza la viabilidad de expansión para el área de concesión de Cemig y evalúa los productos, servicios y soluciones disponibles en el mercado (Galo et al., 2014).

4.6.2 Aparecida (São Paulo)

El Grupo EDP Bandeirante (EDP Energias de Portugal Group) está implementando un proyecto piloto llamado INOVACITY (innovación social y movilidad eléctrica). El cual busca analizar la viabilidad de un conjunto de tecnologías que permitan una mayor eficiencia y calidad en la prestación de los servicios al cliente, incluyendo la medición inteligente, alumbrado público eficiente, micro-generación con fuentes de energía renovables y la movilidad eléctrica así como un conjunto de acciones de eficiencia energética y la educación de las comunidades locales (Galo et al., 2014).

4.6.3 Buzios (Rio de Janeiro)

La concesión Ampla tiene un proyecto en curso que tiene como objetivo racionalizar el consumo y reducir las pérdidas de electricidad para hacer la ciudad sostenible, racional y eficiente. Se realizaron inversiones en las líneas de transmisión y distribución de energía, la instalación de contadores inteligentes y generación de electricidad a partir de fuentes más sostenibles, como la eólica y la solar (Galo et al., 2014).

4.6.4 Parintins (Amazonas)

El Grupo Electrobras tiene un proyecto en curso en el que han instalado sensores en varios puntos de la red de distribución que facilitan la intervención inmediata del proveedor en caso de fallos del sistema. Por otra parte, se están monitorizando los datos por sectores, como el tiempo de consumo y el costo en diferentes momentos del día. Éste proyecto busca motivar la población a aumentar su consumo fuera de las horas pico de demanda (Galo et al., 2014).

Aunque todos los proyectos anteriormente mencionados han arrojado resultados favorables para la implementación de las redes eléctricas inteligentes, Brasil no posee los recursos para realizar este proceso en el corto plazo. Por lo tanto, la implementación se debe dar durante un período prolongado (Galo et al., 2014).

Hoy en día se analizan cuáles serían los sistemas a intervenir inicialmente de tal forma que impliquen poca inversión pero que generen valor agregado a los clientes y al sistema. Para estas primeras intervenciones se utilizarían los fondos públicos destinados a la reducción de las emisiones de carbono y el efecto invernadero, buscando mitigar dos factores fundamentales que motivan la implementación de este tipo de redes, el fraude y las conexiones ilegales al sistema (Drude, Pereira Junior, & Rütther, 2014).

4.7 Conclusión

Después de realizar un recorrido por la literatura internacional se percibe que a nivel mundial se están desarrollando nuevas tecnologías y sistemas de integración para redes eléctricas inteligentes. Sin embargo, hace falta más intervención de los gobiernos tanto en investigación y desarrollo como a nivel regulatorio.

Existen motivaciones comunes que fomentan la implementación de las redes inteligentes como el crecimiento de la demanda de energía eléctrica, la obsolescencia tecnológica de las redes que están hoy en servicio y las políticas gubernamentales que buscan revertir los efectos negativos del cambio climático e incentivar la generación a partir de fuentes renovables. A continuación se presentan las tablas de la 4-1 a la 4-6, las cuales resumen las principales características de los países estudiados en forma comparativa:

Tabla 4-1: Principal motivación para implementar redes eléctricas inteligentes

	MOTIVACIÓN		
	Obsolescencia Tecnológica	Crecimiento de la Demanda	Compromiso Internacional (Cambio Climático)
Estados Unidos		X	X
China		X	X
Reino Unido		X	X
India	X	X	
Brasil		X	X
Italia		X	X

Tabla 4-2: Generación a partir de fuentes renovables

	GENERACIÓN A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES					
	Eólicas	Biomasa	Solar	Geotérmica	Hidroeléctricas	Mareas
Estados Unidos	X		X		X	
China	X		X	X	X	X
Reino Unido	X	X	X	X	X	X
India			X		X	
Brasil	X	X	X		X	X
Italia	X		X		X	

Tabla 4-3: Cambios en el Marco Regulatorio e Incentivos

	MARCO REGULATORIO - INCENTIVOS					
	Generación	Transmisión	Distribución	Industria emergente	Modificación Canasta Energética	Tarifas usuario final / Aranceles a instalación
Estados Unidos	X	X	X	X	X	X
China	X	X		X	X	X
Reino Unido	X	X	X	X		X
India			X	X		X
Brasil			X	X		X
Italia	X		X	X		X

Tabla 4-4: Metas conjuntas a nivel internacional

	METAS INTERNACIONALES		
	Disminución emisión CO2	% Generación fuentes renovables	Cooperación en I+D
Estados Unidos	X	11%	X
China	X		
Reino Unido	X	10,8%	
India			X
Brasil	X	80%	
Italia	X	30%	X

Tabla 4-5: Retos presentes para la implementación de redes eléctricas inteligentes

	RETOS				
	Infraestructura redes eléctricas	Infraestructura redes de comunicaciones	Administración del sistema	Estandarización e interoperabilidad	Automatización de la red y sus componentes
Estados Unidos	X	X	X	X	X
China	X	X	X	X	X
Reino Unido	X	X	X	X	X
India	X	X	X	X	X
Brasil	X	X	X	X	X
Italia	X	X	X	X	X

Tabla 4-6: Implementación de redes eléctricas inteligentes

	IMPLEMENTACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES					
	Transmisión eléctrica a grandes distancias	Implementación de medidores inteligentes	Implementación de medidores fasoriales	Clasificación de usuarios (afectación y criticidad)	Desplazamiento de horas pico de la demanda	Implementaciones en la red de transporte
Estados Unidos	X	X	X	X	X	X
China	X	X	X	X	X	X
Reino Unido		X	X	X	X	X
India		X	X	X		
Brasil		X	X	X		
Italia		X	X	X	X	

En síntesis, se puede decir que hay varios enfoques hacia las redes inteligentes a nivel mundial. El primero de ellos, es el que tienen la mayoría de países europeos y consiste en definir y reestructurar el marco regulatorio del sector eléctrico y a medida que se van dando los cambios en la regulación, realizar inversiones en desarrollos que se ajusten a las nuevas políticas. Por otra parte se encuentra el enfoque que tienen los países latinoamericanos y algunos orientales como la India, en el cual se realizan desarrollos y pruebas piloto principalmente en el campo de la distribución eléctrica y acorde a los resultados obtenidos se define la nueva regulación y se crean incentivos para llevarlos a cabo. Por último se encuentra el caso de China que ha enfocado sus investigaciones y pruebas en el tema particular de la transmisión eléctrica a grandes distancias, empleando corriente directa, se ha convertido en precursora de este tema y se contrapone de forma positiva a las investigaciones de Estados Unidos en redes flexibles de transmisión eléctrica de corriente alterna, las cuales también fueron diseñadas para transmisiones de energía a largas distancias.

Aunque son diferentes, todos los enfoques planteados tienen un fin común que son las redes eléctricas inteligentes, y los resultados se pueden evidenciar en el perfeccionamiento que han tenido los diferentes dispositivos que conforman la red de distribución eléctrica y que hoy en día permiten tener un sistema más confiable y una interacción bilateral con el usuario final. Sin embargo, han sido muy pocas las

investigaciones que se han orientado a la red de transmisión y a las consecuencias que puede traer en el largo plazo la implementación de estos nuevos desarrollos en el sistema eléctrico interconectado de cualquier país.

Para finalizar el trabajo a continuación se presenta un capítulo enfocado en Colombia, en el cual se habla de las lecciones aprendidas de otros países aplicables a este, la evolución que ha tenido en el tema de las redes inteligentes y las perspectivas futuras que se tienen.

Capítulo 5. Redes eléctricas inteligentes en Colombia

5.1 Lecciones aprendidas: Del mundo para Colombia

Las redes eléctricas inteligentes son un concepto que se está desarrollando a nivel mundial, pero en algunos países de forma más acelerada que en otros. Colombia, es uno de aquellos que apenas está incursionando en este tema, por lo tanto, las lecciones aprendidas de aquellos que están a la vanguardia facilitan la adaptación de estos nuevos conceptos y tecnologías a su sistema.

5.1.1 Oportunidades

- Integración de fuentes renovables y usuarios del sistema

Las redes eléctricas inteligentes permiten la integración de la generación a partir de fuentes no convencionales, mejorando la calidad de la energía y disminuyendo la emisión de gases que causan efecto invernadero, por lo tanto son amigables con el ambiente. Asimismo hacen que los consumidores participen como agentes activos en el sistema eléctrico, disminuyendo los picos de la demanda con los cambios en sus hábitos de consumo y mejorando la eficiencia de la red (Phuangpornpitak & Tia, 2013).

- Sistemas de comunicación bidireccional avanzada

El flujo bidireccional de energía eléctrica y de la información, es la columna vertebral de la red eléctrica inteligente y las comunicaciones avanzadas son el componente esencial que permite esta interacción. El desarrollo de las redes inteligentes es la oportunidad para invertir en redes de telecomunicaciones de última tecnología a través de sinergias entre los proveedores del sector eléctrico y los del sector de las telecomunicaciones como una relación de mutuo beneficio (Luthra et al., 2014).

- Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía ha tenido algunos avances pero aún se puede decir que está en la fase inicial. Es un tema vigente que brinda flexibilidad a la red, posibilidad de balancear la carga y optimización de los recursos de generación (Colak et al., 2014).

5.1.2 Retos

- Integración de energías renovables al sistema

Aunque es una oportunidad, la integración de energías renovables a los sistemas de potencia también se ha convertido en reto, puesto que implica diseñar soluciones tecnológicas que disminuyan las oscilaciones que inyectan este tipo de generaciones a la red causando cambios en la frecuencia de la misma (Phuangpornpitak & Tia, 2013).

- Inversión

La implementación de redes eléctricas inteligentes implica una inversión inicial muy alta pero con un período de recuperación muy largo, lo cual hace que en muchos casos los gobiernos no estén dispuestos a desembolsar la totalidad de la inversión requerida y ésta deba realizarse de forma segmentada. Para los países en vía de desarrollo es un tema mucho más complejo por los problemas sociales que enfrentan y la escasez de recursos financieros disponibles para modernizar las redes que conforman el sistema eléctrico (Luthra et al., 2014).

- Modificación del marco regulatorio

La mayoría de los países regulan sus mercados eléctricos con políticas establecidas en marcos regulatorios diseñados años atrás, que eran idóneos para esa época pero hoy en día son obsoletos. Estos sistemas normativos deben ser modificados para incluir los nuevos retos que presentan las redes eléctricas inteligentes, teniendo en cuenta incentivos que fomenten la generación a partir de fuentes renovables, los estándares que permitan la interacción de forma bilateral con otros países y los beneficios vía tarifas para los usuarios que pasan a ser agentes activos de la red (Luthra et al., 2014).

- Sensibilización del consumidor

Los consumidores necesitan ser educados a través de programas de sensibilización, en los cuales se les presenten los beneficios de las redes inteligentes, de la comunicación bilateral con sus proveedores de servicios y de la información del sistema en tiempo real. Este proceso debe ser realizado reiterativamente para evitar que los consumidores activos se desmotiven con el uso de la red por desconocimiento o malas experiencias y para capturar nuevos usuarios (Luthra et al., 2014).

- Seguridad de la red y protección de datos

Las redes de comunicaciones desempeñan un papel muy importante en las redes inteligentes, permiten la comunicación bilateral y la adquisición de datos en tiempo real. Pero, al mismo tiempo, proporcionan vulnerabilidad a la red y comprometen la privacidad de los usuarios, por lo tanto se deben implementar sistemas de ciberseguridad que permitan prevenir y mitigar los ataques cibernéticos (Luthra et al., 2014).

5.1.3 Barreras

- Poca interacción entre proveedores de la red eléctrica y la red de telecomunicaciones

La falta de coordinación entre los proveedores de energía eléctrica y los de telecomunicaciones hace que la implementación de redes eléctricas inteligentes sea poco efectiva y en algunos casos traumática para los usuarios finales por los inconvenientes que deben tolerar. Se deben fomentar las alianzas entre los diferentes proveedores de servicios de la red inteligentes para minimizar los contratiempos e incentivar su uso (Luthra et al., 2014).

- Justificación de las tarifas al cliente

La implementación de medidores inteligentes y las comunicaciones bilaterales entre el cliente y el proveedor del servicio, suelen aumentar las tarifas. Si el consumidor no recibe la sensibilización necesaria, puede volverse reactivo al cambio de tecnología y convertirse en una barrera para la evolución de la red (Phuangpornpitak & Tia, 2013).

- Falta de personal calificado

Las empresas de servicios públicos encuentran una barrera para la adopción de tecnologías de redes inteligentes en los conocimientos técnicos que debe adquirir el personal, debido a que no solo debe conocer perfectamente el sistema eléctrico sino también las nuevas tecnologías que hay en el mercado para la modernización de la red. Por lo tanto deben capacitar a sus empleados más antiguos y buscar en el mercado empleados nuevos que cumplan con esos requerimientos y la oferta no es muy amplia (Luthra et al., 2014).

- Interoperabilidad

Hoy en día hay muchos estándares propietarios que están en servicio en las redes inteligentes, y deben ser sustituidos por estándares abiertos que permitan la interoperabilidad con cualquier fabricante, para incentivar la innovación industrial y no limitar a un solo proveedor los dispositivos de la red. Se deben establecer normas y directrices que promuevan la interoperabilidad y los estándares abiertos (Luthra et al., 2014).

5.1.4 Desarrollos tecnológicos

Los dispositivos y las tecnologías para las redes inteligentes están en continuo desarrollo y perfeccionamiento, por lo tanto, se debe estar consultando la literatura constantemente para verificar cuáles de ellas están a la vanguardia. A continuación se mencionan dos desarrollos que han permanecido vigentes desde el inicio de las redes inteligentes y continúan su evolución, por lo tanto deben ser tenidos en cuenta para futuros desarrollos en Colombia.

- Flexible AC Transmission (FACTS)

Son una familia de dispositivos de estado sólido para el control de potencia en las redes de alta tensión. Estos controladores pueden aumentar la capacidad individual de las líneas de transmisión hasta en un 50% y mejorar estabilidad del sistema minimizando los tiempos de recuperación ante contingencias. Actualmente son muy poco usados debido al alto costo que tienen en el mercado (Massoud Amin, 2011).

- **Sistemas de Transmisión de Alta Tensión DC (HVDC):**

Estos sistemas de alta tensión, son usados para transmitir energía eléctrica en extensiones muy grandes de tierra o para cables submarinos. Se basan en la rectificación de la corriente en ambos extremos de la red. Inicialmente se rectifica la corriente alterna (AC) en corriente directa (DC), la cual es enviada a través de la red; en el otro extremo cuando se recibe, la DC es rectificadora a AC, creando un sistema AC/DC/AC (Massoud Amin, 2011).

Actualmente hay más de 35 sistemas HVDC en funcionamiento o en construcción, dentro de los cuales se destaca el cable submarino entre Suecia y Alemania que emplea esta tecnología y tiene una longitud de 250 kilómetros (Massoud Amin, 2011).

5.2 Energías renovables en Colombia

Dada su riqueza en recursos energéticos, Colombia se encuentra en una situación privilegiada frente a otros países. Ésta circunstancia le permite aumentar y diversificar su canasta energética, con nuevos proyectos de energía renovable como una alternativa coherente con los requerimientos de sostenibilidad ambiental, social y económica para el desarrollo energético del país (Carolina, Motta, Aguilar, & Aguirre, 2012).

El Plan Energético Nacional 2013-2027 proyecta un panorama favorable tanto en el consumo como en la capacidad de producción de nuevas tecnologías, sin embargo, plantea un desaprovechamiento del potencial hidroenergético del país debido a que no existe una coordinación en el crecimiento de la capacidad instalada sino que obedece a iniciativas independientes, lo cual genera conflictos entre los proyectos. Ante estas situaciones se hace necesaria la coordinación con las estrategias de los diferentes sectores de la economía, para mejorar el establecimiento de políticas en energías renovables y la generación de incentivos para el sector (UPME, 2013).

5.2.1 Energía solar

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en conjunto con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) desarrollan desde hace varios años un documento denominado “Atlas de Radiación Solar de Colombia” en el cual se

destaca con mapas específicos las zonas más favorables para el desarrollo de proyectos que involucren Energía Solar (Carolina et al., 2012).

Este tipo de energía no es muy utilizada en el país pero fue introducida a mediados del siglo pasado con calentadores solares de agua, instalados inicialmente en Santa Marta y posteriormente en el interior del país durante la crisis del petróleo en la década de los setenta (Carolina et al., 2012).

5.2.2 Energía hidráulica

En Colombia, es el tipo de generación más desarrollado y representa alrededor del 75% de la generación eléctrica del país. Pese a ello, las grandes centrales hidroeléctricas están siendo reevaluadas por los efectos colaterales que ocasionan en el ambiente, como desplazamientos de biodiversidad generados por la inundación de grandes extensiones de tierras, donde se obliga a muchas de las especies a desplazarse o eventualmente a su extinción. Por lo tanto, se está motivando la implementación de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), debido a que disminuyen en gran medida los efectos colaterales para el medio ambiente (Carolina et al., 2012).

5.2.3 Energía eólica

Al igual que para la energía solar, existe un documento denominado “Atlas de Viento y Energía Eólica en Colombia”, desarrollado por el IDEAM con ayuda de la UPME, el cual permite identificar zonas del país y épocas del año favorables para el desarrollo de proyectos eólicos. Los lugares más destacados de Colombia para la implementación de tecnologías a favor de este tipo de energía, con vientos superiores a 5 m/s durante todo el año son: Galerazamba en el Departamento de Bolívar, Gachaneca en Boyacá y la isla de San Andrés en el mar Caribe (Carolina et al., 2012).

A pesar de que Colombia tiene varios lugares potenciales para la implementación de esta generación, aún existe una resistencia ante estos proyectos debido a que su tasa de producción no es determinada sino que oscila dependiendo de la intermitencia de los vientos en la zona. Por tal motivo, el único parque eólico a nivel nacional es Jepirachi, ubicado en el departamento de la Guajira, con una capacidad instalada de 19,5 MW y construido por EPM como proyecto piloto en este tema (Carolina et al., 2012).

5.2.4 Energía por biomasa

El sector de los biocombustibles ha crecido notablemente después de los incentivos aplicados al sector, sin embargo, existe una preocupación por la seguridad alimentaria del país, debido a que con este tipo de generación eléctrica se destinan muchos cultivos de alimentos para la producción de energía y se tienen significativos impactos ambientales al destinar grandes extensiones de tierra para monocultivos. Para mitigar estos impactos se está fomentando la producción de energía a través de la biomasa residual que es aquella obtenida a partir del estiércol de los animales (Carolina et al., 2012).

5.2.5 Energía geotérmica

En 1997 fue perforado el primer pozo Nereidas en el macizo Volcánico del Ruiz para las investigaciones en energía geotérmica. A partir de esta fecha se desarrolló el mapa geotérmico de Colombia que identifica yacimientos termales y la temperatura de los pozos existentes. En ese proceso, se logró identificar otros usos para los pozos además de la generación eléctrica, como la calefacción, lavado y secado de lana, procesamiento de alimentos, fermentación, producción de ácido sulfúrico, industria papelera, manufactura de cemento, entre otras (Carolina et al., 2012).

La implementación de la energía geotérmica en Colombia, está comenzando a desarrollarse con el apoyo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial, administrado por el Banco Interamericano de Desarrollo. El proyecto que están financiando está a cargo del Ministerio de Minas y Energía y la empresa ISAGEN quién será la que lo implemente (Carolina et al., 2012).

5.2.6 Energía oceánica

En Colombia aún no se han implementado proyectos de este tipo, pero se han realizado investigaciones para determinar el potencial de generación en las costas del país y se ha encontrado que en la costa pacífica existen 5 bahías que podrían ser utilizadas para este fin: La Bahía Punta Catripe, Bahía Delta Chavica, Bahía Bocana Raposo, Bahía Boca Naya y Bahía Bocana Armerías. Sin embargo, para aprovechar el recurso energético que

se podría generar allí, se requiere de tecnologías más avanzadas que las que tiene el mercado actualmente (Carolina et al., 2012).

5.2.7 Regulación

En el presente año se publicó la ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales (ERNC) al sistema energético nacional. Con esta nueva normalización, Colombia da un paso importante para fomentar la construcción de un sistema energético limpio, incentivando la penetración de fuentes no convencionales de energía con criterios de sostenibilidad medioambiental, social y económico e involucrando tanto las entidades públicas como privadas que intervienen en el sector (MinMinas, 2014).

La nueva Ley establece incentivos para inversión en generación de energías no convencionales, el marco legal y los instrumentos necesarios para la promoción y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía. Asimismo fomenta la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía; la eficiencia energética y la respuesta de la demanda en el marco de la política energética nacional (MinMinas, 2014).

Esta Ley busca también instaurar planes de actuación que fomenten el aprovechamiento energético de la biomasa agrícola y forestal, los residuos sólidos que no sean susceptibles de reutilización y reciclaje, el recurso eólico en proyectos de generación en Zonas No Interconectadas (ZNI), y el potencial de la geotermia y la energía solar que apenas están en proceso de desarrollo (MinMinas, 2014).

5.3 Futuro del Sistema Interconectado Nacional (SIN)

Para la red de transmisión colombiana, se percibe en el largo plazo la integración de los mercados regionales de Centro y Sur América, un alto porcentaje de generación con fuentes renovables no convencionales, un incremento continuo de la demanda de energía eléctrica y una resistencia a la ampliación del sistema y construcción de nuevas troncales. Esta serie de acontecimientos podrían llevar al SIN al límite y disminuir sus niveles de eficiencia y confiabilidad. Por lo tanto, se han estructurado estrategias y planes

a futuro que permiten mejorar el funcionamiento de la red y mitigar el riesgo falla. Algunos de estos planes se enumeran a continuación (UPME, 2013):

5.3.1 Nuevo nivel de tensión en el SIN

Debido al crecimiento continuo de la demanda de energía eléctrica, se pronostica que en un futuro, la demanda será tan alta que con los niveles de tensión actuales (500 kV y 220 kV) el sistema no será capaz de transportar la generación hasta los centros de consumo. Por tal motivo, se plantea la creación de nuevas troncales de transporte de energía eléctrica con un nivel de tensión de 750 kV. Inicialmente se transformarían algunas de las líneas existentes de 500 kV a 750 kV y dependiendo del comportamiento del sistema y de los nuevos proyectos se harían nuevas implementaciones. Estos cambios, se planea estarán listos en el año 2027. Además de mejorar la transmisión, permitirán disminuir las sobrecargas que se presentan en el sistema cuando hay contingencias en las zonas oriental y caribe del país, sin embargo, la propuesta continua en estudio debido a que con la entrada de nuevos proyectos de generación con ubicación estratégica, se equilibra el sistema y disminuye la exigencia para la red de transmisión (UPME, 2013).

5.3.2 Refuerzo del anillo a 220 kV en Guajira – Cesar – Magdalena

Con el desarrollo de nuevos proyectos en esta zona se incrementa la necesidad de mejorar el sistema interconectado del área. Se plantea instalar los circuitos redundantes para las líneas 220 kV Copey – Fundación y Cuestecitas – Valledupar de tal forma que se garantice la correcta evacuación de la generación durante los períodos de exportación y mejoren los perfiles de tensión ante alguna contingencia. (UPME, 2013)

5.3.3 Redes de transmisión al interior de las ciudades

Hoy en día, al interior de las principales ciudades del país se encuentran en funcionamiento redes de 110 kV y niveles de tensión más bajos, pero ante el crecimiento de la demanda se está estudiando la posibilidad de instalar redes a 230 kV para atender en el largo plazo las exigencias del mercado con criterios de calidad, seguridad y confiabilidad. No obstante, no es una solución definitiva debido a que la construcción de la infraestructura implica altos costos y trae consigo efectos colaterales tanto ambientales como urbanísticos y la instalación de las redes de forma subterránea haría

inviabile el proyecto por los altos costos que demanda. Se estudia la posibilidad de que la infraestructura de distribución pueda ser compartida con transmisión (UPME, 2013).

5.3.4 Dispositivos almacenadores de energía

Con el incremento en los porcentajes de penetración de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), se prevé un aumento en las variaciones de frecuencia del sistema por la intermitencia que presentan las nuevas tecnologías de generación como la eólica. Para mitigar este impacto negativo se plantea la posibilidad de instalar elementos con capacidad para almacenar la energía generada, de tal forma que mantengan un nivel de potencia fijo y la planta siempre pueda entregar a la red el mismo valor de acuerdo a su capacidad de generación. Así se reducirían las oscilaciones e intermitencias del sistema y se podría nivelar la curva de carga almacenando mayor cantidad de energía cuando baje la demanda, optimizando a su vez los recursos de generación (UPME, 2013).

5.3.5 Transformadores desfasadores de fase (PST's)

Los PST's son dispositivos de fácil instalación cuya función principal es incrementar o limitar las transferencias de potencia a través de un circuito determinado, situación que se logra modificando la diferencia angular del voltaje entre dos puntos específicos. En este momento no hay ninguno instalado en Colombia pero su implementación en el SIN está tomando cada día más fuerza debido a las dificultades que se tienen para la construcción de nuevas líneas de transmisión como el licenciamiento ambiental, hallazgos arqueológicos, entre otros. Ya se tienen definidos los puntos críticos donde pueden ser instalados, proporcionando una solución rápida a los problemas de congestión que tiene la red en determinadas zonas del país (UPME, 2013).

5.4 Conclusión

Las redes inteligentes son un conjunto de tecnologías que buscan una interacción bilateral entre los proveedores de servicios de energía eléctrica y los usuarios finales, llevan mucho tiempo en desarrollo pero aún no están completamente concretadas. Colombia ha iniciado varios proyectos de investigación en el tema pero aún le falta mucho por hacer tanto en el campo de la energía eléctrica como en el de las comunicaciones.

Un paso muy significativo fue la Ley 1715 que salió en Mayo del presente año y está enfocada en la generación de energía a partir de fuentes no convencionales, fomentando la inversión y la diversificación del mercado eléctrico en Colombia. Simultáneamente con el cambio regulatorio, el gobierno ha destinado recursos financieros para estudios y análisis del sector que permitan proyectar soluciones a largo plazo de acuerdo a las expectativas de crecimiento de la demanda.

Al igual que otros países en vía de desarrollo, Colombia ha estado influenciada por el movimiento mundial que busca contrarrestar los efectos negativos del cambio climático, disminuyendo las emisiones de CO₂ e incrementado la generación a partir de fuentes renovables. Estas influencias han permitido que el gobierno colombiano incentive las investigaciones e innovaciones en el tema y comience a pensar en soluciones para el SIN que involucren las tecnologías de redes eléctricas inteligentes.

Capítulo 6. Conclusiones

- Con la nueva Ley de energías renovables es el momento oportuno para que el gobierno colombiano promueva en las Zonas No Interconectadas (ZNI) del sistema, la sustitución de combustibles fósiles por fuentes no convencionales para la generación de energía eléctrica, con el objetivo de reducir los costos de generación y las emisiones de gases contaminantes. Las empresas del sector, públicas y privadas han mostrado interés en los proyectos de energías renovables, pero hace falta el acompañamiento del gobierno con incentivos financieros para que estos proyectos sean tangibles.
- Aunque el marco regulatorio colombiano se está ajustando a los cambios del sector eléctrico, se debe tener precaución en la implementación de las nuevas tecnologías desarrolladas para las redes eléctricas inteligentes y no perder de vista los riesgos de seguridad que traen consigo, porque como son redes de interacción bilateral, con información en tiempo real, se incrementa su vulnerabilidad ante cualquier contingencia si no se tienen las previsiones necesarias.
- En Colombia se ha avanzado hasta la fecha en desarrollos y pruebas piloto para el sistema de distribución eléctrica, pero para el sistema de transmisión apenas se están desarrollando los planes a ejecutar en el mediano plazo pensando en una red eléctrica inteligente. De los avances en este campo a nivel internacional, Colombia no ha implementado ninguno y no tiene proyectado hacerlo en el corto plazo.
- La búsqueda de un sistema eléctrico más sostenible, que incluya fuentes no convencionales, disminuya las emisiones contaminantes e incentive el uso de tecnologías inteligentes puede reducir o retrasar la necesidad de inversión en los activos tradicionales y altamente costosos pero de larga duración que conforman el sistema de transmisión, poniendo en riesgo la estabilidad del sistema eléctrico.
- El gobierno colombiano debe continuar con el desarrollo de instrumentos técnicos, jurídicos, económicos, financieros, de planificación y de información, que fomenten el

uso racional y eficiente de la energía, asistidos por campañas de información y concientización para los consumidores.

- Colombia está adaptando a su mercado eléctrico, prácticas exitosas de otros mercados, entre las que ha decidido implementar a la fecha se encuentra el cambio de los hábitos de consumo de los usuarios finales para aplanar la curva de la demanda y disminuir sus fluctuaciones, para mejorar la confiabilidad de la red. Para llevar a cabo esta práctica, se están desarrollando nuevos mecanismos regulatorios que incentiven la respuesta de la demanda.
- Las redes eléctricas inteligentes están en constante cambio a nivel mundial, pero los desarrollos más significativos se encuentran en el área de distribución. Para el campo de la transmisión se destacan los avances que han hecho China y Estados Unidos en transmisión de alto voltaje a gran distancia. China con redes de corriente directa y estados unidos con dispositivos que rectifican la corriente alterna a directa.
- La obsolescencia tecnológica de los activos que conforman el sistema de transmisión nacional, es una de las principales barreras que tienen hoy en día las empresas del sector eléctrico en Colombia, para la implementación de redes eléctricas inteligentes de intercambio bilateral debido a los altos costos de inversión que implica y el poco respaldo por parte del gobierno.
- Las modificaciones que está haciendo el gobierno Colombiano al marco regulatorio para el sector eléctrico favorecen la implementación de redes inteligentes a nivel de distribución e incentivan la participación de los usuarios finales en el sistema, sin embargo, el sector de transmisión eléctrica aún no está lo suficientemente respaldado por la regulación desincentivando a las empresas que conforman este sector para migrar de la red tradicional a una red inteligente.

Bibliografía

- Ancillotti, E., Bruno, R., & Conti, M. (2013). The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges. *Computer Communications*, 36(17-18), 1665–1697. doi:10.1016/j.comcom.2013.09.004
- Balijepalli, V. S. K. M., Khaparde, S. a, & Gupta, R. P. (2009). Towards Indian Smart Grids. *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, 1–7. doi:10.1109/TENCON.2009.5395890
- Balta-Ozkan, N., Boteler, B., & Amerighi, O. (2014). European smart home market development: Public views on technical and economic aspects across the United Kingdom, Germany and Italy. *Energy Research & Social Science*, 3, 65–77. doi:10.1016/j.erss.2014.07.007
- Basak, P., Chowdhury, S., Halder nee Dey, S., & Chowdhury, S. P. (2012). A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5545–5556. doi:10.1016/j.rser.2012.05.043
- Blumsack, S., & Fernandez, A. (2012). Ready or not, here comes the smart grid! *Energy*, 37(1), 61–68. doi:10.1016/j.energy.2011.07.054
- Borlase, S., Bossart, S., Dodrill, K., Heidel, T., Horn, M., Mcdonald, J., ... Woychik, E. (2009). What Is Smart Grid , Why Now ?, 15–60.
- Carolina, D., Motta, O., Aguilar, J. S., & Aguirre, E. H. (2012). UNA REVISIÓN A LA REGLAMENTACIÓN E INCENTIVOS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación Y Reflexión*, XX(2), 55–67. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/909/90925810009.pdf>
- Cespedes, R. (2012). A reference model for the electrical energy system based on Smart Grids. In *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/TDC-LA.2012.6319068
- Colak, I., Bayindir, R., Fulli, G., Tekin, I., Demirtas, K., & Covrig, C.-F. (2014). Smart grid opportunities and applications in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 344–352. doi:10.1016/j.rser.2014.02.009
- Coppo, M., Pelacchi, P., Pilo, F., Pisano, G., Soma, G. G., & Turri, R. (2014). The Italian smart grid pilot projects: Selection and assessment of the test beds for the regulation

of smart electricity distribution. *Electric Power Systems Research*. doi:10.1016/j.epsr.2014.06.018

Crispim, J., Braz, J., Castro, R., & Esteves, J. (2014). Smart Grids in the EU with smart regulation: Experiences from the UK, Italy and Portugal. *Utilities Policy*, 31, 85–93. doi:10.1016/j.jup.2014.09.006

Díaz, D. F., González, J. W., Restrepo, H. A., Isaac, I. A., & López, G. J. (2011). Esquema de incorporación de las Smart Grids en el sistema de potencia colombiano. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 5(1), 21–26. Retrieved from <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/view/798>

Drude, L., Pereira Junior, L. C., & Rütther, R. (2014). Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid (V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazil in a smart grid environment. *Renewable Energy*, 68, 443–451. doi:10.1016/j.renene.2014.01.049

El-hawary, M. E. (2014). The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends. *Electric Power Components & Systems*, 42(3/4), 239–250. Retrieved from 10.1080/15325008.2013.868558

Erlinghagen, S., & Markard, J. (2012). Smart grids and the transformation of the electricity sector: ICT firms as potential catalysts for sectoral change. *Energy Policy*, 51, 895–906. doi:10.1016/j.enpol.2012.09.045

Fadaeenejad, M., Saberian, A. M., Fadaee, M., Radzi, M. A. M., Hizam, H., & AbKadir, M. Z. A. (2014). The present and future of smart power grid in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 828–834. doi:10.1016/j.rser.2013.08.072

Farhangi, H. (2010). The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1), 18–28. doi:10.1109/MPE.2009.934876

Framework, N. I. S. T. (2010). Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards. *NIST Special Publication*, 1108.

Galo, J. J. M., Macedo, M. N. Q., Almeida, L. A. L., & Lima, A. C. C. (2014). Criteria for smart grid deployment in Brazil by applying the Delphi method. *Energy*, 70, 605–611. doi:10.1016/j.energy.2014.04.033

Geelen, D., Reinders, A., & Keyson, D. (2013). Empowering the end-user in smart grids: Recommendations for the design of products and services. *Energy Policy*, 61, 151–161. doi:10.1016/j.enpol.2013.05.107

Hammons, T. J. (2008). Integrating renewable energy sources into European grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30(8), 462–475. doi:10.1016/j.ijepes.2008.04.010

- Hossain, M. R. (2013). *Smart Grid* (pp. 23–44). doi:10.1007/978-1-4471-5210-1_2
- Järventausta, P., Repo, S., Rautiainen, A., & Partanen, J. (2010). Smart grid power system control in distributed generation environment. *Annual Reviews in Control*, 34(2), 277–286. doi:10.1016/j.arcontrol.2010.08.005
- Koenigs, C., Suri, M., Kreiter, A., Elling, C., Eagles, J., Peterson, T. R., ... Wilson, E. J. (2013). A Smarter Grid for Renewable Energy: Different States of Action. *Challenges* (20781547), 4(2), 216–217. Retrieved from 10.3390/challe4020217
- Komor, P., Hoke, A., & Kempener, R. (2014). Seven Steps to a Smarter Grid. *The Electricity Journal*, 27(2), 61–67. doi:10.1016/j.tej.2014.02.001
- Lin, C.-C., Yang, C.-H., & Shyua, J. Z. (2013). A comparison of innovation policy in the smart grid industry across the pacific: China and the USA. *Energy Policy*, 57, 119–132. doi:10.1016/j.enpol.2012.12.028
- Luthra, S., Kumar, S., Kharb, R., Ansari, M. F., & Shimmi, S. L. (2014). Adoption of smart grid technologies: An analysis of interactions among barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 554–565. doi:10.1016/j.rser.2014.02.030
- Massoud Amin, S. (2011). Smart Grid: Overview, Issues and Opportunities. *Advances and Challenges in Sensing, Modeling, Simulation, Optimization and Control. European Journal of Control*, 17(5-6), 547–567. doi:10.3166/ejc.17.547-567
- MinMinas, U. (2014). Ley 1715 de 2014 “ Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional .” In *Expoenergía 2014*. Retrieved from http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/UPME_Expoenergía2014.pdf
- Miranda, D. (2008). *Estado y Desarrollo de la Tecnología Smart Grid en Colombia*. core.kmi.open.ac.uk. Retrieved from <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/11051300.pdf>
- Osmani, A., Zhang, J., Gonela, V., & Awudu, I. (2013). Electricity generation from renewables in the United States: Resource potential, current usage, technical status, challenges, strategies, policies, and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 454–472. doi:10.1016/j.rser.2013.03.011
- Phuangpornpitak, N., & Tia, S. (2013). Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System. *Energy Procedia*, 34, 282–290. doi:10.1016/j.egypro.2013.06.756
- Rodríguez, A. (2009). La Generación Distribuida y su Posible Integración al Sistema Interconectado Nacional. *Taller Sobre Generación Distribuida*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:LA+GENERACI?N+>

DISTRIBUIDA+y+SU+POSIBLE+INTEGRACION+AL+SISTEMA+INTERCONECTADO#0

- Samantaray, S. R. (2014). Letter to the Editor: Smart Grid Initiatives in India. *Electric Power Components and Systems*, 42(3-4), 262–266. doi:10.1080/15325008.2013.867555
- Schick, L., & Winthereik, B. R. (2013). Innovating Relations - or Why Smart Grid is not too Complex for the Public. *Science & Technology Studies*, 26(3), 82–102. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=93288404&lang=es&site=ehost-live>
- Sechilariu, M., Wang, B., & Locment, F. (2013). Building-integrated microgrid: Advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication. *Energy and Buildings*, 59, 236–243. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.039
- Sun, Q., Ge, X., Liu, L., Xu, X., Zhang, Y., Niu, R., & Zeng, Y. (2011). Review of Smart Grid Comprehensive Assessment Systems. *Energy Procedia*, 12, 219–229. doi:10.1016/j.egypro.2011.10.031
- Suryanarayanan, S. (2010). Grid modernization efforts in the USA and Brazil—some common lessons based on the smart grid initiative. *IEEE Power and Energy ...*. Retrieved from http://alexandria.tue.nl/openaccess/Metis246471.pdf?origin=publication_detail
- UPME. (2013). PLAN DE EXPANSION DE REFERENCIA GENERACION - TRANSMISIÓN 2013-2027. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2013/Plan_GT_2013-2027_Vdefinitiva.pdf
- Velasco, E., Ángeles, C., & García, M. (2013). Redes de transmisión inteligente . Beneficios y riesgos Smart Transmission Grids - Benefits and Risks. *Ingeniería Investigación Y Tecnología*, XIV, 81–88.
- Wissner, M. (2011). The Smart Grid – A saucerful of secrets? *Applied Energy*, 88(7), 2509–2518. doi:10.1016/j.apenergy.2011.01.042
- Xu, Z., Xue, Y., & Wong, K. P. (2014). Recent Advancements on Smart Grids in China. *Electric Power Components & Systems*, 42(3/4), 251–261. Retrieved from 10.1080/15325008.2013.862327
- Yuan, J., Shen, J., Pan, L., Zhao, C., & Kang, J. (2014). Smart grids in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 896–906. doi:10.1016/j.rser.2014.05.051