

**SMART METERING: ESTADO DEL ARTE DE APLICACIONES AL SECTOR
ELÉCTRICO.**

**DIEGO FERNANDO CORREA SANDOVAL.
BERNARDO JAVIER BECERRA MUÑOZ.
GENNY PAOLA ARAQUE VILLAMIZAR.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS.
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.
BUCARAMANGA.
2013.**

**SMART METERING: ESTADO DEL ARTE DE APLICACIONES AL SECTOR
ELÉCTRICO.**

**DIEGO FERNANDO CORREA SANDOVAL.
BERNARDO JAVIER BECERRA MUÑOZ.
GENNY PAOLA ARAQUE VILLAMIZAR.**

**Trabajo presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Electricista.**

**DIRECTOR.
PhD. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA.**

**CODIRECTOR.
PhD. JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS.
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES.
BUCARAMANGA.**

2013.

A Dios que guía mi vida.

A mi mami que me enseñó a soñar y siempre me ha ayudado a lograr mis sueños.

A Hannah, las palabras son pocas para agradecerle.

A mi tía Rosita quien siempre ha estado para brindarme una mano.

A mi familia por ser mi apoyo en toda clase de menesteres.

A Paola y Bernardo por su apoyo académico y su amistad inquebrantable.

A mis amigos y las familias de mis amigos. Sería un gran libro si los nombrara a todos, cada quien ha puesto un indispensable granito de arena para lograr esta meta.

GRACIAS.

Diego Fernando.

En primera instancia doy gracias a Dios y a mi madre por brindarme la maravillosa oportunidad de enriquecer mi conocimiento en esta excelente universidad.

A todos mis amigos especialmente a Diego y a Paola por su apoyo incondicional y por ser parte fundamental para alcanzar este importante logro.

A las diferentes familias como la Araque Villamizar quienes me abrieron las puertas de su hogar y me brindaron su valioso apoyo durante este proceso de formación académica.

A mis hermanas y demás familiares que aportaron su granito de arena para alcanzar esta meta.

A todos mis más sinceros agradecimientos.

Bernardo Javier.

A Dios todo poderoso por darme la paciencia y la fuerza necesaria para seguir adelante a pesar de los pequeños tropiezos y dificultades.

A mi padre José quien a pesar de la distancia siempre se ha esforzado por darme un buen ejemplo e indicarme el camino correcto.

A mi madre Fabiola por su amor, por su comprensión, por su paciencia y sus consejos. Por ser parte importante de mi formación y por saber entender mis malos momentos.

A mis hermanos Giovanni y Jairo, por ser parte importante de mi existencia y por brindarme su apoyo en ciertos momentos.

A mis amigos Diego y Bernardo con quienes compartí días inolvidables. Gracias por su amistad, su cariño, su respeto, y por permitirme entrar en sus vidas en todo momento tanto dentro como fuera de las aulas de clase.

A Edwar, por ser parte de mis días y por brindarme su apoyo todo este tiempo.

Y finalmente a cada una de esas personas que de una u otra manera estuvieron presentes y me brindaron su apoyo cuando lo necesitaba, en el transcurso de mi formación profesional.

A todos ellos, muchas gracias.

Genny Paola

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestros más sinceros y profundos agradecimientos a todas las personas que ayudaron en la realización de este proyecto, en especial al Director de esta investigación, el Doctor Gabriel Ordóñez Plata, por la orientación y supervisión de este trabajo y por sus valiosas enseñanzas durante todo nuestro proceso de formación en esta excelente Universidad.

A la Universidad Industrial de Santander pero en especial a todos los compañeros y el personal de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, por acogernos durante el transcurso de nuestra carrera y por darnos el conocimiento y la formación necesaria para poder lograr nuestro título profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN INTELIGENTE.	36
1.1 MEDICIÓN DIGITAL DE VARIABLES ELÉCTRICAS.	38
1.1.1 Medición analógica de variables eléctricas.	38
1.1.2 Medición inteligente de variables eléctricas.	40
1.1.2.1 Análisis de las características de la infraestructura de medición AMI en sistemas eléctricos.	43
1.1.2.2 Pruebas y mantenimiento de un medidor inteligente.	45
1.1.2.3. Sincronización en tiempo.	47
1.1.2.4. Adquisición y procesamiento de las señales en un medidor inteligente	48
1.1.2.5. Capacidad de corte y conexión.	50
1.1.2.6. Almacenamiento de información.	52
1.2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EMPLEADOS EN SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	54
1.2.1. Protocolos de comunicación utilizados en procesos de medición inteligente.	55
1.2.2 Modo de comunicación entre medidores y centrales de control.	66
1.2.3 Requerimientos de capacidad de red de comunicación.	67
1.2.4 Aplicaciones.	68
1.3. NORMATIVIDAD.	69
1.4. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.	70
1.5 SEGURIDAD INFORMÁTICA.	71
2. SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE Y SUS FUNCIONALIDADES.	72

2.1 LECTURA AUTOMÁTICA DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA (AMR).	72
2.2 INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA (AMI).	74
2.2.1 Funcionalidades del sistema de medición inteligente.	77
2.2.1.1 Gestión energética	78
2.2.1.2. Monitorización de variables eléctricas.	107
3. SEGURIDAD INFORMATICA Y NORMATIVIDAD EN SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.	112
3.1 SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN.	112
3.1.1 Problemas para la implementación de la seguridad informática en sistemas de medición inteligente.	113
3.1.2 Problemas que se presentan en caso de fallas en los sistemas de seguridad de la información.	115
3.1.3 Medidas que se pueden implementar para lograr una alta fiabilidad en los sistemas de seguridad de la información.	116
3.1.4 Requisitos de los sistemas de seguridad de la información.	118
3.1.5 Modelo de cascada de desarrollo del software de seguridad.	119
3.2. NORMATIVIDAD RELACIONADA CON LA MEDICIÓN INTELIGENTE.	121
4. PROYECTOS Y PATENTES RELACIONADOS CON EL DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MEDICIÓN INTELIGENTE.	136
4.1. PROYECTOS DESTACADOS DE MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN DIFERENTES LUGARES DEL MUNDO.	136
4.1.1. Principales proyectos de medición inteligente en países europeos.	136
4.1.2. Medición inteligente en Oceanía.	145
4.1.3. Situación actual de la medición inteligente en países asiáticos.	147
4.1.4. Principales proyectos de países de América del Norte.	149

4.2 OTROS PROYECTOS.	153
4.3. DESARROLLO DE PATENTES EN MEDICIÓN INTELIGENTE A NIVEL MUNDIAL.	159
5. VENTAJAS, NECESIDADES, PROBLEMAS E IMPACTOS QUE SE PRESENTAN CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.	165
5.1 VENTAJAS ASOCIADAS AL USO DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.	165
5.2 NECESIDADES PARA SU IMPLEMENTACIÓN.	166
5.3 PROBLEMAS CON LOS MEDIDORES INTELIGENTES.	168
5.4 IMPACTOS.	171
6. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.	173
BIBLIOGRAFÍA.	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general Smart Metering.	26
Figura 2: Fuentes de información: Tipos y características.....	30
Figura 3. Evolución de la medición de variables eléctricas.....	37
Figura 4. Proceso de facturación y toma de datos actual de energía eléctrica en usuarios regulados.....	40
Figura 5. Proceso de medición, facturación y toma de datos a través de medición inteligente.	41
Figura 6. Medición, comunicación, almacenamiento y procesamiento en medición inteligente.	53
Figura 7. Modulación/demodulación de señales de comunicación en PLC.	57
Figura 8. Arquitectura de comunicación DLMS/COSEM.....	59
Figura 9. Arquitectura de una red inteligente y distribución de estándares de comunicación analizados.....	65
Figura 10. Tecnología AMR.....	73
Figura 11. Sistema AMI.	75
Figura 12. Avance tecnológico en medición de variables eléctricas.	77
Figura 13. Integración de la medición en los servicios públicos.....	80
Figura 14. Rastreo de pérdidas no técnicas.	82
Figura 15. Almacenamiento de energía de los vehículos eléctricos en tiempos de baja demanda.	85
Figura 16. Inserción de energía de los vehículos eléctricos a la red en tiempos de alta demanda.	85
Figura 17. Esquema de una generación distribuida.....	87
Figura 18. Demanda real de energía eléctrica promedio en Colombia por días, marzo del 2012.	91
Figura 19. Distribución del consumo de energía eléctrica entre los diferentes tipos de usuarios, marzo del 2012.....	92
Figura 20. Curva de carga del consumo residencial de energía eléctrica, según usos.	96

Figura 21. Participación de los diferentes usos dentro del consumo residencial de energía eléctrica en Colombia.	96
Figura 22. Interacción entre los dispositivos en un esquema automático de control de carga.	100
Figura 23. Arquitectura de un medidor de gas prepago.	103
Figura 24. Componentes de un sistema eléctrico inteligente para lograr un mercado de energía dinámico.	107
Figura 25. Estructura energética que se integra en el usuario final.	124
Figura 26. Estructura y composición de una red de distribución AMI.	125
Figura 27. Sistemas de comunicación de medidores inteligentes.	127
Figura 28. Equipos que generan radiación electromagnética en el hogar.	131
Figura 29. Distribución de las áreas de trabajo en la ciudad de Ámsterdam para el desarrollo del proyecto smart city.	140
Figura 30. Empresas y centro de investigación con patentes.	160
Figura 31. Problemas de diseño en un sistema de medición inteligente.	169

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre tecnologías de medición analógica, AMI Y AMR.	24
Tabla 2: Fuentes de información: Tipos y características.	28
Tabla 3. Comparación entre los sistemas de medición AMI Y AMR.	43
Tabla 4. Desarrollos compartidos.	161
Tabla 5. Medidores inteligentes / Institutos de investigación.	162
Tabla 6. Enfoque de la tecnología.	162

RESUMEN

TÍTULO: SMART METERING: ESTADO DEL ARTE DE APLICACIONES AL SECTOR ELÉCTRICO.*

AUTORES: CORREA SANDOVAL, Diego Fernando; BECERRA MUÑOZ, Bernardo Javier; ARAQUE VILLAMIZAR, Genny Paola. **

PALABRAS CLAVES: Medición inteligente, comercialización, regulación, normalización.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto de grado se presenta una revisión del estado del arte de la medición inteligente aplicada al sector eléctrico. El estudio se desarrolla a través de un análisis bibliométrico, dicho análisis consta de dos fases: una fase heurística que se basa en la búsqueda y recopilación de la información y una fase hermenéutica que se basa principalmente en el análisis, interpretación y clasificación de esta información de acuerdo a su prioridad. Estas fases permiten abordar de manera concisa y relevante la literatura mundial que trata acerca de la medición inteligente, con el fin de establecer la importancia de este tipo de medición en la gestión de los futuros sistemas de distribución de energía eléctrica.

Sobre esta literatura ya seleccionada se abordan temas de interés como: los avances en la medición, pasando de la medición analógica a la medición digital, de ahí a los sistemas AMR y finalmente a los sistemas AMI de medición de energía eléctrica. La inserción e importancia de la comunicación como pilar fundamental para la interacción de los sistemas de medición inteligente. Los cambios importantes que se están dando y se darán respecto a los actuales procesos de comercialización y facturación de energía eléctrica. El aseguramiento de los datos como prioridad debido a que los sistemas de medición inteligente integran sistemas de comunicación y computación. La regulación y normalización de la medición inteligente a nivel mundial a fin de lograr una interoperabilidad entre los distintos desarrollos y aplicaciones.

Finalmente se abordan y se presenta una recopilación de los desarrollos, proyectos y patentes más relevantes que se encuentran en aplicación y ejecución a lo largo del mundo, para que sirvan como guía y soporte a quienes deseen implementar una infraestructura de medición automática (AMR) o mejor aún una infraestructura de medición inteligente (AMI).

* Proyecto de grado desarrollado en la modalidad de investigación.

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Gabriel Ordóñez Plata. Co-Director: Johann Farith Petit Suárez.

ABSTRACT

TITLE: SMART METERING: STATE OF ART OF ELECTRIC POWER INDUSTRY APPLICATIONS.*

AUTHORS: CORREA SANDOVAL, Diego Fernando; BECERRA MUÑOZ, Bernardo Javier; ARAQUE VILLAMIZAR, Genny Paola

KEYWORDS: Smart Metering, commercialization, regulation, normalization.

DESCRIPTION:

The purpose of this thesis is a revision of a state of the art of smart metering applied to the electric power industry. This project is developed on the basis of a bibliometric analysis which consists of two phases: a heuristic phase and a hermeneutical phase. These phases allow a concise and relevant approach to the world literature that discusses the topic of Smart Metering.

This selected literature offers various interesting topics like: the scientific progress in the process of measurement, first going from analogical to digital measurement and from there on to the AMR systems and finally to the AMI systems which measure electric energy; also, the inclusion and the importance of communication as fundamental pillar for the interaction of the different systems of Smart Metering. The important changes that are taking place in matters of the actual processes of commercialization and billing of electric energy. The data storing as a priority due to the fact that the Smart Metering systems integrate computing and communication systems. The regulation and normalization of Smart Metering at worldwide level to reach interoperability amongst different developments and applications.

Finally we present a compilation of some of the developments, projects and the most relevant patents in this field through the world, to guide and support those who wish to implement an Automatic Meter Reading (AMR) or an Advanced Metering Infrastructure (AMI).

* Degree's project developed with research purposes.

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Advisor: PhD: Gabriel Ordóñez Plata. Co-Advisor: Johann Farith Petit Suárez.

INTRODUCCIÓN.

Una red inteligente (Smart Grid) es aquella donde se puede lograr un suministro eléctrico, eficiente, seguro y sostenible. El futuro de la energía eléctrica está enfocado al desarrollo de redes que permitan: la conexión de las redes de suministro a plantas de producción de energías renovables, la generación distribuida, el desarrollo de tecnologías para el almacenamiento de energía, el uso racional de la energía y la masificación en la movilidad de vehículos eléctricos.

Entre los desarrollos más importantes de las redes inteligentes se encuentra la automatización de los sistemas de distribución desde el enfoque de Smart Metering. Este se convierte en un importante campo de investigación, ya que recopila una gran cantidad de proyectos desarrollados a nivel mundial, cuya finalidad es lograr una mayor eficiencia y calidad en el suministro de la energía eléctrica.

Los avances de Smart Metering ofrecen múltiples beneficios, tanto para las empresas distribuidoras de energía eléctrica, como para los usuarios de la misma, dado que a través de este enfoque se cuenta con una infraestructura diseñada para satisfacer los nuevos requerimientos que demanda la prestación de este servicio. Algunos de estos requerimientos son los siguientes: la medición y registro en tiempo real del consumo de la energía eléctrica; la medición local y remota de la demanda de energía eléctrica; la generación distribuida; la medición combinada con otros servicios públicos; la conexión, desconexión e interconexión de redes de distribución; tarifas de facturación variable; una mejora en la calidad de la energía eléctrica; una mayor eficiencia energética; la implantación de sistemas anti fraude; una mayor conciencia energética; la inclusión de servicios adicionales que permiten un mayor control y flexibilidad de los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, entre otros.

Estos servicios adicionales permitirán en un futuro cercano incorporar al sistema eléctrico paquetes de energía producidos por pequeños generadores residenciales como celdas fotovoltaicas o aerogeneradores. Lo anterior requiere de protocolos de comunicación que permitan la transferencia y la gestión de datos entre los usuarios y la empresa de distribución de energía en tiempo real. Estos facilitarán la administración (conexión y/o desconexión) de cargas del sistema eléctrico.

Todo esto combinado, brindará mayores posibilidades de operación a quienes administran el sector eléctrico, ofreciendo la posibilidad de una mayor calidad y eficiencia en el suministro de la energía eléctrica [79].

Adicionalmente, los medidores inteligentes permitirán realizar grandes modificaciones respecto a los sistemas actuales de medición de energía eléctrica. La facturación en tiempo real generará cambios en: la comercialización, la facturación, los paquetes de energía y el control de demanda, lo cual promoverá un uso racional y eficiente de la energía (URE) por parte de los usuarios. Actualmente se están promoviendo diversas propuestas que a continuación se describen brevemente.

- La energía prepago: Consiste en comprar un paquete de energía eléctrica antes de consumirlo. Esto permite al cliente tener un control en las cuentas de la energía que está consumiendo, ya que de acuerdo al valor pagado se asignan determinados kWh para ser consumidos por el usuario.

Esto representa una ventaja para los clientes debido a que son conscientes de que no pueden consumir excesivamente la energía adquirida, y adicionalmente crea una cultura de gestión energética.

Por otra parte, en las empresas comercializadoras de energía eléctrica, se permite eliminar la morosidad de los clientes, ya que el usuario está pagando antes por la energía que va a consumir. Como no existen

problemas de morosidad se evitan inconvenientes de conexión y reconexión, ya que el medidor se encarga de suspender el suministro de la energía cuando no se tiene saldo.

- Tarificación flexible: Las comercializadoras de energía podrían generar planes de energía eléctrica para determinados usuarios. Dichos usuarios podrían ser grandes empresas o también pequeños consumidores, en miras a reducir el consumo de energía eléctrica en horas consideradas críticas.

Las empresas podrían tener modificaciones en cuanto a horas de trabajo puesto que no trabajar en horas pico de consumo de energía generaría ahorros. Las comercializadoras de energía cobrarían a mayor valor el kWh en horas de alto consumo y más económico el kWh en horas de baja demanda.

Además de esto, las empresas de energía tendrán controles para evitar tener pérdidas de energía tanto por fraudes como por errores en el proceso de facturación. Estos controles se deben a la recepción de datos en tiempo real, los cuales pueden ser analizados y contrastados evitando así errores en los que se pudiera incurrir [78].

Debido a la necesidad de obtener todos los beneficios nombrados anteriormente pero sobretodo de tener unos datos confiables y con la menor incertidumbre posible en los sistemas de distribución de energía eléctrica, se da el desarrollo de dos importantes tecnologías conocidas como AMR (“Automatic Meter Reading”) y AMI (“Advanced Metering Infrastructure”).

Estas dos tecnologías ofrecen múltiples beneficios tanto para el distribuidor como para el cliente, por tal razón se considera indispensable profundizar al respecto y analizar por qué son componentes fundamentales de las redes inteligentes. En la Tabla 1 se realiza una comparación entre el medidor analógico y las tecnologías

AMI Y AMR. En esta tabla se resalta la importancia de la automatización de los sistemas de comercialización de la energía eléctrica, dejando además abierta la posibilidad de expandir esta herramienta a otros tipos de servicios públicos [80].

Tabla 1. Comparación entre tecnologías de medición analógica, AMI Y AMR.

		Analógica.	Tecnología AMR.	Tecnología AMI.
1	Tipo de medidor.	Electromecánico.	Híbrido.	Digital.
2	Recolección de datos.	Mensual y manual.	Mensual.	Remota por red de comunicación de forma diaria y muy frecuente.
3	Registro de datos.	Consumo total.		Por período de tiempo (Horario o menor).
4	Interfaces principales.	Sistema de información consumidor y facturación.		Gestión de fallas, despliegue de consumidor, respuesta de demanda y respuesta a emergencias.
5	Otros dispositivos involucrados.	No.		Información al usuario por la WEB, HEDs (Home Energy Displays), HAN (Home Área Network).
6	Facturación.	Solo consumo total.		Consumo total, por períodos de tiempo, demanda pico, consumos proyectados por períodos.
7	Respuesta de la demanda.	No.		Control de carga, reducción del pico de carga.
8	Fallas.	Llamadas al call center.		Detección automática, detección de la calidad del servicio, verificación remota de la restauración del servicio, respuesta automática y verificación en línea.
9	Tarifas.	Por consumo a final de mes.		Opciones según regulación por ejemplo tarifa plena o precios dinámicos.

Fuente: Desarrollo de Smart Grids en Colombia. R. Cespedes [81].

Estas tecnologías permitirán que los procesos actualmente desarrollados en el tema de las mediciones del sector de la energía eléctrica evolucionen a tal punto que permitan suplir las actuales y futuras exigencias que requiere el mercado de la energía eléctrica. Un primer aspecto a considerar es la posibilidad de una mayor gestión, distribución, organización y optimización de los recursos para la prestación de éste bien de primera necesidad.

A continuación se describen las principales generalidades del proyecto y se explica la importancia en el campo de la comercialización de la energía eléctrica.

En primer lugar se presenta una breve descripción del planteamiento del problema, enseguida se realiza un descripción del mismo, se explica la forma como se desarrolló y finalmente se elabora un resumen del contenido de cada capítulo.

- **Planteamiento del problema.**

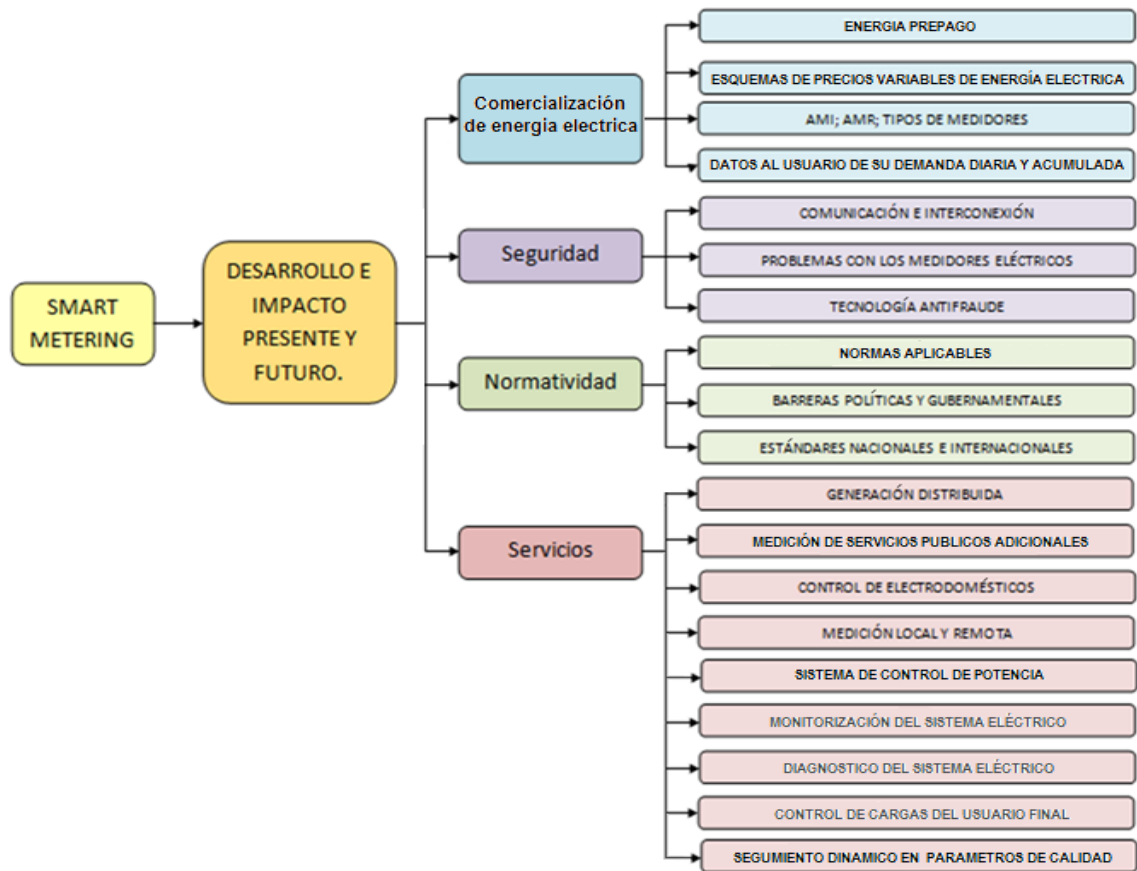
La utilización de medición inteligente (Smart Metering) en sistemas eléctricos permite la implementación de: la automatización de todos los aspectos relacionados con el uso de la energía eléctrica, la determinación dinámica de la calidad de la energía eléctrica, la eliminación de procesos de facturación tediosos que se tienen en la actualidad, la obtención de la demanda de usuarios en tiempo real, la posibilidad de comercializar paquetes de energía dinámicos, la opción de clientes con energía prepagada, el seguimiento de cargas en tiempo real, entre otras. Estos aspectos hacen evidente la necesidad del uso de medidores inteligentes.

Del mismo modo, la evolución en el desarrollo de medidores inteligentes está impulsando grandes cambios en la forma de abordar las diferentes aplicaciones relacionadas con el sector eléctrico. Los principales desarrollos en Smart Metering se están dando en tópicos como facturación, seguridad, normatividad, precios y servicios de la energía eléctrica (ver Figura 1). Estos tópicos agrupan diferentes

avances en los sistemas de distribución de energía eléctrica, entre los que resaltan: tarifas prepagadas, esquemas de precios variables, facturación en tiempo real, comunicación e interconexión de datos, tecnologías anti fraude, gestión de demanda, control de pérdidas, medición local y remota, generación distribuida, entre otras, como se observa en la Figura 1.

En razón a lo expuesto anteriormente se hace necesario un análisis de esta nueva estructura del sector eléctrico a nivel mundial, donde se recopilen los avances alcanzados, los problemas que se han presentado, las perspectivas que se tienen a futuro y su importancia en los nuevos desarrollos del sector eléctrico.

Figura 1. Esquema general Smart Metering.



Fuente: Autores del libro.

- **Descripción del proyecto.**

Este proyecto dejará como resultado una clasificación de la información concerniente a Smart Metering, la cual permitirá establecer la gran importancia de este tipo de medición en la gestión de los futuros sistemas de distribución de energía eléctrica. Esto se da a partir de algunas comparaciones que se desarrollan en el libro sobre lo que ha existido, lo que existe y existirá en la medición de variables eléctricas, en los diferentes campos de aplicación relacionados con los sistemas eléctricos.

Además de lo mencionado anteriormente, el proyecto puede servir de motivación a futuras investigaciones sobre el desarrollo e implementación de medidores inteligentes no sólo en el sector eléctrico sino también en empresas que comercialicen con otros servicios públicos.

- **Desarrollo metodológico.**

El estado del arte desarrollado ha tenido dos fases:

- 1. Fase Heurística.**

En esta fase se procedió a buscar y a recopilar las fuentes de información. La naturaleza y las características de las fuentes de información trabajadas se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2: Fuentes de información: Tipos y características.

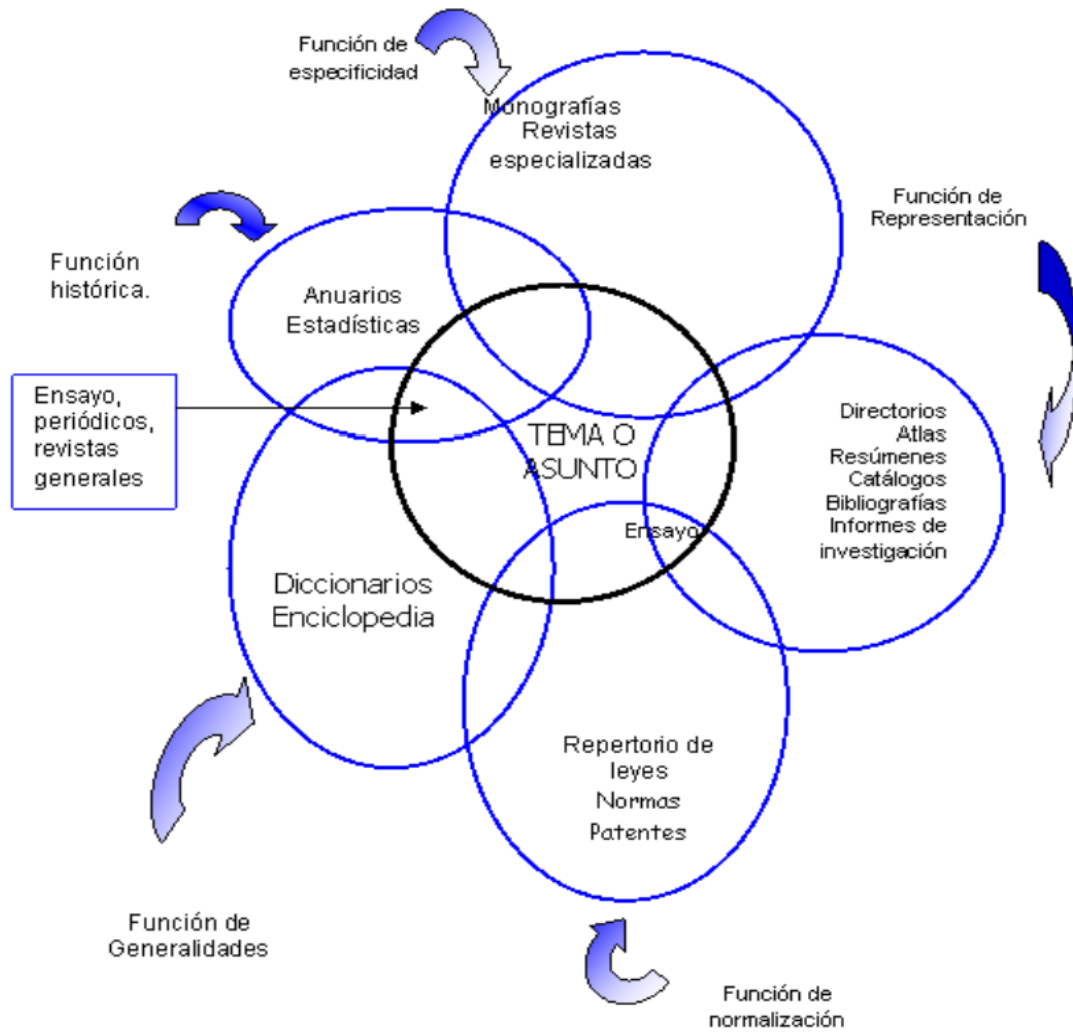
Función	Nombre de la fuente
De Representación: Hace referencia a la información de un área, un tema, un documento, o un conjunto de conocimientos.	Informes de investigación Bases de datos
Histórica: Área de conocimiento, o temática desde una desde un punto de vista evolutivo o histórico	Estadística
De Normalización: Se determinan directrices para el funcionamiento o desarrollo de un área, un procedimiento o un aparato	Repertorio de leyes Normas Patentes
De especificidad: Se ocupa de contenidos específicos de un tema, fenómeno o procedimiento.	Tesis Revistas especializadas

Fuente: Autores del proyecto, basado en la tabla <http://docencia.udea.edu.co/bibliotecologia/seminario-estudios-usuario/unidad4/unidad4.html>

- De representación: Se analizaron informes de investigaciones realizados por diferentes universidades, empresas y organismos estatales a nivel mundial. La base de datos revisada fue la de la IEEE, que contiene una cantidad considerable de papers en el tema de medición inteligente.
- Histórica: Se analizaron diferentes estudios que cuantifican la percepción y aceptación de los clientes en relación con la medición inteligente.
- De normalización: Se analizaron Diferentes leyes promulgadas por los estados para introducir y regular los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica. Se indago acerca de las normativas desarrolladas por instituciones internacionales como la IEEE o la Unión Europea para el desarrollo e interoperabilidad de los sistemas de medición inteligentes. Finalmente se revisó las patentes concernientes a medición inteligente que han sido desarrolladas en su mayoría por empresas líderes en el desarrollo de tecnología como la General Electric.
- De especificidad: Se analizaron tesis de algunas universidades y revistas especializadas, como IEEE spectrum, entre otras.

Como se puede observar la fase heurística del proyecto se trabajó a fondo. La naturaleza y las características de la información se trabajaron de manera amplia a fin de obtener las mejores fuentes de información para la compilación de los conceptos en el estado del arte.

Figura 2: Fuentes de información: Tipos y características.



Fuente:<http://docencia.udea.edu.co/bibliotecologia/seminario-estudios-usuario/unidad4/unidad4.html>

2. Fase hermenéutica

En esta fase cada una de las fuentes de información indagadas se leerán, se analizarán, se interpretarán y se clasificarán de acuerdo a la prioridad de la información. Además se sistematizará la información obtenida.

El medio bibliotecológico escogido fue la base de datos de la IEEE que actualmente incluye 123 revistas de IEEE y más de un millón de resúmenes y normas [93]. Esta base de datos es una gran fuente de recursos, donde se encuentra información científica de calidad, especialmente para indagar temas relacionados con la ingeniería eléctrica y electrónica. Adicionalmente se incluirán tesis y artículos de diferentes universidades para complementar la información presentada en este estado del arte.

- **Organización de la búsqueda.**

La organización de la búsqueda se desarrolló en el orden que se presenta a continuación:

- ❖ **Iniciación:** En este punto se infiere que existe una insuficiencia de conocimiento e información en relación a las redes inteligentes.
- ❖ **Selección:** En esta etapa se determinó el tema general en que se iba a investigar, el tópico seleccionado fue: Sistemas de medición inteligente.
- ❖ **Exploración:** La exploración de la información se llevó a cabo principalmente en la base de datos de la IEEE. Se usó como parámetro de búsqueda la frase “Smart Metering” y los filtros de selección propuestos por la base de datos del IEEE, como número de citas y relevancia.

La población total de los archivos que reposan en la base de datos de la IEEE bajo el parámetro de búsqueda “Smart Metering” fue de 1311, en el mes de Abril del año 2012. Para nuestro caso de estudio se tomó una muestra de 150 artículos. Esto representa un porcentaje de 11,44% del total de artículos, lo cual significa una muestra considerable para el desarrollo de un estado del arte. Es vital resaltar que muchos de esos artículos de la población total no tienen que ver con Smart Metering estrictamente, ya que

pueden presentarse por la palabra Smart o Metering, con lo cual la muestra tomada representa un porcentaje mayor al calculado.

- ❖ **Formulación:** Una vez seleccionados los artículos se procedió al análisis y lectura de los mismos. Mientras se realizaban las lecturas se generó una idea base acerca de los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica.
- ❖ **Recopilación:** Al realizarse la revisión de estos 150 artículos, se creó una base de datos en Excel la cual contiene los componentes claves de cada artículo. La base de datos generalizada para los 150 artículos, se revisó y determinó la estructura para la presentación del estado del arte.
- ❖ **Presentación:** Los resúmenes de diferentes artículos se relacionaron a fin de obtener una idea generalizada de cada concepto. Los conceptos ya generalizados se complementaron con otros textos científicos, en este caso se usaron algunas tesis de grado. Toda la información se fue trabajando poco a poco, y a medida que se avanzaba surgían nuevas ideas de cómo articular la información que se presenta en esta tesis. Se planteó de manera crítica y analítica las soluciones, las ventajas, las desventajas y los retos que supone la inserción de los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica. Se articuló de manera entendible esta tesis, y además del libro aquí presentado se desarrolló una base de datos de los artículos analizados. Esta base de datos sirve de soporte y consulta para un mejor entendimiento de este estado del arte.

Estas fases para el desarrollo del estado del arte están basadas en un contenido digital de la Universidad de Antioquia, a través de la Vicerrectoría de docencia,

más específicamente de la Escuela Interamericana de Bibliotecología (ver referencia 92).

- **Estructuración del documento.**

Este documento cuenta con 5 capítulos en los cuales se recopila el proceso, la información y los resultados obtenidos durante la investigación realizada. Se describe desde las generalidades y la aplicabilidad que puede representar esta nueva alternativa de medición, hasta los proyectos de medición inteligente de energía eléctrica desarrollados en diversos países a lo largo del mundo.

Al principio se describen las motivaciones y justificaciones que llevaron a emprender la realización del trabajo de grado. Además, se presenta una descripción detallada del plan, de la forma como se realizó esta investigación y de los objetivos de este trabajo.

En el Capítulo 1 se detalla la estructura de un sistema de medición inteligente. En él es realizada una descripción de la forma como se ha venido desarrollando el campo de la medición de variables eléctricas a lo largo del tiempo y son resaltados los avances tecnológicos y los beneficios logrados con la aparición de la medición automática de energía eléctrica (AMR). También es realizada una completa y detallada descripción de la Infraestructura de Medición Automática (AMI) como una evolución del AMR. Las principales posibilidades y ventajas que ofrece la implementación de sistemas AMI en el sector de la energía eléctrica son presentadas. También son presentados los servicios adicionales que pueden ofrecerse a futuro con la inclusión de esta nueva plataforma de medición y se detallan los retos y necesidades que pueden presentarse al poner en marcha un proyecto de este tipo. Finalmente, se dedica una parte del capítulo a analizar los posibles impactos tanto sociales como económicos que puede traer consigo la implementación de proyectos basados en sistemas de medición inteligente.

Por otra parte, la importancia de los sistemas de comunicación en la óptima implementación de la plataforma de medición inteligente (AMI) es descrita en este capítulo. Adicionalmente, se presenta una recopilación de los principales protocolos de comunicación tanto físicos como inalámbricos utilizados a nivel mundial para la implementación de plataformas de medición de variables eléctricas y otras, resaltando la capacidad operativa que debe tener dicha red para cumplir a cabalidad con su función.

El impacto que puede llegar a tener esta plataforma de medición inteligente desde el punto de vista de la utilización de la energía eléctrica es presentado en el Capítulo 2. En este capítulo se resalta la amplia gama de funcionalidades que ofrece la implementación de la estructura de medición inteligente (AMI), además de mencionar los impactos económicos y sociales tanto para el usuario final, como para el comercializador de energía eléctrica. También se discute el beneficio ambiental que representa una optimización en el uso de los recursos energéticos utilizados para suplir el servicio de energía eléctrica, estableciendo el aporte de la medición inteligente en el logro de este aspecto. Al final del capítulo se describe el tema de la monitorización de la calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, como uno de los factores de mayor importancia para lograr suplir a cabalidad las presentes y futuras exigencias del mercado de la energía eléctrica de manera integral.

En el Capítulo 3 se describe el tema de la seguridad informática que es de vital importancia para un desarrollo adecuado de esta plataforma de medición. En este capítulo son presentadas las posibles amenazas que se pueden presentar al implementar este tipo de plataforma de medición y se resaltan los altos estándares de encriptación que se deben mantener para lograr enviar y recibir los altos volúmenes de datos con confianza y seguridad a través de canales de comunicación inalámbricos y físicos. Por otra parte, el capítulo 3 presenta un resumen de normas y estándares que se han propuesto en los países en los cuales se han desarrollado proyectos de medición inteligente. Se resalta el

esfuerzo de múltiples entes por lograr una normatividad común que acoja a todas las naciones que pretenden implementar esta plataforma de medición.

El capítulo 4 muestra los proyectos y experiencias de mayor relevancia desarrollados a nivel mundial como soporte y guía para aquellas naciones que piensen en implementar esta infraestructura de medición inteligente (AMI).

Finalmente, el capítulo 5 presenta los logros alcanzados en el trabajo de grado, así como las conclusiones, observaciones y recomendaciones por parte que los autores de este documento consideran relevantes resaltar.

1. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN INTELIGENTE.

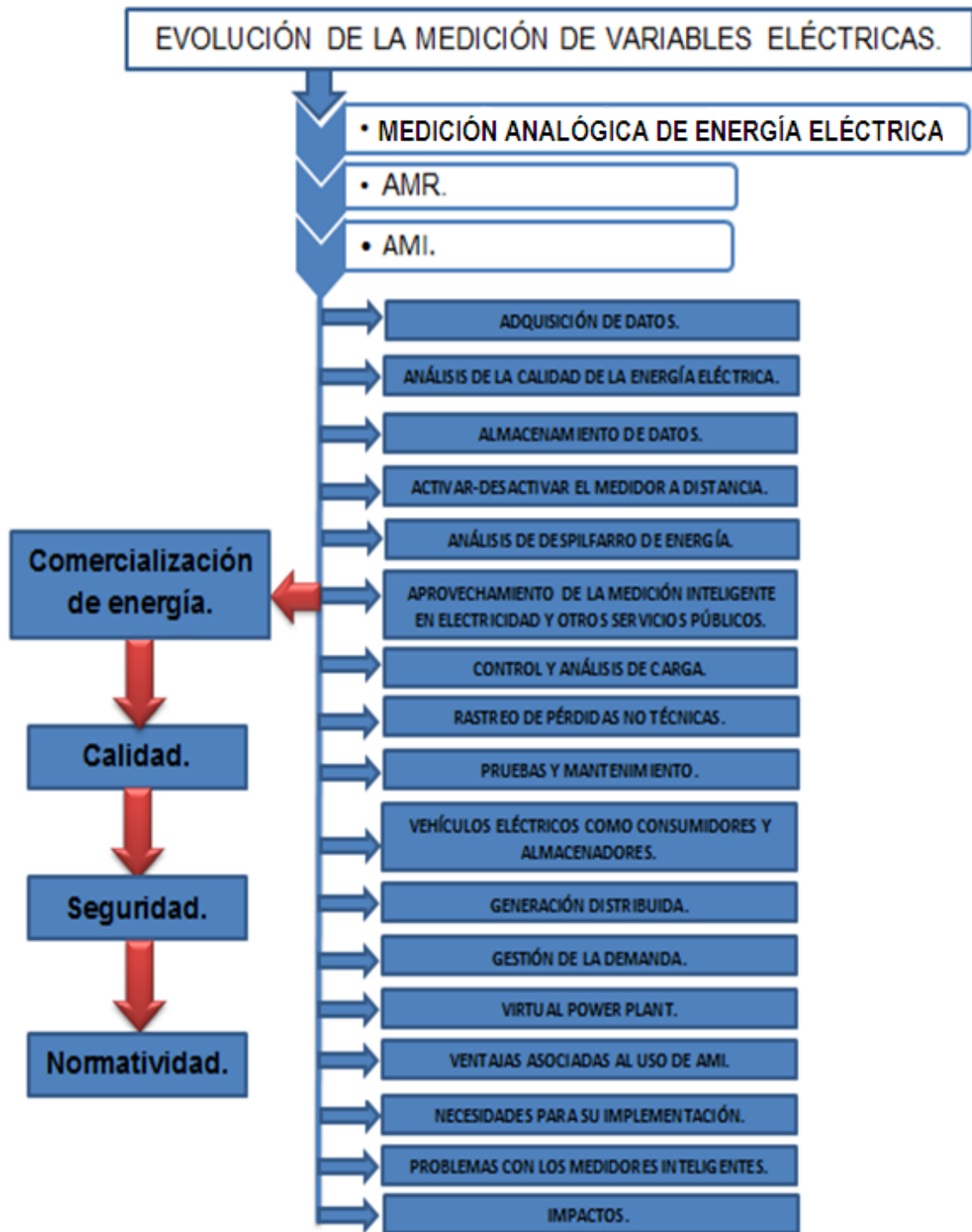
La evolución de los sistemas de medición de energía eléctrica se ha convertido en una necesidad, debido a que la forma como se registra actualmente el consumo de energía en los diferentes usuarios, presenta una serie de inconvenientes que hacen que algunas lecturas no sean tan confiables especialmente por los altos índices de error; además de los altos costos del proceso de adquisición de la información.

La medición inteligente de energía eléctrica en diversos sectores, ofrece una serie de beneficios que sin lugar a dudas hacen necesario su desarrollo e implementación.

A continuación se presenta una descripción de la medición actual y de la medición del futuro, con el objetivo de resaltar la importancia de un cambio que permita la mejora de las tecnologías ya existentes en otras partes del mundo y con el objetivo de poder realizar un estudio que permita tomar decisiones sobre su aplicación en distintas partes del sector eléctrico.

En la Figura 2 se puede observar, la evolución de la medición de variables eléctricas y cómo se abordó el tema de la medición inteligente de estas variables. En la figura se muestra la evolución de los sistemas de medición. Inicialmente los medidores de energía eléctrica fueron analógicos, de allí se evolucionó a los sistemas de medición automática (AMR) y finalmente se desarrollaron los sistemas de medición avanzada (AMI). En la Figura 2 también se detallan algunos aspectos de la infraestructura AMI y se muestran los diferentes campos que se pueden abordar con esta tecnología en el área de la energía eléctrica.

Figura 3. Evolución de la medición de variables eléctricas.



Fuente: Autores del libro.

1.1 MEDICIÓN DIGITAL DE VARIABLES ELÉCTRICAS.

Para contextualizar la importancia de la medición de variables eléctricas es pertinente citar la frase de *Yolanda Echerry*, la cual enuncia: *“Lo que no se mide no se controla, lo que no se controla no se administra”*; a partir de esta frase es evidente que la medición de variables eléctricas representa el eslabón más importante en los sistemas de energía eléctrica. Es decir, la energía eléctrica se concibe como un bien de primera necesidad, que visto como un producto se debe cuantificar tanto su cantidad como su calidad. Para cuantificar la energía eléctrica se establecieron los sistemas de medición analógica; posteriormente para disminuir la incertidumbre en la medición se avanza a la medición digital y finalmente para tener un sistema dinámico de medición de variables eléctricas en tiempo real y control de la energía de manera remota se dió inicio al desarrollo de sistemas de medición inteligente.

1.1.1 Medición analógica de variables eléctricas.

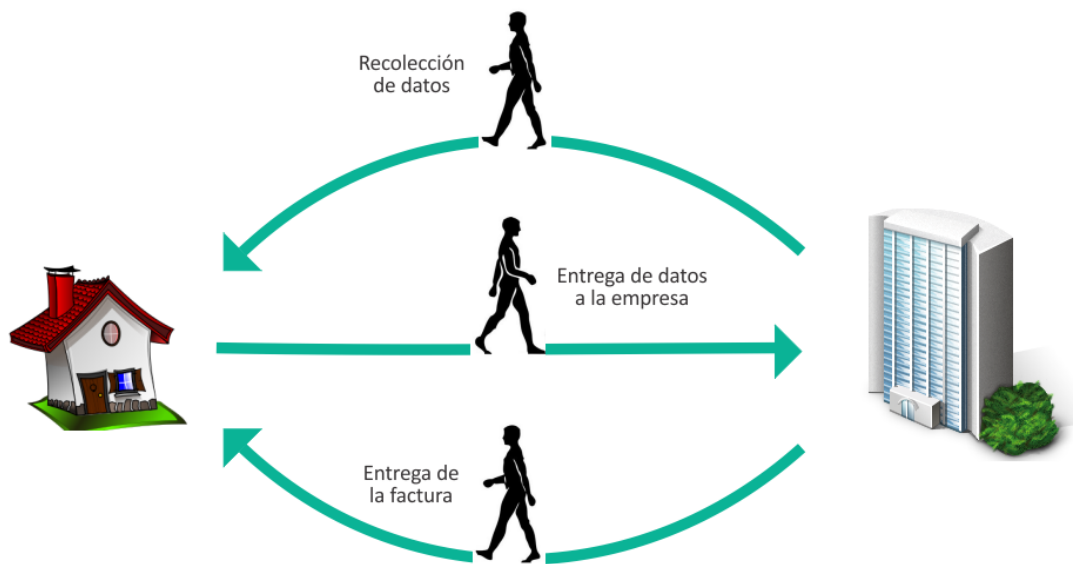
La medición analógica de energía eléctrica presenta los siguientes inconvenientes:

- El proceso de facturación de energía eléctrica es un proceso lento y tedioso. Las empresas comercializadoras de energía se ven en la necesidad de contratar personal para que vaya por cada una de las edificaciones, tomando las respectivas lecturas del medidor. En una ciudad pueden existir cientos de miles e incluso millones de medidores, los cuales se tienen que visitar cada mes para registrar el consumo y de esta manera emitir una factura, esto repercute en una gran inversión para la toma de datos. Es importante tener en cuenta que esta toma de datos puede generar una serie de errores, tales como: la asignación de un consumo a un cliente diferente, entre otros. Cuando ya se han leído los datos, estos son

cargados en la base de datos de la empresa la cual emite la factura por el consumo mensual. Esta factura debe ser entregada a cada cliente lo cual hace que mínimo se realicen dos visitas a un mismo cliente, encareciendo los costos del proceso de facturación. A partir de lo descrito anteriormente se reconoce la necesidad de un cambio en el modelo actual de medición y facturación de energía eléctrica [ver Figura 3].

- La mayor parte de los medidores de energía eléctrica de usuarios regulados del sistema eléctrico colombiano son medidores obsoletos. Se plantea que estos medidores son obsoletos ya que su desarrollo o los modelos bajo los cuales fueron desarrollados responden a necesidades diferentes respecto a las requeridas en los sistemas actuales de medición de energía eléctrica, ya que el auge de los equipos electrónicos dejó atrás una era de cargas lineales, con lo cual ya no sólo se requiere la medición de la energía eléctrica, también se requiere la medición de la calidad de la energía eléctrica. Por consiguiente, actualmente se requiere estimar diversos parámetros de un sistema eléctrico, lo cual es imposible en los sistemas de medición analógica.

Figura 4. Proceso de facturación y toma de datos actual de energía eléctrica en usuarios regulados.



Fuente: Autores del libro.

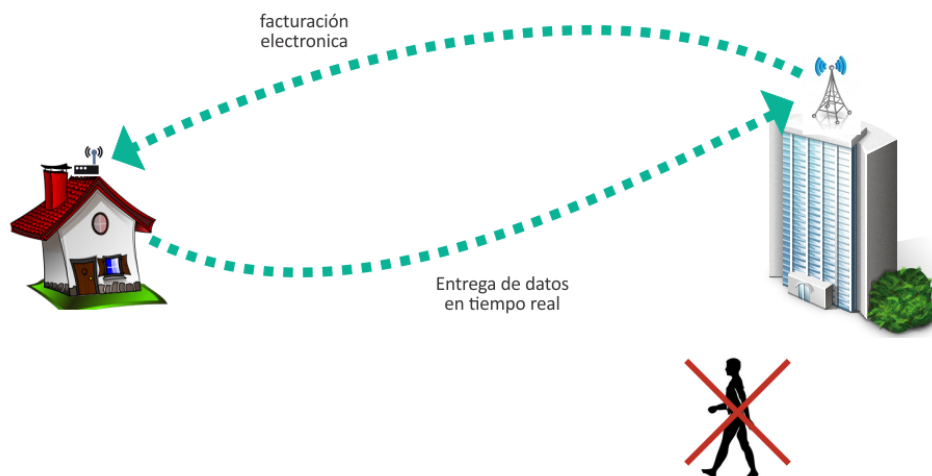
1.1.2 Medición inteligente de variables eléctricas.

El uso de la medición inteligente de variables eléctricas ha dejado de ser una opción y se ha convertido en una necesidad en diferentes lugares del mundo. En la actualidad, este tipo de medición, representa una gran ventaja tanto para los consumidores de energía eléctrica como para las empresas encargadas de suministrar esta energía, ya que además de impulsar grandes cambios y proporcionar múltiples beneficios, se ha convertido también en la solución a muchos problemas de Ingeniería Eléctrica, pues permite realizar mejoras en los sistemas, como por ejemplo, mayor control y mayor flexibilidad en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, diagnóstico en línea de la calidad de la energía, detección de fallas, respuesta a la demanda, entre otros [ver Figura 4].

En los últimos años, el avance de la medición inteligente se ha basado principalmente en el desarrollo de dos importantes tecnologías: AMR y AMI.

AMR (Automatic Meter Reading: Lectura de Medición Automática), hace referencia a una tecnología que permite la lectura de los datos por medio de un medidor que junto con un modem y diferentes medios de comunicación y transferencia hacen posible que los datos sean enviados directamente a una base de datos para su tratamiento y administración. Mientras que, AMI (Advanced Metering Infrastructure: Infraestructura de Medición Avanzada), consiste en un medidor digital que cuenta con un software y hardware de medición y comunicación que permite una gestión efectiva de los datos del sistema de distribución y además de esto proporciona otros tipos de posibilidades como: control de los picos de demanda, control automático de electrodomésticos, tarifas prepagadas, esquemas de precios variables, conexión o desconexión de cargas, entre otras. [77].

Figura 5. Proceso de medición, facturación y toma de datos a través de medición inteligente.



Fuente: Autores del libro.

Estas tecnologías tienen como función principal la adquisición y procesamiento de la información de las variables eléctricas con menor grado de incertidumbre en los sistemas de distribución de energía eléctrica y son un punto clave para ofrecer múltiples servicios de las empresas distribuidoras de energía eléctrica y sus usuarios, proporcionando beneficios a la sociedad en general; y se consideran indispensables a la hora de abordar la medición inteligente ya que son componentes fundamentales de las redes inteligentes.

Como puede verse en la Figura 4, las personas ya no son parte fundamental en la toma de datos como en la medición analógica (ver Figura 3). Por consiguiente, la irrupción tendrá un impacto social y es necesario reubicar al personal que se encargaba de la adquisición de la información en nuevas actividades que las empresas requerirán con el desarrollo de la medición inteligente de variables eléctricas.

Estos nuevos sistemas de medición inteligente, generarán cambios en la forma como se produce y especialmente cómo se consume la energía eléctrica. Con estos cambios, existirá una mayor confiabilidad en las redes pues se permitirá la monitorización general en tiempo real así como el control del rendimiento, la detección de fallas o errores con respuestas rápidas o auto curaciones y una mayor interconexión que permitirá una reducción tanto en costos como en la demanda. [1].

En la Tabla 2 se realiza una comparación entre las características de la tecnología AMI y AMR, ya expuestas anteriormente. Esta tabla es resultado de lo investigado sobre estas dos tecnologías y básicamente es un complemento de la Tabla 1, en donde se estableció que el estudio de la medición inteligente de variables eléctricas es indispensable, ya que satisface diversas necesidades en diferentes partes del sector eléctrico.

Tabla 3. Comparación entre los sistemas de medición AMI Y AMR.

Características	Tecnología	
	AMR	AMI
• Comunicación unidireccional	✓	✓
• Comunicación bidireccional	✗	✓
• Control remoto del medidor	✗	✓
• Medición de energía consumida	✓	✓
• Medición de consumo y calidad de la energía eléctrica	✗	✓
• Gestión de la energía	50/50	✓

Fuente: Autores del libro.

1.1.2.1 Análisis de las características de la infraestructura de medición AMI en sistemas eléctricos.

Actualmente está en discusión cuales son los componentes fundamentales de una red inteligente. Cuando se desea automatizar las redes de energía eléctrica, se suele pensar que simplemente es implementar en la red diversos componentes tecnológicos que realicen ciertas funciones, pero la realidad es otra.

Crear una infraestructura de medición avanzada no es simplemente introducir en la red tecnologías que se encarguen de las labores que se realizaban manualmente. Se trata de crear una infraestructura que cumpla a cabalidad sus funciones, pero que a su vez brinde diferentes beneficios teniendo en cuenta la calidad, la eficiencia y la confiabilidad en cada uno de los procesos que realice.

Una de las principales funciones de la infraestructura AMI en redes inteligentes es estimar, almacenar, analizar y utilizar la información de diferentes parámetros del sistema eléctrico por medio de la integración de redes de comunicación y software especializado.

Para poder cumplir a cabalidad sus funciones, AMI debe basarse en una avanzada estructura de comunicación de dos vías, lo cual permite un mejor intercambio de información en tiempo real entre el cliente y el encargado del suministro de energía eléctrica. En esta comunicación bidireccional, lo importante no es tan solo la velocidad y el tiempo que tarda el flujo de la información, sino que también es de vital importancia el análisis de los parámetros del sistema eléctrico en aspectos como: la calidad de la energía eléctrica, la confiabilidad del sistema, entre otros. Es decir, la comunicación bidireccional debe proporcionar una mejora en la eficiencia energética tanto para los usuarios como para los proveedores de servicios [10].

En general, la infraestructura AMI deberá contar con las siguientes características:

- Interacción bidireccional: Esto permitirá la mejora de la calidad del servicio y se tendrá una mejor satisfacción por parte de los usuarios, creando una plataforma interactiva de doble vía, que realice una conexión totalmente personalizada que permita consultas cómodas, ayudas a servicios, entre otras.
- Respuesta a la demanda: Con base a la información en tiempo real, los usuarios podrán elegir planes de gestión de su energía eléctrica. Esto facilitará los posibles cambios en los modos tradicionales de uso de energía

y la adquisición de nuevos hábitos que ayudarán a mejorar la eficiencia y la calidad de la energía eléctrica.

- Comercialización: Facilitará la modificación de la comercialización tradicional de energía eléctrica y le permitirá a las empresas mejorar la calidad en el suministro de la misma a través de cambios en los sistemas de gestión energética y modificaciones en los mecanismos de operación del sistema de distribución.
- Acceso nuevas formas de energía: Permitirá tener un soporte técnico para la integración de sistemas de generación, distribución y utilización de nuevos equipos. De esta forma se podrán ampliar las alternativas de suministro de energía eléctrica y los clientes podrán participar como no regulados en la comercialización y mercados de energía eléctrica.
- Servicios de valor agregado: Se podrán proporcionar diferentes servicios de acuerdo a los diferentes tipos de usuarios. Los servicios de valor agregado son contribuciones que las empresas le dan al servicio antes de que este, llegue al usuario final. Se trata de beneficios que permiten además de mejorar la calidad del servicio poder competir con otras empresas en el mercado de energía y poder atraer a los clientes y garantizar la fidelidad de los mismos [41].

1.1.2.2 Pruebas y mantenimiento de un medidor inteligente.

Al igual que cualquier otro dispositivo electrónico, un medidor de energía inteligente requiere la realización de pruebas y mantenimiento mediante un programa estructurado. El desarrollo de estos programas de pruebas y mantenimiento debe estar enfocado a garantizar la correcta operación de estos dispositivos, ya que estos constituyen el corazón mismo de una red

de medición inteligente. Además, los programas de pruebas y mantenimiento permiten mejorar la eficiencia operativa de los equipos y de la instalación en general. Incorporar este tipo de programas proporciona beneficios como la identificación de falencias en los sistemas de seguridad, lo cual se convierte en una gran razón para llevarlos a cabo, ya que garantizar la seguridad de los medidores y de los datos que estos manejan es una de las mayores prioridades dentro de una red inteligente. Programas de actualización de hardware y mantenimiento preventivo, tienen como finalidad garantizar la conservación de las características iniciales de operación (ajuste) del medidor; además de prevenir futuros daños que afecten la integridad de los medidores inteligentes y de la red de medición en general [20] [32].

La interoperabilidad entre medidores es otra de las características más importantes de una estructura AMI, ésta permite la comunicación entre los diferentes dispositivos de medición en todas las zonas donde se extiende la red. Lo cual a su vez justifica la importancia de realizar pruebas de este tipo a los dispositivos de medición, permitiendo así garantizar un funcionamiento adecuado [33].

Debido a la importancia de los medidores inteligentes dentro de una estructura AMI, estos deben ser sometidos a diversos tipos de pruebas antes de su aprobación para ser utilizados. En éstas, los medidores se someten a condiciones de estrés ambiental donde se determina su resistencia ante fenómenos naturales como temperatura, humedad, viento y resistencia ante impactos. Las pruebas deben ser superadas en su totalidad para permitir su aprobación y su puesta en el mercado. Es de resaltar que la realización de estos ensayos ha permitido identificar que los elementos del medidor más débiles son la unidad de medida, la unidad de comunicación y el dispositivo LCD (“Liquid Cristal Display: pantalla de cristal

líquido”). Además de establecer que el límite térmico promedio de funcionamiento de los medidores puestos en el mercado es de 95°C [34].

También se debe tener en cuenta que la implementación de programas de mantenimiento y pruebas agrega un excedente económico más a la implementación de un sistema de medición inteligente. Pero esta inversión será traducida con el paso del tiempo en gran beneficio al permitir el correcto funcionamiento de los dispositivos [35].

1.1.2.3. Sincronización en tiempo.

Una estructura de medición avanzada (AMI) debe cumplir con varios requisitos operacionales de gran importancia para lograr funcionar de la manera adecuada.

Uno de estos requisitos es la sincronización de tiempo. Es decir, todos los componentes que constituyen la estructura avanzada de medición (medidores individuales, totalizadores regionales, centralizadores de datos y centros de mando y control) deben contar con un reloj y hora común, permitiendo que cada uno de los eventos que detecte cada uno de los componentes individuales en un tiempo determinado sea visto al mismo tiempo (considerando el retardo natural) por el resto de los componente del sistema.

Esta característica es de vital importancia y constituye una de las grandes ventajas de una estructura avanzada de medición, al hacer que todos sus componentes actúen como un gran conjunto perfectamente coordinado y presto a atender de manera conjunta cualquier falla o eventualidad presente en la red de distribución de energía eléctrica.

Ingresar un nuevo componente dentro de una estructura de medición avanzada (AMI) ya existente, no se limita únicamente a hacer la instalación física del

dispositivo y conectarlo a la red esperando que se integre de forma automática y unilateral. Este proceso requiere del cumplimiento de algunos pasos y de algunos protocolos tal como sucede con la puesta en funcionamiento de cualquier dispositivo celular o cualquier red inalámbrica.

En el caso de ingreso de un nuevo medidor de energía inteligente al sistema, se deben desarrollar varias etapas en las cuales el sistema de operación central envía señales al nuevo dispositivo a instalar y espera la respectiva respuesta. Este proceso se torna como una “conversación” entre los dispositivos, la cual brinda información como por ejemplo la clase de equipo a instalar, el modelo, el estado actual de sistema, el número de identificación propio y más importante aún, toma el tiempo de respuesta entre el envío de la señal y la recepción de la respuesta.

Este último parámetro se define como el punto clave para permitir el ingreso del nuevo dispositivo a la compleja red, ya que como es de esperar este nuevo dispositivo debe cumplir con unos estándares muy altos de desempeño para lograr integrarse a la selecta estructura de medición inteligente. En caso de no cumplir con el parámetro mínimo de tiempo de respuesta establecido por la red, el nuevo dispositivo no será aceptado y deberá ser reemplazado por uno que cumpla con todas las características exigidas.

1.1.2.4. Adquisición y procesamiento de las señales en un medidor inteligente

Establecer un sistema eficiente de adquisición de señales dentro de una estructura avanzada de medición inteligente (AMI) representa uno de los focos fundamentales para un correcto funcionamiento de un proyecto de este tipo.

Esta afirmación tiene su fundamento justamente al considerar que AMI lo que pretende es promover el tema de la medición inteligente de la energía eléctrica

por medio del uso de sofisticados métodos de procesamiento y adquisición de datos.

Un estudio de la Universidad de Cornell, permite tener una idea generalizada acerca de las características de los sistemas de adquisición. Este estudio plantea el uso de una red de 2500 ZigBee/802.15.4, la cual opera a una velocidad máxima de 250 Kbps y los datos se recopilan en intervalos de 15 minutos. Con este intervalo la red solo será capaz de transmitir un archivo de 11,250 bytes que corresponde a 88 paquetes. Para un archivo de este tamaño cada nodo sólo puede transmitir 244 paquetes por segundo, lo cual le da al medidor de energía aproximadamente 4 [ms] para entregar un paquete del mismo tamaño. El planteamiento anterior permite tener una idea generalizada acerca de lo robusta que debe ser la red, para solventar las necesidades de comunicación del sistema de medición inteligente de energía eléctrica [91].

Actualmente existen gran cantidad de algoritmos y métodos computacionales que brindan la posibilidad de recoger la información del estado en que se encuentran las redes de energía eléctrica para su posterior procesamiento y análisis. Dentro de estos algoritmos computacionales se encuentra la DFT (Discrete Fourier Transform) [8], FFTW (Fastest Fourier Transform in the West) [9], transformada de Wavelet, entre otras. Que permiten extraer parámetros de las ondas de tensión y de corriente. Como amplitud, frecuencia, cantidad de armónicos, grado de distorsión, entre otras. Estos parámetros permiten establecer el grado de calidad del suministro de energía eléctrica y brindan valiosa información para tomar las acciones correctivas necesarias a que haya lugar.

Actualmente y considerado lo planteado anteriormente se puede afirmar que la integración entre DFT, FFTW y la transformada de wavelet representan una de las mejores opciones para el procesamiento de las señales de tensión y de corriente en un sistema de energía eléctrica.

Al igual que el desarrollo tecnológico constante que experimenta la sociedad, continuamente se desarrollan nuevos métodos computacionales que permiten incrementar la eficiencia de la adquisición y procesamiento de los datos. A futuro muy seguramente se requerirán de menos cantidad de datos para obtener un diagnóstico real del estado de las redes de energía eléctrica, haciendo a su vez mucho más rápidos los procesos de recolección y procesamiento de la información.

1.1.2.5. Capacidad de corte y conexión.

Una de las características especiales que tienen los medidores inteligentes es la conexión y desconexión remota del mismo, a fin de controlar si un cliente tiene o no el servicio de energía eléctrica, agua o gas.

Esta propiedad no solo surge como solución a muchos de los problemas presentes en el suministro de energía eléctrica, sino también como una herramienta muy útil en el proceso de automatización de las redes de distribución tanto de energía eléctrica como de otros servicios públicos domiciliarios.

Gracias a esta innovación, en aquellos lugares donde se han implementado este tipo de medidores inteligentes, el operador del servicio prestado (energía eléctrica, agua o gas) puede tomar la decisión de suspender o restablecer el suministro de su producto en cualquier momento de manera remota. Esto también representa un punto a favor de los usuarios finales, que podrán estar seguros que ante cualquier emergencia como un corto circuito o fuga de agua o gas, contarán con un respaldo que podría evitar un accidente de grandes proporciones.

Teniendo en mente las mejoras que lleva consigo la implementación de una infraestructura avanzada de medición (AMI) como lo es el diagnóstico en tiempo

real de las redes de energía eléctrica, la característica de corte y conexión remota se convierte en un aliado importante en el reto de reducir las pérdidas no técnicas presentes en diversos lugares del mundo y de especial impacto en Colombia. Ya que será posible desconectar a cualquier usuario que presente un comportamiento anómalo en sus patrones de consumo de energía eléctrica, gas y agua. Adicionalmente esta característica también representa una gran herramienta para controlar de manera eficiente el suministro de energía eléctrica y actuar como contingencia inmediata ante eventuales fallas de las redes de electricidad, de agua y de gas.

Gracias a esta característica, a los nuevos algoritmos de detección de consumos anómalos de energía eléctrica y a las características antifraude que presentan los nuevos medidores de energía eléctrica, será posible desconectar a cualquier usuario que presente un comportamiento sospechoso en el consumo de cualquiera de los servicios públicos controlados por el medidor inteligente.

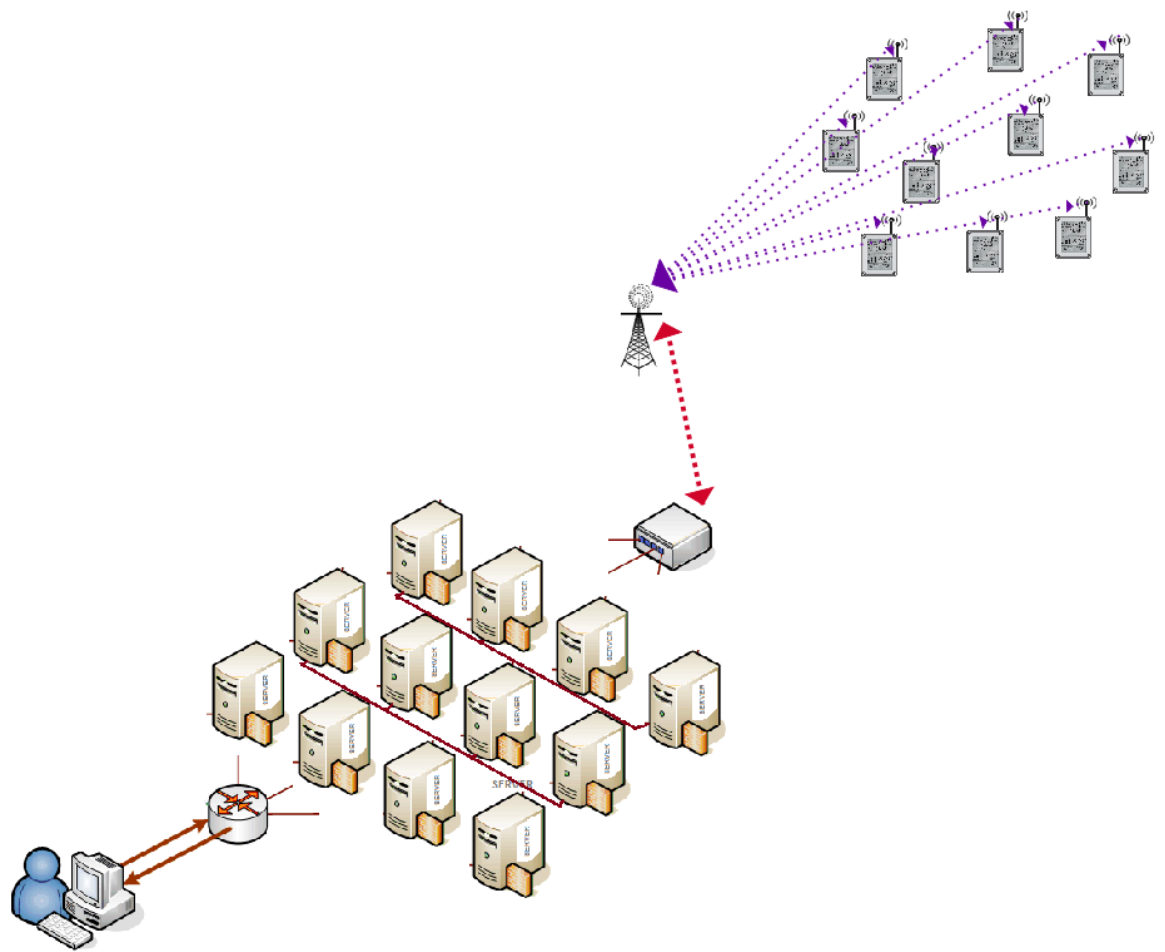
Como punto adicional el control de carga, para conectar y desconectar aparatos ante las variaciones de precios de la energía representaría una ventaja para el manejo de la curva de demanda de energía eléctrica [13]. Analizando esta característica desde otra perspectiva, se puede decir que esta propiedad afecta de manera negativa la utilización de mano de obra humana; como lo es el caso de las conocidas cuadrillas de trabajo que normalmente son quienes atienden estas conexiones y desconexiones de energía eléctrica, gas y agua y que deberán ser reubicadas en caso de implementar este tipo de medidores. [1] [17] [7] [18] [19].

1.1.2.6. Almacenamiento de información.

La implementación de un sistema de medición inteligente involucra el procesamiento de gran cantidad de información que se requiere se almacene adecuadamente. Esta información corresponde: Al consumo de energía, a la operación de la carga (potencia activa, reactiva, aparente, tensión, corriente) por intervalos de tiempos predefinidos, a la grabación de eventos en la red de energía eléctrica (cortes de energía, sistema sobrecargado, problemas de almacenamiento), a variables relacionadas con la calidad de la energía, al almacenamiento histórico de datos por períodos de hasta 12 meses en algunos casos, entre otros [13].

Los componentes de un medidor inteligente de energía eléctrica incluyen diferentes dispositivos de almacenamiento de información, como pueden ser memorias del tipo RAM, FLASH, SRAM, EEPROM, EPROM, entre otras. Estos dispositivos almacenan datos de diferentes maneras y por diferentes periodos de tiempo, lo cual permite emplearlas de acuerdo a los requerimientos de la información almacenada. Datos referentes a la configuración del medidor de energía requieren periodos de almacenamiento prolongados, además de la posibilidad de ser modificados en cualquier momento. Los datos referentes al estado de la red eléctrica varían constantemente, lo cual implica el uso de un dispositivo de almacenamiento de capacidad reducida. Datos referentes al consumo de energía requieren tiempos de almacenamiento prolongados, ya que estos no varían hasta detectar un sustancial cambio en el consumo. Además este tipo de datos requiere ser almacenado por grandes periodos de tiempo, con el fin de contar con un historial de consumo por parte de los usuarios [ver Figura 5].

Figura 6. Medición, comunicación, almacenamiento y procesamiento en medición inteligente.



Fuente: Autores del libro.

Por otra parte, el almacenamiento de la gran cantidad de datos, necesaria para la administración inteligente de una red de energía eléctrica, puede convertirse en una tarea tediosa. Debido a esto, se hace necesaria la implantación de un sistema de gestión de esta información, lo cual indudablemente incurrirá en el aumento de los costos necesarios para la implementación de este tipo de plataforma.

La capacidad de memoria de un medidor inteligente también es un criterio importante para su correcta selección, esta puede variar dependiendo de la implementación y de la ubicación en el esquema de comunicación en el que se ubique el medidor inteligente [14].

Actualmente existen sistemas diseñados para permitir el almacenamiento de millones de variables, con un excelente rendimiento al ejecutar las operaciones de consulta de los datos almacenados. Ejemplo de estos, es el sistema PI de OSI Soft, el cual aumenta enormemente la confiabilidad y la fiabilidad en el manejo de datos de una red inteligente, gracias a su excelente rendimiento [15].

1.2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EMPLEADOS EN SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Uno de los aspectos más importantes en la medición inteligente es el sistema de comunicación. La comunicación es el aspecto diferenciador entre la medición actual y la medición inteligente; los avances en comunicación hacen posible el conocimiento de datos de manera remota y en tiempos reducidos.

La inserción de la comunicación en la medición se planteó inicialmente como una comunicación unidireccional, implementada por AMR, y se desarrolló con la finalidad que las empresas conocieran los datos de los consumidores sin la necesidad de visitarlos personalmente. De esta manera fue posible que las empresas conocieran la energía consumida por sus clientes en tiempos reducidos.

Después de los sistemas AMR se desarrollaron los sistemas AMI, esta innovación se dio a fin de permitir bidireccionalidad de datos entre el operador de la red y el usuario final en tiempo real. De esta manera fue posible para el operador del sistema eléctrico conocer datos como: consumo del cliente en un determinado momento, factores de calidad de la energía eléctrica y además permitió a los

clientes conocer el consumo acumulado en el mes, precio de la energía en momentos específicos, entre otros.

Es importante resaltar que al iniciar el desarrollo de un proyecto de medición inteligente, factores como: seguridad, robustez, fiabilidad, eficiencia y velocidad en los sistemas de comunicación son esenciales, a fin de evitar problemas en el futuro.

Por esto es necesario considerar cuatro aspectos fundamentales, en la medición inteligente, en cuanto a temas de comunicación: el sistema central, el concentrador de datos, la infraestructura de comunicación y el medidor inteligente. Estos sistemas cumplen diferentes tipos de tareas, pero se encuentran articulados para satisfacer necesidades como procesamiento correcto de datos, almacenamiento de datos, velocidades y efectividad en el envío de información bidireccionalmente, medición de cantidad y calidad de energía consumida por un cliente y la seguridad durante todo el proceso.

1.2.1. Protocolos de comunicación utilizados en procesos de medición inteligente.

La comunicación e integración entre los diferentes dispositivos que componen una red de medición inteligente se establece por medio de protocolos de transferencia de datos. Existen gran cantidad de estos protocolos, los cuales trabajan tanto inalámbricamente como a través de conductores.

Para los sistemas de medición inteligente se deben tener en cuenta condiciones especiales, por ello los protocolos de comunicaciones a usar deben cumplir con características especiales para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.

Aquellos protocolos que cumplan con los requisitos para realizar esta labor deben ser evaluados comparativamente, identificando así, el o los más adecuados a utilizar de acuerdo a los requerimientos establecidos en la aplicación que se va a realizar. Aunque no existe un consenso o estándar internacional sobre la utilización de los protocolos de comunicación para la administración de una red inteligente, se han establecido ciertos lineamientos que enfocan los estándares de comunicación existentes a dos campos principales: redes inteligentes y hogares inteligentes. A continuación se describen estos protocolos de comunicación.

- **IEC 61850 y UCA 2.0.**

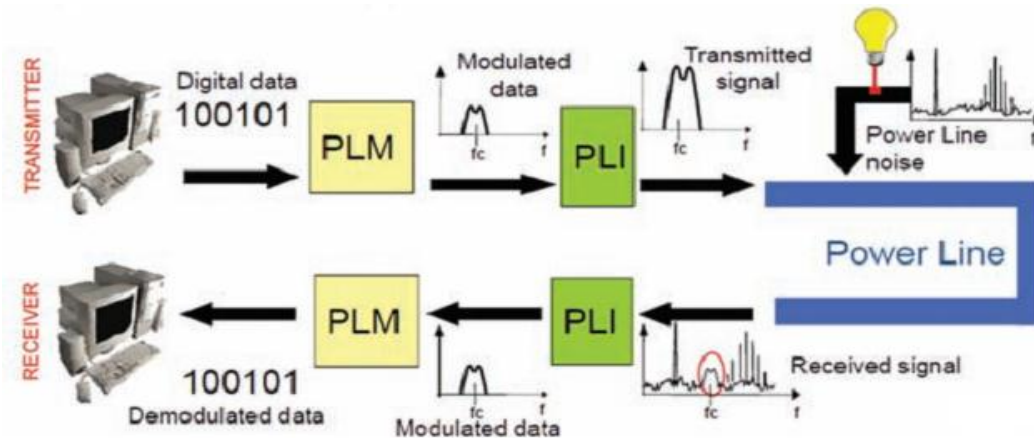
Desarrollado en el año 1997. Está diseñado principalmente para la comunicación dentro de la subestación eléctrica, pero también puede ser utilizado entre subestaciones o centros de control (IEC 62445-1 y -2) y para aplicaciones de medición. Todos los servicios y modelos están diseñados en una forma abstracta llamado ACSI (Interfaz Abstracto Servicio de Comunicación). ACSI es entonces asignada a protocolos como MMS2 y TCP / IP sobre Ethernet. IEC 61850 proporciona la multidifusión basada en GSE (Generic Substation Events) como una forma de transferir rápidamente datos de eventos a través de una red de la subestación entera. El concepto básico de la norma IEC 61850 consiste en un modelo de información jerárquica y orientada a objetos con los dispositivos, nodos y clases que puede contener diferentes atributos y datos. La norma IEC 61850 cubre fuentes distribuidas de energía y de almacenamiento. Incluso podría ser usado para actividades V2G (Vehicle to Grid). También es de interés la norma IEC 61400-25, que es una adaptación de 61850 para los generadores eólicos. La norma IEC 61850 es un estándar flexible, maduro y preparado para el futuro que es más probable que siga a través en el sector de servicios públicos [50].

- **IEC 61334 PLC (Power Line Communication).**

Esta norma hace referencia a las tecnologías de comunicación que permiten la transferencia de datos a través de la red eléctrica usando señales de radio y una

tecnología avanzada de modulación. Esta tecnología puede ser extendida a redes de área local y hasta ser utilizada para compartir una conexión a Internet. El principio de operación consiste en el envío de una señal de alta frecuencia (de 1,6 a 30 MHz) con bajos niveles de energía a través de la red eléctrica. Esta estructura de comunicación se muestra en la figura 6 y consta de un receptor de PLC, un acoplador integrado, un modem de red eléctrica (PLM) y una interfaz de línea de red eléctrica (PLI) que realizan el tratamiento de la señal enviada para permitir su interpretación [51].

Figura 7. Modulación/demodulación de señales de comunicación en PLC.



Fuente: <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Smart%20grid%20-%20Jaime%20Boal.pdf> [51].

- **PRIME PLC (Powerline Related Intelligent Metering Evolution).**

Es una iniciativa focalizada en el desarrollo de una estructura de comunicación pública y abierta, que pueda soportar además de la medición inteligente, la conexión completa de aparatos de medida de energía, gas y agua a través de la

red eléctrica dentro y fuera de la casa. La creación de este protocolo de comunicación pretende garantizar que las necesidades del mercado futuro se cumplan. La velocidad de transferencia de datos es de hasta 130 kbps.

Dado que el desarrollo comenzó a finales de 2007, PRIME es todavía un estándar inmaduro, la norma todavía carece de pruebas de conformidad y aun no hay resultados de pruebas de funcionamiento sobre ambientes reales [51].

- **IEC 62056-21/IEC 61107.**

Esta norma es también conocida también como "Flag". Fue publicada a mediados de 2002 y describe los protocolos de software y hardware adecuados para el intercambio de datos con los medidores de servicios públicos. Es similar en naturaleza al estándar ANSI C12.18. En el lado del hardware, una interfaz óptica y un sistema de dos hilos se describen. Diferentes modos de operación se especifican, etiquetados de A a D, que difieren en la velocidad de transmisión, la direccionalidad y la seguridad. Como uno de los primeros estándares de intercambio de datos con el medidor, la norma IEC 62056-21 se utiliza ampliamente en la actualidad. Sin embargo, no utiliza un modelo de datos o la asignación de memoria uniforme; por lo cual, la comunicación del medidor requiere información particular del fabricante, limitando la intercambiabilidad.

- **SML (Sym2 project).**

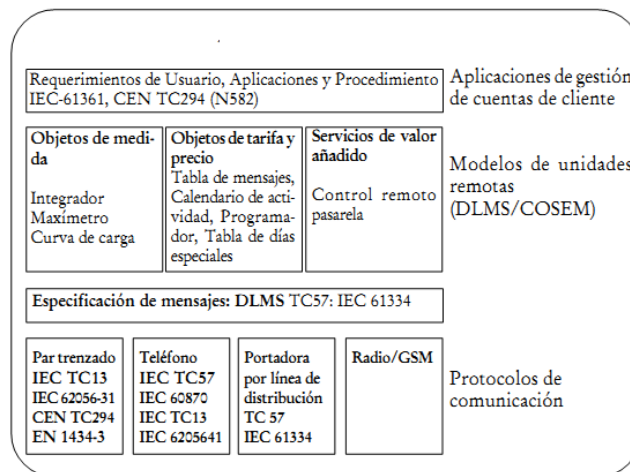
The Smart Message Language (El idioma de los mensajes inteligentes, SML) es un protocolo de comunicación para la adquisición y parametrización de datos desarrollado por empresas alemanas. La idea principal es disponer de una estructura sencilla que se puede utilizar en dispositivos integrados de baja potencia. La forma de aplicación define una estructura de archivos y documentos

para transportar datos entre el punto de medición y un centro de recolección de datos. SML está diseñado específicamente para la medición de electricidad en medidores alemanes. La estandarización de este protocolo aún está en curso.

- **DLMS/COSEM o IEC 62056.**

DLMS fue iniciado por Electricité de France (EDF), y es definido como un lenguaje para estandarizar el intercambio de datos de medición e información de control entre dispositivos de medición de parámetros del sistema eléctrico orientados al mercado abierto, conjuntamente con el COSEM (Companion Specification for Energy Metering) y apoyados en el estándar IEC-62056. Definen cómo se accede a los datos y cómo son definidas las estructuras de los mismos, obteniendo una arquitectura que permite la interoperabilidad entre equipos de medición independientemente del medio de comunicación. En la Figura 7 se ilustra la arquitectura DLMS/COSEM [93].

Figura 8. Arquitectura de comunicación DLMS/COSEM.



Fuente: “Medición de la energía eléctrica bajo esquemas de libre mercado”. Zapata.J, Vidrio.G, Gomez.J, Mijárez.R. [93].

- **IEC 62056-31 "Euridis".**

EURIDIS es un estándar para lectura de medidores de energía eléctrica de manera local y remota, introducida a principios de los años 90 y e integrada en la IEC 62056 en 1999. EURIDIS utiliza un sistema de cableado (Local bus), en el que todos los medidores de energía eléctrica de una construcción se pueden vincular. Por medio de un acoplador magnético se permite la conexión de una unidad portátil para la lectura o programación. El bus puede ser de hasta 500 metros o 100 dispositivos y permite una velocidad de datos de 1200 baudios. Hoy en día, casi 10 millones de dispositivos, sobre todo en países de habla francesa, se comunican utilizando EURIDIS [50].

- **LonWorks/ LonTalk.**

LonWorks (Local Operating Network), es un protocolo que hace factible y rentable la construcción de sistemas abiertos de control. La plataforma se basa en un protocolo creado por Echelon Corporation para los dispositivos de red a través de medios de comunicación como líneas de alta tensión, fibra óptica, y RF (radio frecuencia). Se utiliza para la automatización de diversas funciones dentro de los edificios, tales como la iluminación y HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado). La velocidad de transferencia de datos alcanza hasta los 78 kbps, de acuerdo a la configuración utilizada [50].

- **BAC net.**

Es un protocolo de comunicación estándar para la automatización de edificios y redes de control desarrollado por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE). BACnet proporciona la infraestructura de comunicación necesaria para la integración de los productos

fabricados por diferentes proveedores. Permite la comunicación de sistemas de automatización y control para aplicaciones tales como calefacción, ventilación y control del aire acondicionado, control de iluminación, control de acceso y sistemas de detección de incendios y su equipo asociado.

- **ZigBee (Smart Energy Profile).**

ZigBee es un conjunto de varios protocolos los cuales tienen altos niveles de comunicación inalámbrica. ZigBee se basa en el estándar IEEE 802.15.4. Tiene ventajas comparativas con otros sistemas de comunicación y además en la revisión del estado del arte se observa que es el que goza de mayor aceptación o aplicación en sistemas de medición inteligente. Tiene características como bajo consumo de energía, topología de red de malla, características auto organizativas y de bajo costo y además es fácilmente integrable en los sistemas de comunicación.

- **KNX.**

Es un sistema de domótica que está basado en un bus de datos, es un sistema robusto y fiable. KNX se genera como una fusión del “bus EIB”, BatiBUS y EHS permitiendo de esta manera ser una solución a nivel de automatización.

- **Homeplug (Command and Control).**

Homeplug es un estándar que se genera como alternativa de las redes inalámbricas. Homeplug puede utilizar la instalación eléctrica de la casa o edificio como red física de transmisión de datos y de esta manera permitir la interconexión de varios ordenadores dentro de una misma edificación. Homeplug al utilizar un

medio físico para el intercambio de datos, ofrece la garantía de una mayor transmisión de datos que otros sistemas de transmisión de datos inalámbricos.

- **6LoWPA.**

6LoWPAN corresponde a las siglas en inglés de “IPv6 over Lowpower Wireless Personal Area Networks”. Este estándar hace posible que se pueda usar IPv6 sobre redes que están desarrolladas bajo el estándar IEEE 802.15.4. Esto permite que los aparatos o nodos de una red inalámbrica puedan comunicarse con dispositivos que tengan IP. Esto hace posible la selección de manera remota de un determinado dispositivo, ya que con la IP se puede enviar una orden única para ser ejecutada por ese dispositivo.

- **DPWS.**

El estándar DPWS son las siglas en inglés de “Devices Profile for Web Services”. Este estándar tiene varias funcionalidades entre ellas: comunicación bidireccional, comunicación con un servicio WEB, comunicación de manera constante a través de IP, descripción remota de un dispositivo, seguridad como firma, canal seguro y certificado.

- **IEEE 802.11 / WiFi.**

Es una tecnología popular de red inalámbrica, que proporciona acceso inalámbrico de alta velocidad a Internet y conexiones de red. El sistema WiFi puede operar en la banda 2,4 GHz y 5 GHz, y es de gran aceptación internacional. En la banda de 2.4 GHz puede funcionar en velocidades de 11 Mbits/s, 54 Mbits/s, 300 Mbits/s,

mientras que la banda de 5 GHz es un ancho de banda limpio, debido a que existen muy pocas interferencias, ya que una cantidad reducida de tecnologías trabajan con este ancho de banda. WiFi está diseñado para interconectar computadoras con la red a distancias cortas, para distancias grandes se expone a gran cantidad de interferencias [1].

- **IEEE 802.16 / WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).**

Es una IP basada en tecnología digital inalámbrica de acceso de banda ancha que ofrece un rendimiento similar al WiFi con la cobertura y calidad del servicio de las redes celulares. Puede proporcionar acceso inalámbrico de banda ancha de hasta 50 km para estaciones fijas y de 5-15 km para estaciones móviles [1].

- **BPL (Broadband over Power Line).**

Es una tecnología que permite que los datos se transmitan a través de las líneas eléctricas de servicios públicos. Utiliza onda media, onda corta y bajas frecuencias. Opera a velocidades de 500 kbps a 3 Mbps. Se utiliza para el acceso a Internet de alta velocidad y comunicación de datos.

- **GPRS (General Packet Radio Service).**

Esta tecnología de comunicación permite la conmutación de paquetes para transferencias de datos a través de redes celulares o por medio de una conexión a Internet. Se utiliza para Internet móvil, MMS y otras comunicaciones de datos. En teoría, el límite de velocidad es de 56-114 kbps, pero en la mayoría de las redes

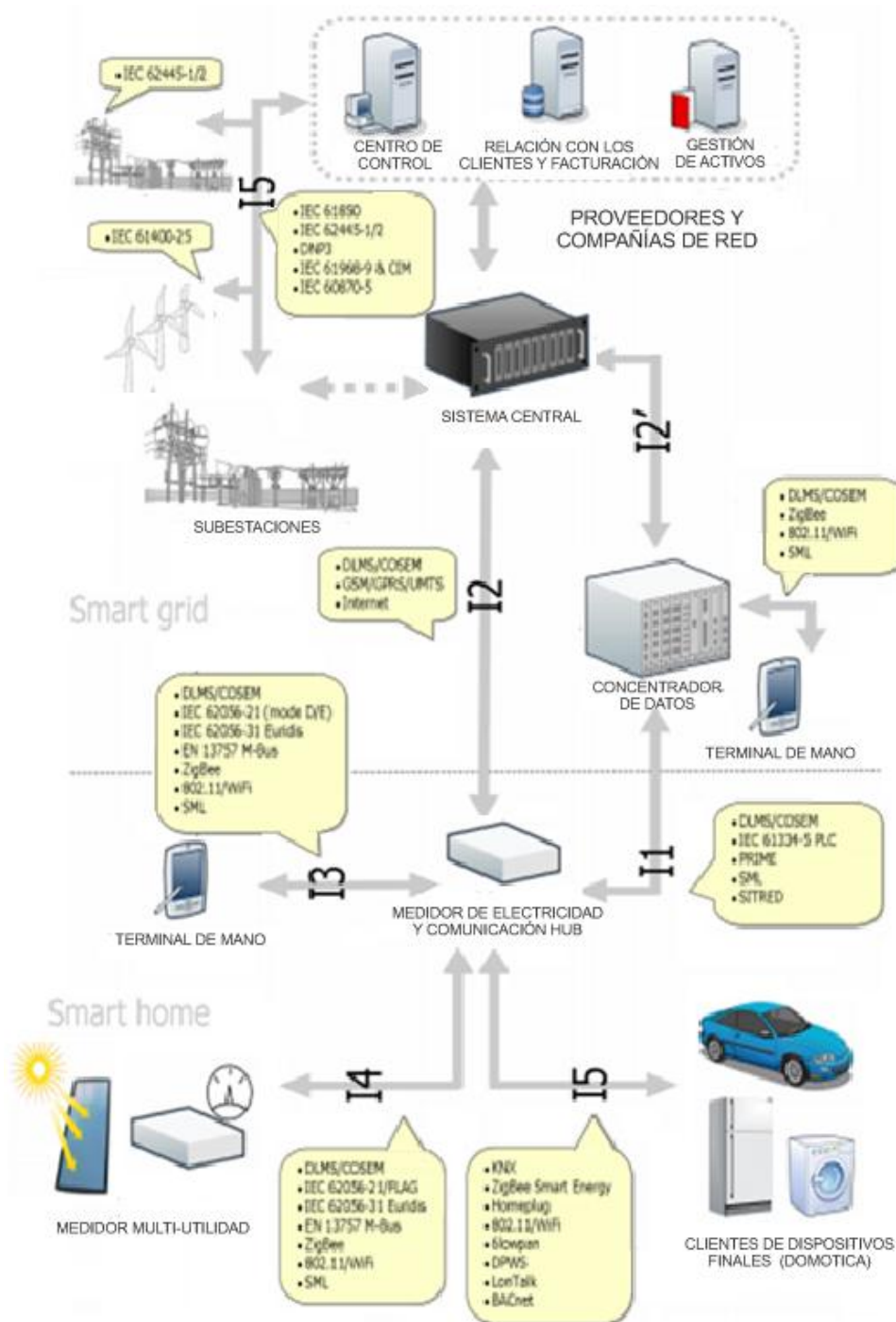
funciona en promedio a 35 kbps. Este servicio está disponible para más de 200 países de todo el mundo.

- **Z-Wave.**

Es una tecnología de comunicaciones inalámbricas de baja potencia diseñada para controlar de forma remota las aplicaciones (sistemas de entretenimiento, iluminación, electrodomésticos y otros) en entornos residenciales y comerciales ligeros.

Esta tecnología opera a diferentes frecuencias de alrededor de 900 MHz en diferentes lugares del mundo. El rango de alcance de Z-wave es de aproximadamente 30 metros en interiores y de 100 metros en exteriores.

Figura 9. Arquitectura de una red inteligente y distribución de estándares de comunicación analizados.



Fuente: “Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standars”. K. De Craemer, G. Deconinck.

La Figura 8 muestra la arquitectura de una red inteligente y la posible distribución de los estándares de comunicación en cada uno de los campos principales mencionados anteriormente. Seguidamente se realiza una descripción de cada uno de los estándares más utilizados, resaltando sus principales características de operación.

1.2.2 Modo de comunicación entre medidores y centrales de control.

A través del análisis del estado del arte, se logró identificar que el modo de comunicación más usado para la comunicación entre medidores inteligentes y los centros almacenadores de datos correspondía a una red mallada. La topología de malla se piensa como una red la cual pueda auto organizarse en caso de presentarse fallas en algún punto del sistema o en algún nodo.

La topología en malla es una topología de red en la que cada nodo está conectado a uno o más de los otros nodos de esta manera es posible llevar los mensajes de un nodo a otro por diferentes caminos. Si la red de malla está completamente conectada, no puede existir absolutamente ninguna interrupción en las comunicaciones.

Cada punto de acceso tiene sus propias conexiones con todos los demás servidores. De esta manera las redes malladas son el modo de comunicación más confiable (en términos de continuidad del servicio, no en seguridad) para el envío de información ya que si un nodo falla existen múltiples nodos de respaldo y de esta manera se auto organiza el sistema para que la información fluya por otros caminos.

1.2.3 Requerimientos de capacidad de red de comunicación.

Como ya se ha mencionado antes, la comunicación es una parte muy importante de los medidores inteligentes. Ellos son capaces de generar grandes cantidades de información y para cumplir con su objetivo deben estar acompañados de una red amplia de comunicación.

La red de comunicación para la infraestructura de medición inteligente de energía eléctrica debe ser robusta y bidireccional, permitiendo así que los consumidores hagan parte de los procesos que realizan las empresas distribuidoras de energía, contribuyendo de esta manera a la eficiencia energética en relación al uso de la energía eléctrica. Esta relación entre empresa-consumidor permite transmitir cantidades importantes de información que pueden ser analizadas por las dos partes. Las empresas toman esta información para poder mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la seguridad del sistema eléctrico, mientras que los usuarios la utilizan para poder analizar, administrar y reducir su consumo de energía eléctrica.

En la actualidad con los medidores inteligentes existentes se han desarrollado diversos algoritmos de control que permiten mejorar la fiabilidad y la optimización de las redes de suministro. Estos medidores integrados en una adecuada red de comunicación, deben cumplir unos requisitos, que representan múltiples funciones y diversos beneficios para las distintas partes involucradas.

Entre estos requisitos se tiene:

- La sincronización de tiempo y el sellado de tiempo de los datos.
- Un alto grado de fiabilidad operacional en la transferencia de cantidades masivas de información entre la red de comunicación y el sistema de gestión.

- Un sistema de comunicación bidireccional entre los centros de mando operativo y los dispositivos finales que son controlados por el cliente.
- Una base de datos y un sistema de gestión en donde los datos son recogidos y almacenados para diferentes usos.
- Un formato de almacenamiento de datos y un proceso de accesibilidad de los mismos.
- Sub bases de datos que se actualizan constantemente debido a la naturaleza dinámica de la red y a los comportamientos de las cargas.
- Algoritmos de encaminamiento de comunicación, y el reconocimiento de fallas de la red eléctrica en la red de comunicación.
- Organización de almacenamiento para un rápido acceso de los distintos usuarios.

Los requisitos mencionados previamente, son los más importantes para lograr una adecuada red de comunicación. Estos se deben tener en cuenta cuando se desea implementar una infraestructura de medición inteligente, a fin de lograr una administración eficiente de la energía eléctrica. Lo anterior permite un ahorro en el consumo de energía eléctrica y por consiguiente del dinero que se ve reflejado en las facturas y esto repercute directamente en la protección del medio ambiente. [44].

1.2.4 Aplicaciones.

En las aplicaciones con medidores de energía eléctrica, la utilización de las tecnologías inalámbricas se convierte en una herramienta indispensable para la comunicación y tratamiento de datos.

ZigBee ha sido diseñada como un estándar de comunicaciones inalámbricas cuya función principal en esta área es permitir la lectura automática de los medidores inteligentes.

En la referencia [52] se presenta el desarrollo de un medidor inteligente, basado en la red de comunicación ZigBee. Este medidor junto con su red de comunicación permite recopilar los consumos de energía eléctrica, los cuales son enviados a una base de datos para su almacenamiento y uso en diferentes funciones. Con esta red de comunicación se pueden reconocer fallas en la red eléctrica, y además se puede inspeccionar y analizar la transmisión de datos por medio de un analizador de red inalámbrica. Estos controles pueden darse tanto por la empresa que distribuye la energía como por los usuarios que la consumen.

Actualmente, se está investigando la posibilidad que en algunos proyectos de redes inteligentes se puedan utilizar las redes de comunicación existentes para reducir costos y nuevas infraestructuras. Para ello se describen algunas opciones de comunicación y se realizan diversas simulaciones que se enfocan hacia distintas consideraciones sobre el ancho de banda para varios niveles de datos de medidores inteligentes dentro de canales de Power Line Carrier (PLC). Esto incluye tiempos reales de recopilación de datos de cada nodo que se encuentra conectado al sistema analizado. En estos estudios es vital evaluar los requisitos de ancho de banda, junto con los requisitos de transmisión de datos así como los picos admisibles de datos que se pueden dar en los anchos de banda establecidos [53].

1.3. NORMATIVIDAD.

Contar con lineamientos, reglas o normas establecidas para llevar a cabo cualquier proyecto es de suma importancia, ya que esto facilita la forma de desarrollar la labor desempeñada.

Al considerar la idea de llevar a cabo un proyecto de medición inteligente es necesario contar con unos estándares plenamente establecidos y definidos, que

permitan conocer por ejemplo que protocolos de comunicación pueden ser utilizados en medios externos e internos; cual debe ser la capacidad de la red de comunicación; que frecuencias se debe manejar para el envío de información de manera inalámbrica; cuáles deben ser los requisitos de seguridad que deben tener los paquetes de información enviados a través de la red; que tipos de equipos se deben utilizar en la infraestructura de medición avanzada y sus características, entre otros.

Actualmente no existe una reglamentación común para todas las naciones que están implantando esta nueva tecnología de medición, por lo cual cada una considera el estándar que cree más conveniente sin darle tanta importancia a la posibilidad de crear una red global que abra las puertas de la comunicación inteligente internacional. Para abordar el tema normatividad puede remitirse al numeral 3.2.

1.4. GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.

Dar un tratamiento adecuado a la gran cantidad de información recopilada de una red de energía eléctrica en un sistema de medición inteligente, abre grandes posibilidades de mejora e innovación en los procesos de control y gestión del suministro eléctrico.

Por tal razón una estructura avanzada de medición requiere un adecuado sistema de gestión de la información.

Esta gestión de información es lo que da posibilidades de visualizar en tiempo real el estado de la red eléctrica y permite que esta estructura avanzada de medición ofrezca opciones como la gestión real de la demanda de energía eléctrica, entre otras.

1.5 SEGURIDAD INFORMÁTICA.

En un mundo en constante evolución informática, diariamente surgen tanto nuevas posibilidades como amenazas.

Es por este motivo que al implementar un sistema avanzado de medición que involucra gran cantidad de procesamiento de datos, también es necesario plantear los aspectos relacionados con la seguridad informática que deben tener estos paquetes de datos, para evitar posibles irrupciones que comprometan la integridad de la información del sistema de medición.

Dada la importancia de la seguridad informática en la medición inteligente, en el capítulo 3 se realiza una descripción del estado del arte vigente relacionado con esta temática.

2. SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE Y SUS FUNCIONALIDADES.

La medición inteligente se agrupa en dos grandes ítemes que son: La lectura automática de medidores y las infraestructuras de medición avanzadas. A continuación se describirán las generalidades de estas dos tecnologías.

2.1 LECTURA AUTOMÁTICA DE MEDIDORES DE ENERGÍA ELÉCTRICA (AMR).

Una característica principal de la lectura automática de medidores de energía eléctrica (AMR), es que las lecturas se realizan de manera unidireccional, es decir que se envían los datos actuales a la compañía de servicio público correspondiente, esto representa una gran ventaja en relación a las lecturas manuales.

Debido a las desventajas que la lectura manual presenta, en el transcurso de los años se han desarrollado diversas tecnologías para la recopilación de los datos de consumo. Entre estas tecnologías se encuentra la AMR, la cual ha traído múltiples beneficios a países que han decidido invertir en su desarrollo e implementación.

Los medidores inteligentes utilizados con este tipo de tecnología deben estar contruidos de manera que cumplan con las diversas funciones necesarias para realizar una adecuada facturación del consumo de energía eléctrica de cada usuario. Estos equipos deben cumplir con ciertos parámetros básicos entre los cuales se encuentran: Las tensiones de fase y de línea, las corrientes, los factores de potencia, la frecuencia, los datos de energía tales como kWh, kVA, y kVAr con indicación de la hora, el diagrama vectorial de eventos, los parámetros de calidad de la energía eléctrica, que incluye, el flicker, las variaciones de la señal de tensión, entre otros [2].

Figura 10. Tecnología AMR.



Fuente: Autores del libro.

Estos tipos de medidores ofrecen múltiples ventajas tanto para los usuarios finales como para los proveedores. Algunas de estas ventajas son: mayor comodidad para el cliente y para las empresas de energía ya que no se necesita que alguien asista a tomar las lecturas; reducción de los errores humanos por lectura; realización de informes más frecuentes, ya sea diaria, semanal o mensualmente; fijación de precios en tiempo real; identificación temprana de fallas y anomalías en el sistema; control del comportamiento de consumo por parte de los usuarios de energía; entre otras [3] (ver Figura 9).

Como ya se ha mencionado antes, el sistema de medición AMR se basa en la lectura automática de medidores y para ello es necesario tener sistemas de comunicación que permitan realizar las correspondientes lecturas. En estos sistemas de comunicación se tiene dos medios de transmisión de información: de forma de lectura inalámbrica y a través de las líneas de energía eléctrica (PLC).

La lectura automática de medidores de energía eléctrica, ha sido implementada en varios países, especialmente en el continente europeo.

Italia es el país con mayor grado de desarrollo de esta tecnología ya que, aproximadamente el 86% de todos los clientes cuentan con medidores de energía eléctrica de lectura automática. En Italia y en Suecia se realizaron algunos estudios en años pasados y se tomó la decisión de sustituir el 100% de los medidores. Según esos estudios por estos meses se debe estar llegando a esa meta de cambio. En países como Dinamarca, España y Finlandia también se optó por cambiar un porcentaje significativo de medidores de energía para analizar su comportamiento y establecer la factibilidad de cambiar todos los sistemas de medición [4].

En Alemania y en Holanda se ha implementado el sistema QUINDIS AMR, el cual se ha presentado como base para la medición inteligente. En este sistema, los medidores instalados están equipados con dispositivos de transmisión de radio y deben enviar sus datos 6 veces al día e ir almacenando los datos más recientes [3].

2.2 INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA (AMI).

Esta infraestructura de medición avanzada se desarrolla bajo la visión fundamental de proveer a los sistemas de energía de monitorización y control de cada cliente en tiempo real. A nivel mundial se han planteado diferentes visiones respecto a la medición avanzada, en Australia el MCE (Ministerial Council on Energy) en 2007 acordó establecer un mínimo de funcionalidad de los medidores inteligentes: Lectura en forma remota, calidad de oferta, detección de corte, capacidad de desconexión, conexión remota y limitar energía en caso de emergencia [5] [6]. Por consiguiente, las necesidades en cuanto a medición avanzada se plantean dependiendo de factores culturales, económicos, políticos, geográficos y sociales.

Algunas naciones plantean la necesidad de una infraestructura de medición avanzada de punta, pero otras plantean una integración con un mínimo pero importante grupo de funcionalidades, como se describió esto responde a las diferentes variables que se manejan en cada uno de los países.

Un sistema AMI debe tener características fundamentales como escalabilidad, fiabilidad, disponibilidad y auto-organización. La escalabilidad como medio para reaccionar y adaptarse sin perder la calidad bajo la cual fue configurada, fiabilidad para de esta manera asegurar su buen funcionamiento, disponibilidad a fin de aseverar que a pesar de condiciones críticas la infraestructura no va a fallar y por último la auto-organización para ordenar las interacciones de un proceso (ver Figura 10).

Figura 11. Sistema AMI.



Fuente: Autores del libro.

En la actualidad, en los sistemas eléctricos existen problemas por la creciente brecha entre la oferta y la demanda de esta energía [1]. Esta creciente brecha no se resuelve solamente incrementando tanto la generación y la transmisión de energía eléctrica; es necesario integrar diferentes soluciones y una de ellas es la gestión eficiente de la energía eléctrica, lo cual es posible realizarlo con la medición inteligente.

Algunas posibles características de las redes inteligentes: La participación activa de los consumidores, la conmutación automática en caso de fallas, la generación de opciones de almacenamiento, la optimización el rendimiento de los activos para mejorar la eficiencia operativa y de funcionamiento, esto es necesario para mantener y mejorar la seguridad energética [7].

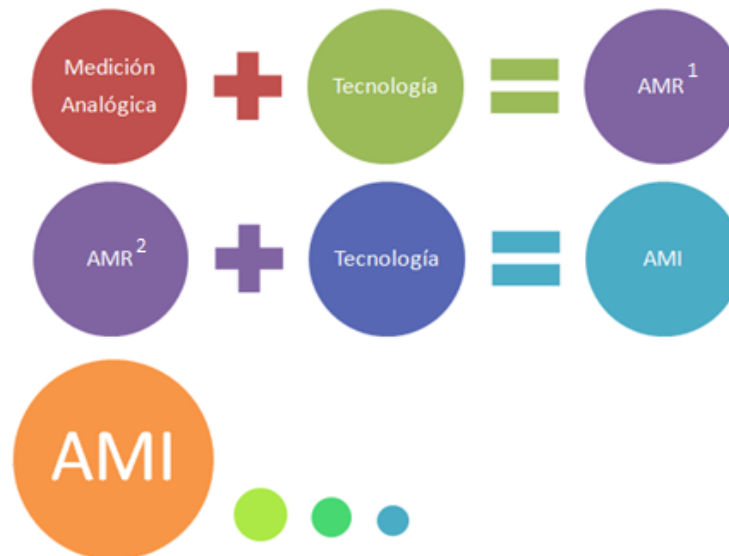
Actualmente es imposible satisfacer el incremento en la demanda de energía eléctrica desde el punto de vista de la sostenibilidad. Los sistemas de medición inteligente buscan una solución integral para el problema. La prioridad es el desarrollo de sistemas de energía eléctrica eficientes, que prioricen el uso eficiente de energía eléctrica por parte de los usuarios y la inserción al sistema de energía eléctrica de la energía proveniente de recursos renovables (generación distribuida).

Los antiguos sistemas de energía tenían en su mayoría cargas lineales, estas cargas permitían el uso de medidores analógicos, los cuales cuantificaban adecuadamente la cantidad de energía eléctrica consumida por un usuario. El auge y los avances en la electrónica y el desarrollo de nuevos sistemas de iluminación han hecho que las cargas ya no sean lineales. Adicionalmente, los avances en el área de la electrónica han permitido el desarrollo de medidores digitales, con el fin de reducir la incertidumbre en la medición y el empleo de otros modelos de medición de energía eléctrica. Las empresas de energía eléctrica deseaban conocer los consumos de sus clientes de manera rápida, por lo cual añadieron módulos de comunicaciones a los medidores analógicos y digitales; con lo cual surge la lectura automática de medidores.

La necesidad de los sistemas de energía eléctrica de tener conocimiento de variables eléctricas, y control sobre la demanda, impulso el desarrollo de los sistemas de medición inteligente. En la figura 11 se presenta el avance en los

procesos de medición, desde la medición analógica hasta los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica.

Figura 12. Avance tecnológico en medición de variables eléctricas.



AMR¹ Hace referencia a Lectura automática de medidores por medio de medidores analógicos

AMR² Hace referencia a Lectura automática de medidores por medio de medidores digitales

Fuente: Autores del libro.

2.2.1 Funcionalidades del sistema de medición inteligente.

Los sistemas de medición inteligente buscan tener un impacto positivo e innovador en los sistemas de energía eléctrica. Aspectos importantes del sistema de medición inteligente son: El conocimiento de las variables eléctricas y de la calidad de la energía del usuario por parte del comercializador, distribuidor, transmisor o generador de estas en tiempo real, la gestión de la demanda de energía eléctrica, el acople de la medición de energía eléctrica con otros servicios públicos, la inserción de vehículos eléctricos y energía renovables al sistema de energía, los

nuevos planes tarifarios para la energía eléctrica, la localización de pérdidas de energía, entre otros. A continuación se presentan detalladamente las innovaciones que permiten los sistemas de medición inteligente.

2.2.1.1 Gestión energética

La gestión energética hace referencia a los distintos servicios que se pueden brindar a partir de la implementación de los sistemas de medición inteligente, la innovación a la que se pretende llegar se ve reflejada en los nuevos servicios.

- **Aprovechamiento de la medición inteligente en electricidad y otros servicios públicos.**

Entre los principales beneficios que presenta la implementación de medición inteligente, se encuentra la posibilidad de combinar la medición de varios servicios públicos como la medida del volumen del agua y del gas y la energía eléctrica. La mayor parte de los estudios y proyectos que se han llevado a cabo combinan la medición de energía eléctrica con el volumen de agua consumida y la energía eléctrica con el volumen del gas consumido. Son muy pocos los proyectos en donde se ha implementado la combinación de la medición de consumo de los tres servicios (ver Figura 12).

La mayor parte de las implementaciones que se han realizado en diferentes partes del mundo, se han realizado en el sector energético. Debido a los buenos resultados que se han dado en las empresas de energía, muchas empresas de servicio del agua han implementado estrategias para

gestionar la demanda del consumo de agua, para proporcionarle al cliente mejoras en los servicios y para reducir las pérdidas o el desperdicio del agua.

Algunos ejemplos de estas implementaciones se describen a continuación.

Un ejemplo de estos proyectos, se está desarrollando en el estado de Victoria (Australia), en donde se ha ordenado el despliegue de medidores inteligentes de energía eléctrica y junto con ellos se ha buscado el aprovechamiento de la red para la implementación de medidores inteligentes en el servicio de agua para reducir los costos de ejecución. Esto se da debido a la necesidad de mejorar significativamente el suministro de agua potable y mejorar el uso eficiente de este preciado líquido. Aquí se permite al cliente tomar decisiones sobre el uso del agua, monitorizando su consumo, identificando y corrigiendo fugas. Además de esto, se brindan tarifas de agua innovadoras y la posibilidad de obtener información diaria, entre otros. [21].

Los sistemas que combinan la medición del consumo de energía eléctrica y gas se están desplegando por toda Europa. Estos medidores reemplazan los contadores tradicionales y su principal función es que permiten la lectura remota de los datos de consumo medidos, además de esto, existen funciones adicionales que permiten aplicaciones de control avanzadas como la interacción con aparatos y agentes del mercado. [22].

Figura 13. Integración de la medición en los servicios públicos.



Fuente: Autores del libro.

Además de los medidores de energía, los medidores inteligentes de gas también juegan un papel importante en las redes inteligentes. Estos medidores cuentan con múltiples beneficios como detectar fugas, robos, realizar el análisis de la eficiencia, y proporcionar en tiempo real los consumos de gas. Actualmente, el gas natural se suministra a los diferentes usuarios residenciales por medio de tuberías específicas que cuentan con medidores mecánicos que registran el volumen de gas consumido, para realizar los procesos de facturación. Se han desarrollado diversos estudios sobre los medidores de volumen de gas y uno de ellos es el sistema de medición de alta resolución de la lectura de los medidores de gas residenciales llamado SMART. SMART, es un sistema que incluye diversos algoritmos que permiten observar patrones de consumo de gas en diferentes aparatos y además de esto permite registrar consumos con

lecturas rápidas así como los medidores inteligentes de energía eléctrica. [23].

En el Reino Unido, el Departamento de Energía y Cambio Climático ha anunciado que los medidores inteligentes tanto de energía eléctrica como de gas serán implementados totalmente a finales del año 2020.

Estos medidores, deberán lecturas precisas de datos de medición y deberán ser capaces de comunicar de forma segura y fiable la información recogida hasta las diferentes bases de datos. [24].

En el tema de servicios públicos han existido diversos métodos para el análisis de la implementación de medidores inteligentes. Se destaca un estudio en donde se proponen métodos estadísticos para la detección de anomalías en medidores inteligentes, para la previsión de la demanda y para el análisis de las diferentes empresas de servicios públicos. Estos análisis permiten comprender diferentes problemas con los distintos medidores y además permiten entender por qué fracasan algunos medidores y su mal funcionamiento en ciertos casos. [25].

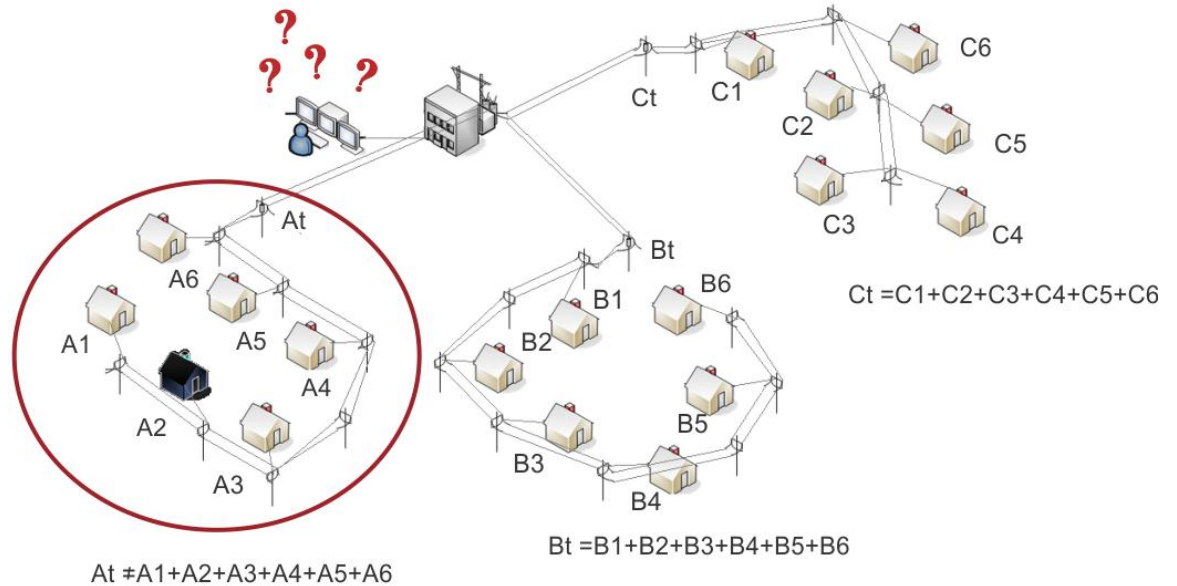
- **Rastreo de pérdidas no técnicas.**

Uno de los grandes problemas en las redes eléctricas son las pérdidas no técnicas de energía eléctrica, las cuales representan desfalcos del orden de 20 mil millones de dólares anualmente en todo el mundo [14]. En la India solamente se factura el 55% de la energía generada, en los países bajos las pérdidas por consumos anómalos (energía no facturada) ascienden al 23% [30] y en Turquía representa el 17,7% [31]. Estos consumos anómalos se presentan por diferentes motivos, por ejemplo en los países bajos se

asocia a actividades del crimen organizado, la energía que se deja de facturar es utilizada para el cultivo de drogas como la marihuana [30].

Como ya se describió, esta energía no facturada representa cantidades importantes de dinero. Hay que tener en cuenta que las tasas de energía no facturada varían de un lugar a otro. En algunos países o regiones los porcentajes pueden ser cercanos a cero y en otros como en el caso de la India pueden representar la mitad de la energía generada.

Figura 14. Rastreo de pérdidas no técnicas.



Fuente: Autores del libro.

Los gobiernos y las empresas distribuidoras y comercializadoras de energía eléctrica están tomando medidas al respecto. La preocupación de las entidades gubernamentales es por qué se están dejando de cobrar impuestos por esta energía no facturada y por parte de las empresas la preocupación es la reducción de las pérdidas financieras respecto a la energía que compran a los generadores y la que se factura a los

consumidores. Es aquí donde los medidores inteligentes ganan protagonismo, al ser una de las soluciones viables para la reducción de los altos índices de energía no facturada.

El consumo anómalo de energía eléctrica se puede determinar a partir de medidores inteligentes ya que estos envían información de manera constante y en tiempo real a los centros de recolección y procesamiento de datos. Los centros contrastan la energía que están enviando a un circuito con la suma total de los consumos de los medidores del mismo circuito. Si la comparación arroja resultados diferentes se puede determinar que en ese lugar se está consumiendo energía eléctrica que no es registrada por el medidor, pudiéndose observar cual usuario o usuarios no están registrando el todo de su consumo de energía eléctrica [ver Figura 13].

Un estudio de la India presenta un método para la determinación de robo de energía es a partir de frecuencias, en un estado normal la frecuencia de la red es de 60 Hz (América) y de 50 Hz (Europa). Cuando la red no tiene cargas conectadas se envían altas frecuencias a bajas tensiones y la señal no presenta ningún efecto secundario, pero cuando hay cargas conectadas dicha señal si presenta efectos secundarios. De esta manera si todos los medidores se aíslan de la red y se envía la señal de alta frecuencia se puede determinar si existe alguna carga que está conectada ilegalmente a la red, es importante afirmar que este método solo es factible en líneas cortas [31].

Actualmente en Colombia, se están realizando diversos pilotos para establecer consumos anómalos por no facturación de energía eléctrica, tal como se muestra en la Figura 13. Se destacan los prototipos realizados en las electrificadoras de la zona Caribe y en la actualidad los que se están realizando por parte de la Universidad industrial de Santander a la ESSA-

E.S.P que consisten en unos pilotos en medición inteligente en circuitos de distribución en diferentes circuitos del sistema de distribución de energía eléctrica de este operador de red.

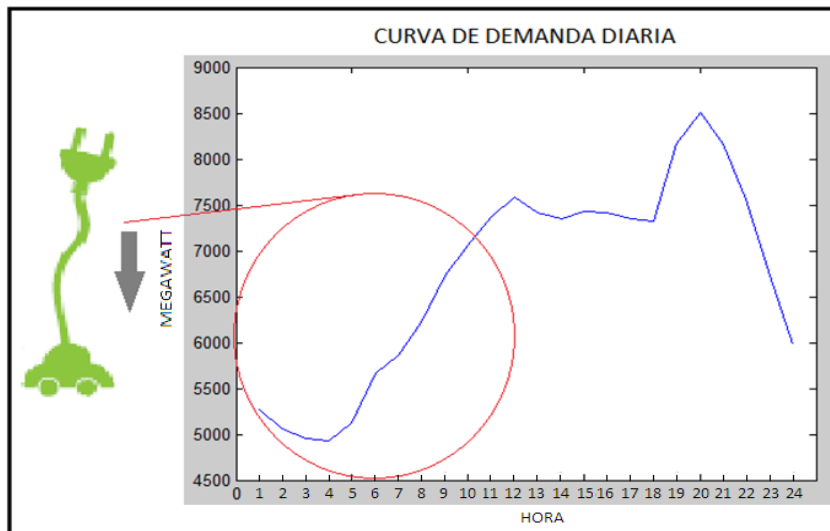
- **Vehículos eléctricos como consumidores y almacenadores.**

El almacenamiento de la energía restringe en parte las opciones de generación con sistemas renovables. Las turbinas eólicas en las noches pueden seguir generando energía eléctrica, el problema reside en que dicha generación no puede ser aprovechada completamente por los bajos consumos a altas horas de la noche y en la madrugada; en este caso los vehículos eléctricos asociados con los medidores inteligentes son una posible alternativa de solución de este problema [36].

La tecnología V2G siglas inglesas de “Vehicle-To-Grid”, plantea que el almacenamiento de energía en los vehículos eléctricos se debe dar en las horas de bajo consumo y donde el precio de la energía es económico [Figura 14] y en las horas pico los vehículos deberían inyectar esta energía a la red [Figura 15], la cual podrá ser comprada a un precio mayor respecto al adquirido [37]. Este concepto permitiría que las energías renovables puedan almacenar los excedentes de la generación en los autos eléctricos.

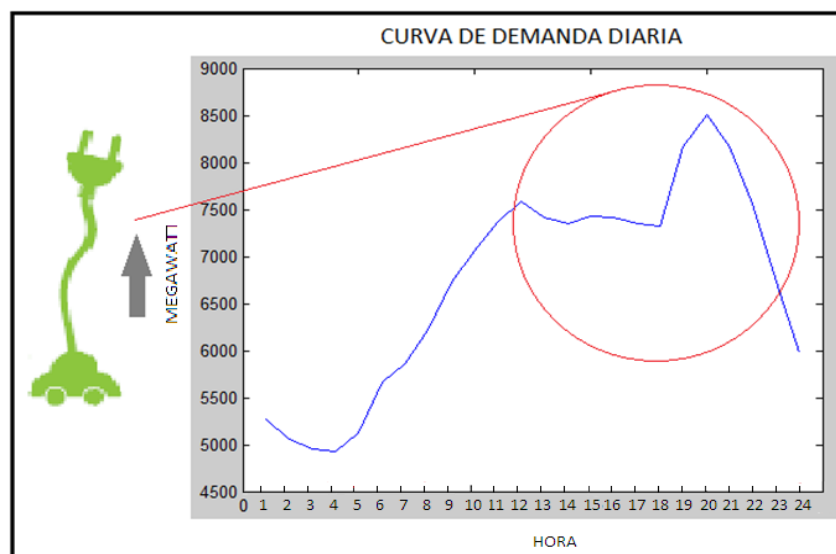
La importancia de los medidores inteligentes radica en la facturación de la energía que se toma y se inyecta a la red por parte de los autos eléctricos, además de la medición de los estándares de calidad en la energía eléctrica que se está suministrando a la red [38]. Estos estándares de calidad son importantes y se deben priorizar al abordarlos, ya que si no se tienen estándares de calidad en la energía eléctrica adecuados en los autos eléctricos que inyectan esta energía a la red, se podrían aumentar los problemas de calidad de energía eléctrica en la red de suministro.

Figura 15. Almacenamiento de energía de los vehículos eléctricos en tiempos de baja demanda.



Fuente: Autores del libro.

Figura 16. Inserción de energía de los vehículos eléctricos a la red en tiempos de alta demanda.



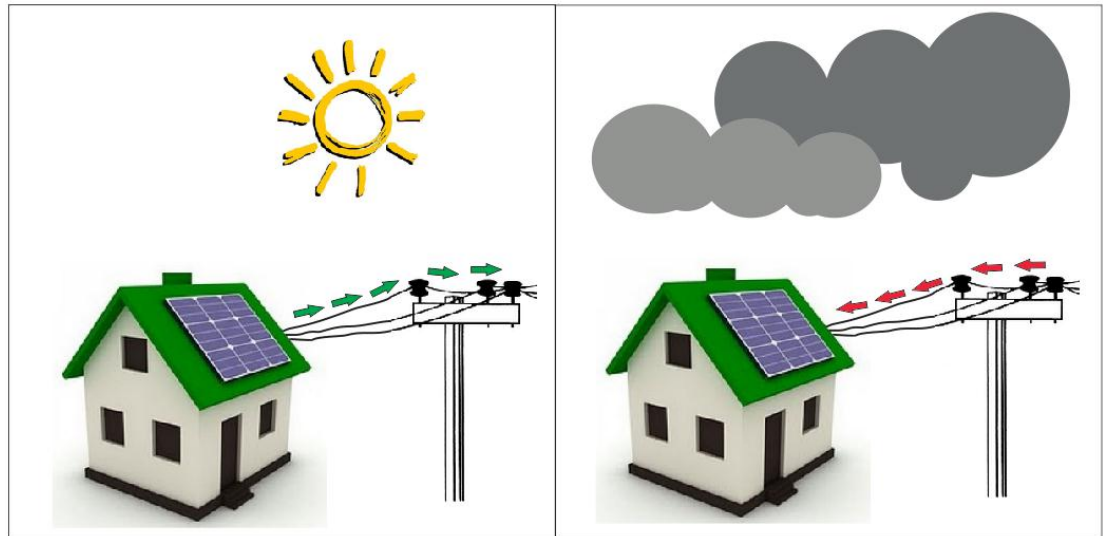
Fuente: Autores del libro.

- **Generación distribuida.**

En un mundo actual donde se albergan serias preocupaciones por el cambio climático, se ha hecho evidente que se tiene que revisar la contaminación que producen las fuentes de energía convencionales y revertirlas a fuentes de energía renovables. Esta necesidad combinada con el aumento en el precio de los combustibles primarios, la demanda de energía de mayor calidad y la capacidad de abastecimiento insuficiente de un sistema de generación central, ha llevado a incluir el concepto de generación distribuida dentro de una red inteligente [39].

La generación distribuida está asociada con la producción de energía a partir de fuentes renovables, aunque también incluye la generación por medio de fuentes convencionales. Estas tecnologías por lo general incluyen energía fotovoltaica, generadores eólicos, biomasa, micro turbinas, mini y microcentrales hidroeléctricas, motores de combustión interna, etc. Actualmente, la desregulación de los mercados de energía y las nuevas políticas en materia de desarrollo sostenible han sido probablemente los principales motores para el surgimiento de la generación distribuida. Muy a menudo los temas de generación de energía de este tipo se desarrollan a pequeña escala. Esto debido a la disponibilidad local de la fuente específica y al hecho que las políticas ambientales proporcionan incentivos para la producción a pequeña escala orientada a la energía de autoabastecimiento [4] [40].

Figura 17. Esquema de una generación distribuida.



Fuente: Autores del libro.

El esquema de red de energía eléctrica existente actualmente fue diseñado en el siglo XX, cuando los centros de generación se suponían debían ser centralizados. Es decir, grandes centrales generadoras se ubicaban en lugares estratégicos, dispuestas de tal manera que pudieran suplir los requerimientos de grandes cantidades de usuarios. Este esquema, sostenido por más de 100 años requiere en la mayoría de los casos el transporte de la energía por largas extensiones, lo cual aumenta considerablemente las pérdidas y reduce la eficiencia de la red misma. Actualmente los requerimientos del servicio de prestación de energía han aumentado considerablemente, lo cual ha sacado a la luz las falencias del sistema actual respecto a la capacidad para suplir los servicios de energía eléctrica de forma adecuada.

La idea principal detrás del concepto de generación distribuida consiste en brindar un soporte en la prestación del servicio de energía eléctrica a la red actual por medio de la instalación de pequeñas eco-centrales de generación

cerca de las zonas urbanas. Estas plantas construidas para suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del usuario local, tendrían la posibilidad de inyectar el excedente de energía producida directamente a la red de distribución. Lo cual permitiría entre muchas otras cosas la reducción de la cantidad de energía transportada desde las centrales eléctricas para suplir la demanda en cualquier momento del día, la participación del cliente de manera activa, la mejora de la eficiencia energética, la reducción de costos, la mejora de la calidad [41] [ver Figura 16].

La novedad en el concepto de generación distribuida es que con la penetración de la pequeña generación, la red de distribución no puede considerarse ya como un elemento pasivo de la red de transmisión. Lo cual implica que el sistema completo debe ser rediseñado para ser operado como una unidad integrada [4].

Integrar la generación distribuida con la red actual de energía requiere la implementación de nuevos esquemas de protección, control de tensión y de instrumentos para satisfacer las necesidades del flujo de potencia bidireccional. Estos requerimientos pueden ser suplidos con la ayuda de sistemas de medición AMI, logrando así integrar la generación distribuida a la red y permitiendo alcanzar una gestión adecuada de la demanda [10].

La inclusión de la generación distribuida permite además generar nuevos esquemas de uso de energía y precios. Un ejemplo de esto sería la posibilidad de inyectar la energía de los eco-generadores a la red durante las horas de carga pico, lo cual mejoraría la estabilidad, la fiabilidad y la eficiencia del sistema de energía [10].

Por otra parte, existen aspectos técnicos, normativos y culturales que se deben considerar para poner en marcha planes como la inclusión de la

generación distribuida dentro de una red de energía eléctrica. Parámetros como mayor vigilancia y control de la calidad del servicio, debido a la inclusión de armónicos, y el cambio del concepto de generación para con los usuarios deben ser considerados para que los proyectos de este tipo se desarrollen de manera exitosa [30].

Existen normas que abordan los problemas técnicos que deben ser considerados para la integración de la generación distribuida en las redes eléctricas. Estas normas establecen algunos requisitos de interconexión para lograr la interoperabilidad de los sistemas, como lo son el acondicionamiento de la potencia, el control de la calidad de la energía, las protecciones, la gestión de carga, la comunicación y la medición. Existen también, diversos estudios enfocados a determinar la cantidad ideal de energía distribuida que debe ingresar a la red para lograr su uso eficiente, logrando disminuir eficazmente la transmisión de energía a grandes distancias [42].

- **Gestión de la demanda.**

Actualmente los usuarios consumen energía y al final del mes pagan por lo que consumieron, básicamente se demanda energía y los generadores suplen esa demanda, pasando obviamente por un largo proceso generación-transmisión-distribución-comercialización hasta que llega la energía al usuario final.

Este modelo tiene un aspecto fundamental y es que la energía que se consume no es constante a lo largo de un día, ni en los meses del año, por lo cual es necesario parametrizar la curva de demanda de energía eléctrica, dependiendo del día o del mes del año. Esta curva modela las variaciones

en el consumo de energía a lo largo día para los diferentes tipos de usuarios de la energía eléctrica. Los tres principales sectores en los cuales se agrupan los consumidores son: residencial, comercial e industrial.

En la Figura 17 se observa la demanda real de energía eléctrica promedio en Colombia, presentada en marzo del 2012 por XM, para cada hora del día, y cada día de la semana. En la Figura 18 se observa la distribución del consumo de energía eléctrica entre los diferentes tipos de usuarios. [90]

La demanda presenta dos picos considerables estos se presentan a las 12 del mediodía y a las 8 pm que corresponden a 7000 y 8500 MW aproximadamente, concernientes a la potencia que se está consumiendo en estos instantes. El máximo pico de 8500 MW es de vital importancia ya que el sistema eléctrico debe poder generar, transmitir y distribuir esa cantidad de energía, lo cual obliga a diseñar sistemas eléctricos robustos con grandes hidroeléctricas, termoeléctricas y líneas de transmisión a fin de suplir los requerimientos de los consumidores.

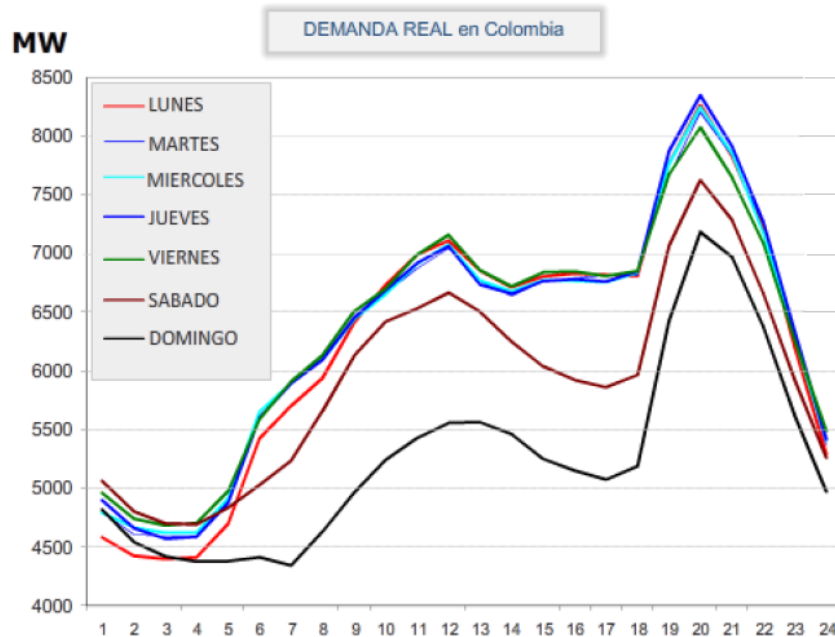
Con los medidores inteligentes se puede subsanar este inconveniente, ya que la empresa que comercializa y distribuye la energía obtendrá a través de la medición inteligente una gran cantidad de datos de cada cliente en tiempo real. Los datos obtenidos permitirán crear perfiles, a fin de presentar propuestas alternativas para el sector industrial, comercial y residencial buscando aplanar esta curva de demanda. Se proponen soluciones como: Desplazar consumos a horas que no se consideren críticas, modificar tarifas buscando ahorros económicos a quienes decidan no operar en momentos de alta demanda, establecer los niveles de demanda máxima y mínima para todos los sectores [43]. El lograr homogenizar la curva genera efectos económicos para los usuarios y entes del sistema eléctrico, además de una reducción en los planes de expansión a futuro del sistema [20]. La toma de

estas medidas repercutirá en disminución de los picos y un aumento en los valles de la curva.

Un estudio de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid España determinó que se presentará una reducción en el valor de la factura, además de ahorros en expansión y operación del sistema de generación y ahorros en inversión y mantenimiento de las redes de distribución, además se cuantifica que el ahorro será del 15% distribuido en: 3% de desplazamiento de la carga y 12% en disminución del consumo de energía, siendo los más interesados en este ahorro los pertenecientes al sector industrial que en Colombia representan el 33% de la energía total consumida [44].

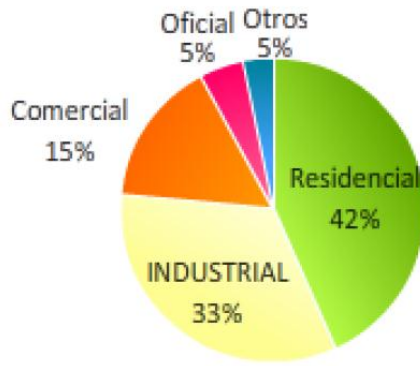
Por lo cual el sistema en el cual la generación se adapta a la demanda va a cambiar y se va a presentar un equilibrio en donde la demanda y la generación tienden a estabilizarse mutuamente [2].

Figura 18. Demanda real de energía eléctrica promedio en Colombia por días, marzo del 2012.



Fuente: <https://www.xm.com.co> [90]

Figura 19. Distribución del consumo de energía eléctrica entre los diferentes tipos de usuarios, marzo del 2012.



Fuente: <https://www.xm.com.co> [90]

- **Virtual Power Plant.**

Como se mencionó anteriormente, la generación distribuida consiste en generar energía eléctrica por medio de pequeñas fuentes de energía, con el objetivo de reducir pérdidas y de tener generación con bajos precios de mantenimiento, baja contaminación y una eficiencia relativamente alta.

En este campo de generación distribuida es donde nace el concepto de Virtual Power Plant (VPP).

VPP es un concepto que apunta a la agregación de recursos distribuidos y que toma gran importancia debido a las ventajas e innovaciones en las redes eléctricas.

Este concepto va adjunto con algunos otros conceptos como cargas eléctricas virtuales (VPLS), y los medidores virtuales [15] [45]. Y lo que se

busca es integrar de manera óptima la generación distribuida a las redes de energía eléctrica.

Las plantas virtuales serán la representación de las plantas de cogeneración que estén presentes en hogares, empresas o en cualquier sitio. Estas plantas virtuales proveen un control para integrar o excluir las plantas de cogeneración del sistema de energía, esto es posible gracias a las ventajas en comunicación y control que se tienen actualmente y la integración de los medidores inteligentes. La función del medidor virtual es la de supervisar desde varios medidores inteligentes la red de distribución [1] [46]. Con lo anterior se entiende la importancia de las Virtual Power Plant ya que representa una alternativa para la operación del sistema eléctrico del futuro.

- **Impacto de la medición inteligente en el uso de la energía eléctrica.**

Actualmente muchos de los consumidores de energía eléctrica están acostumbrados a utilizar esta energía eléctrica sin tener en cuenta muchas veces el costo de la misma. Las empresas que suministran energía eléctrica están trabajando continuamente con el objetivo de que los usuarios perciban de forma adecuada la utilización de los medidores inteligentes y al mismo tiempo que sean conscientes de que estos traen consigo múltiples beneficios para ellos como: una facturación menos incierta, actualizaciones continuas del consumo de energía eléctrica, monitorización de otros parámetros de variables eléctricas, predicción del costo de la energía eléctrica, e información actualizada de los operadores y comercializadores de la energía eléctrica.

Las empresas deben concienciar a la gente acerca de los beneficios de los sistemas de medición inteligente. Se deben usar estrategias de mercadeo

para incentivar al cliente a que implemente sistemas de medición inteligente de energía eléctrica y además haga un buen uso del mismo. La motivación para la implementación se puede dar a través de paquetes de energía o tarifas atractivas para el cliente a corto, mediano y largo plazo [49].

Uno de los objetivos de los sistemas de medición inteligente es incrementar la eficiencia y control de los sistemas de energía eléctrica. El conocimiento detallado del consumo de energía eléctrica de los clientes, por parte de la empresa comercializadora de energía, permitirá ofrecer planes de tarifas a los usuarios que les permitirá ahorrar por concepto de un menor consumo de energía eléctrica producto de un uso eficiente de la misma [43] [54].

A continuación se presenta un resumen de los temas concernientes a facturación en medición inteligente. En él se explican algunos detalles, de temas como perfiles de carga, esquemas de precios, planes tarifarios de energía, energía prepagada.

- **Perfil de carga.**

El ahorro de energía eléctrica hoy en día se ha convertido en un tema importante a tratar, debido a que es punto esencial cuando se habla del cuidado de los recursos y la protección del medio ambiente.

Con la implementación de los medidores inteligentes se espera una reducción en la contaminación ambiental y se espera un aumento en la eficiencia energética, pero para ello se considera indispensable realizar un estudio detallado de las características de cada una de las partes del sector eléctrico donde se desea realizar la implementación.

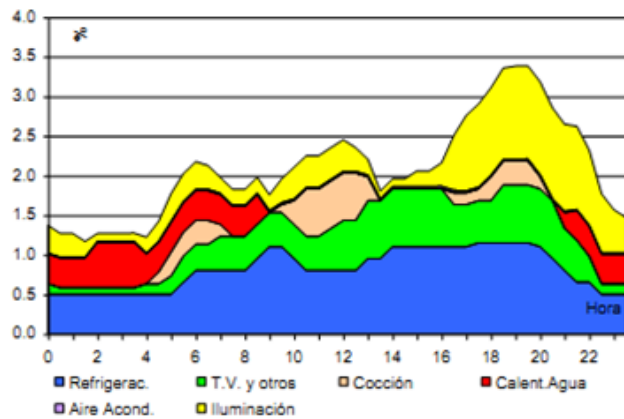
Esta caracterización de la red, permitirá conocer en qué parte de ella, se está gastando energía de forma innecesaria y por lo tanto se podrá evaluar y gestionar la forma como se va a dar el ahorro de energía junto con la medición inteligente. Para esto, es importante establecer perfiles de carga que ayuden a ver el comportamiento de los usuarios en distintos intervalos de tiempo para poder tomar las mejores decisiones respecto al tema de energía. Es importante señalar que en el mercado de energía eléctrica, existen diferentes sectores entre los que se encuentran el industrial, el comercial y el doméstico y que los ahorros de energía se estudian principalmente los usuarios residenciales, dado que en él por lo general, se encuentran la mayor parte de los usuarios.

El perfil de carga está directamente relacionado con el consumo de energía de los usuarios en intervalos de tiempo y con la adquisición de energía eléctrica por medio de una empresa comercializadora.

En los perfiles de carga se tiene en cuenta la demanda y se clasifican a todos los usuarios dependiendo de su consumo de energía eléctrica. Estos perfiles son realmente importantes a la hora de operar una red de energía. Además de esto se debe analizar la demanda que es la potencia que se requiere en ciertos intervalos de tiempo para que las cargas puedan funcionar (ver Figuras 19 y 20).

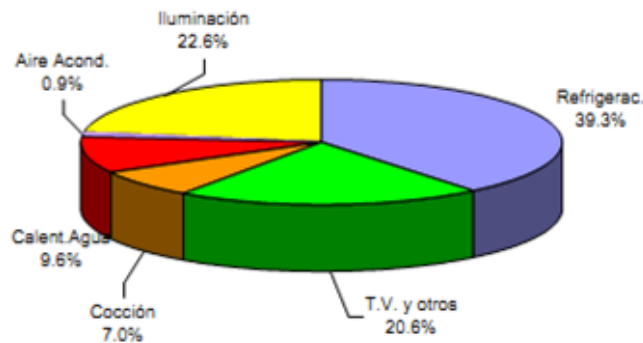
Estos intervalos de demanda permiten construir perfiles de carga para el análisis del consumo de energía. Además de esto, permiten determinar el rendimiento de ciertos dispositivos y analizar las redes para poder incluir futuras ampliaciones.

Figura 20. Curva de carga del consumo residencial de energía eléctrica, según usos.



Fuente: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_mar_2008.pdf. UPME [75].

Figura 21. Participación de los diferentes usos dentro del consumo residencial de energía eléctrica en Colombia.



Fuente: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_mar_2008.pdf. UPME [75].

- **Esquema de precios.**

Los esquemas de precios de energía eléctrica son un concepto existente desde hace mucho tiempo en la industria de la electricidad, por medio del cual se establecen tarifas de acuerdo a los diferentes periodos de carga de la red eléctrica presentes a lo largo del día. Siendo las tarifas más altas aquellas en las cuales la red se encuentra sometida a una mayor demanda. Estos esquemas de precios típicamente han surgido con el fin de estimular en el usuario el consumo de energía en los periodos en los cuales los costos marginales son más bajos [54]. Actualmente y debido a las limitaciones tecnológicas sólo se puede contar con algunas tarifas de energía, ejemplo de ellas serían: Tarifa para las horas diurnas, tarifa para las horas nocturna y tarifa para los fines de semana. Estos tipos de tarifas le permiten al usuario realizar una sencilla elección de los periodos en los cuales desean realizar los mayores consumos del recurso energético, posibilitando así un incremento o reducción significativa en el valor total de su factura.

La inclusión de los nuevos medidores de energía inteligentes, además de apoyar los procesos de facturación actuales, permitirán ampliar la gama de tarifas de energía existentes actualmente. Brindando inclusive la posibilidad de asignarle a cada hora del día una tarifa determinada de acuerdo a las condiciones de carga presentadas por el sistema. Además de esto, la inclusión de la nueva plataforma de medición inteligente AMI brindará la posibilidad de contar con esquemas adicionales para la prestación del servicio de energía eléctrica como lo es la energía prepagada. Siendo así, en un futuro los usuarios del servicio de energía eléctrica podrán visualizar gracias a la ayuda de un visualizador las tasas a las cuales se está vendiendo en ese momento el kWh de energía, lo que le permitirá además de reducir el precio de su factura, generar una conciencia energética

respecto al gasto de energía realizado, ayudando a reducir los picos de carga presentes en el sistema.

- **Planes tarifarios de energía.**

La inclusión de diversos planes tarifarios en el mercado de la energía eléctrica les permite a los usuarios finales una participación activa en la prestación del servicio, donde por medio de sus perfiles de consumo de carga pueden influenciar notoriamente las curvas de demanda de la red de energía eléctrica. Lo que tiene como consecuencia directa que los consumos de energía se reduzcan sustancialmente y por tanto, la generación de carga máxima se disminuya ya que las cargas se trasladan de las horas pico a horas menos congestionadas [43].

Los perfiles de carga que presentan los usuarios se verán afectados de forma notoria al incluir los diversos planes tarifarios que se surgen con la inclusión de la medición inteligente. Al suceder esto, los usuarios podrán visualizar los precios de la energía en cada instante, con lo cual les es posible manejar a su conveniencia la cantidad de energía demandada de la red. Seguramente al aplicar estas nuevas tarifas un número importante de usuarios mudaran buena parte de la utilización del servicio a horas más económicas, con lo cual podrán lograr una reducción en los precios de sus facturas.

Dentro de los beneficios incluidos al existir los diversos planes tarifarios se encuentra un concepto llamado gestión de la demanda. El cual consiste en lograr una respuesta satisfactoria por parte de los usuarios a cambiar su modo de consumo de la energía, de acuerdo al cambio de los precios y a la generación de incentivos. Permitiendo así el desplazamiento de la carga

máxima a periodos del día menos críticos [10]. En otras palabras, la gestión de la demanda se entiende como la reducción de la carga eléctrica por medio de la optimización del patrón de consumo de los clientes.

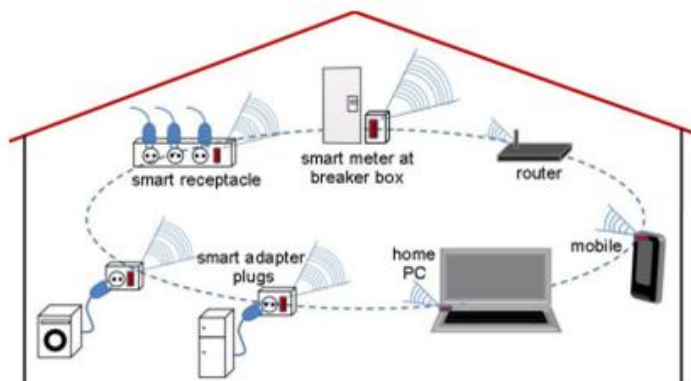
A continuación se describen algunos de los tipos de tarifas que se pueden presentar en el mercado de energía. Éstas pueden ser de tipo variante o invariante en el tiempo:

- **Tarifa plana:** Es aquella que se fija de acuerdo a las regulaciones del mercado de energía eléctrica y permanece sin variación a lo largo del tiempo.
- **Precio por tiempo de uso (TOU):** En este enfoque, el día se divide en un número fijo de intervalos de tiempo, para los cuales se aplican diferentes precios de la electricidad. Esta estructura de precios refleja el mayor costo marginal de producción de la energía durante la hora pico de la tarifa consumida. Las diferencias de precio entre los intervalos son un incentivo para que el cliente cambie su perfil de uso, con miras a consumir en las horas con tarifas más bajas [54].
- **Precios en tiempo real (RTP):** En este esquema tarifario los precios varían continuamente (ej. cada hora), en relación con los precios en el mercado mayorista. Los precios se fijan normalmente con un día de antelación. RTP refleja los costos marginales de producción de una mejor manera, y los precios más bajos pueden ser proporcionados durante períodos de baja demanda en la red [54].
- **Precio en picos críticos (CPP):** Estos precios representan los intervalos de tiempo en un día o en un año, donde el consumo es muy alto y por tanto son mucho más elevados. A menudo este esquema tarifario se combina

con tarifa plana o de precio TOU. En general se puede ahorrar mucho al evitar los periodos que se liquidan con este tipo tarifa [54].

Otro de los beneficios que trae consigo la inclusión de las diversas tarifas es la posibilidad de automatizar por medio de dispositivos electrónicos, tales como ROUTERS o PC algunos tipos de carga, tanto industriales como residenciales. Estas cargas pueden ser programadas para funcionar en aquellos intervalos de mayor conveniencia tarifaria e interrumpir su funcionamiento en los períodos de demanda pico. Algunas de las cargas que permiten un mayor control son: Calefacción, ventilación, aire acondicionado, refrigeración, el suministro de agua caliente, entre otras [54] [47]. En la Figura 21 se muestra un esquema que permite visualizar la interacción entre los dispositivos en un esquema automático de control de carga.

Figura 22. Interacción entre los dispositivos en un esquema automático de control de carga.



Fuente: Functional Analysis of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid. Bai Xiao-min; Meng Jun-xia; Zhu Ning-hui [11].

Es importante resaltar que aunque existan diversas tarifas de precios, estudios realizados demuestran que también hay una buena cantidad de

usuarios que no están dispuestos a cambiar sus patrones de consumo de energía eléctrica, aunque esto suponga un aumento en el precio de sus facturas. Esto es debido en algunos casos a que en algunos lugares el precio del kWh es relativamente bajo o casos en los cuales la actividad que desarrollan los usuarios nos les permite prescindir de este recurso, lo cual es un tema que se debe analizar [49] [55].

Por otra parte, otros estudios realizados, indican que con una reducción del 5% en el consumo de energía eléctrica en las horas pico, se puede lograr una disminución de hasta el 50% en los precios del mercado eléctrico [47]. Adicionalmente se presenta un estudio en el que se muestra la reducción del precio del consumo eléctrico en diversos escenarios, por medio del uso de las diferentes tarifas de precios presentes en el mercado [54].

- ***Energía prepagada.***

La energía prepagada es otra de las posibilidades que se incluye en el paquete de beneficios que proporciona la medición inteligente. En este caso, el usuario puede adquirir una tarjeta inteligente o recargas virtuales a través de internet. Esta recarga le permite al usuario acceder a la prestación del servicio de energía eléctrica. El medidor inteligente va descontando el dinero recargado respecto a la energía que va consumiendo, hasta que el saldo llegue a cero, en este punto interrumpirá automáticamente la prestación del servicio [14] [43].

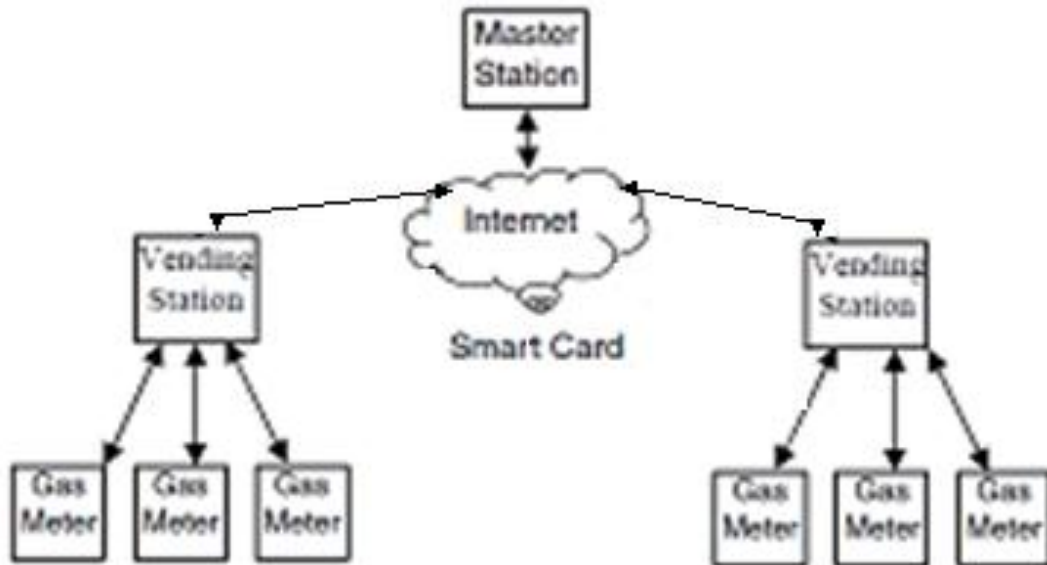
Dentro de los beneficios presentes al utilizar energía prepagada se encuentran los siguientes:

- El usuario adquiere una mayor conciencia energética, ya que constantemente puede conocer el precio que tiene la utilización del servicio.

- El costo del kWh comprado de forma prepagada, puede contar con una tarifa especial (más económica) debido a su naturaleza.
- El sistema de energía prepagada reduce la posibilidad de errores en la facturación [14].
- La cantidad de energía adquirida no posee fecha de vencimiento, lo cual permite su disponibilidad en cualquier momento.
- Los costos asociados con la prestación del servicio, lecturas de medidores y las transacciones realizadas, prácticamente desaparecerán [6].
- Se cuenta con amplia facilidad para lograr la recarga de las tarjetas inteligentes o para recargar a través de internet, ya que se ejecuta de manera similar a la recarga de dinero en celulares.

Es importante resaltar que el medidor de energía sea utilizado para incorporar la opción de energía prepago, debe contar con algunos aspectos técnicos especiales para lograr la correcta interacción con la tarjeta inteligente o con las recargas por internet. Actualmente se desarrollan proyectos para la elaboración de medidores dedicados a la gestión prepagada de la energía eléctrica y gas [19] [56]. En la figura 22 se muestra la arquitectura de un medidor de gas prepago, aplicable de igual forma a un medidor de energía eléctrica prepago.

Figura 23. Arquitectura de un medidor de gas prepago.



Fuente: Towards Design of a Smart Prepaid Gas Metering System. Khan, T.H.; Paul, T.K.; Shahabuddin, G.M. ; Wahid, K. ; Chowdhury, A.H. ; Kabir, S.M.L. [56].

- **Pérdidas no técnicas.**

Como se mencionó anteriormente, anualmente a nivel mundial se dejan de recibir aproximadamente 20 mil millones de dólares por este concepto según cifras oficiales. Lo cual hace que muchas compañías comercializadoras centren su atención en este problema. Este esfuerzo combinado ha llevado a la implementación de novedosos métodos para la detección de robos de energía eléctrica tales como los que se mencionan a continuación:

Sin la implementación de la plataforma de medición AMI:

- Instalación de un medidor macro en cada transformador encargado de contabilizar la cantidad total de energía despachada desde esa

subestación. Este dispositivo funciona como soporte del grupo de usuarios alimentados desde la subestación monitorizada y permite contrastar la sumatoria de los consumos de energía eléctrica individuales con la medición registrada por el medidor macro. La implantación de este método se ha llevado a cabo en una gran cantidad de países, entre los que se incluye Colombia. En el cual este proyecto ha sido implementado de manera exitosa en pequeños barrios de diferentes ciudades, ayudando a reducir las pérdidas negras de energía eléctrica a tal punto que se ha extendido su implementación a casi todo el país.

Con la implementación de la plataforma de medición AMI:

- Algoritmos de control y seguimiento en tiempo real del consumo de energía eléctrica a cada usuario.
 - Medidores de energía con características de diseño físico anti fraude.
 - Interruptores de conexión y desconexión de carga remotos.
-
- **Mercados de energía.**

Actualmente los mercados de energía se manejan de una forma tradicional, donde los participantes realizan una o varias funciones clásicas dentro del esquema del mercado eléctrico en base a un conjunto de reglas establecidas, por ejemplo, generar, transmitir o comercializar [42].

En este esquema de mercado de energía eléctrica, no se permite la participación activa de los usuarios minoristas. Estos usuarios tienen que someterse a las reglas previamente establecidas para lograr el acceso a los servicios de energía eléctrica y no pueden ofrecer soluciones a las dificultades que se presenten.

El mercado de energía actual considera la prestación del servicio de energía eléctrica como mercado inelástico. La característica principal de este tipo de mercado es que la variación en los precios del servicio prestado no representa un cambio en la cantidad total demandada por el servicio [57]. Esta consideración está perfectamente justificada, ya que las características actuales del sistema no permiten lograr con facilidad la implementación de un mercado dinámico y variante de acuerdo al estado de la red de energía eléctrica.

El surgimiento de nuevas tecnologías ha permitido desarrollar nuevos esquemas para la prestación del servicio de energía eléctrica, tales como la estructura de medición avanzada AMI. Por medio de ésta, se puede lograr un rediseño de los mercados de energía, que permita proporcionar a los consumidores servicios de energías altamente fiables, flexibles, de fácil acceso y rentables, aprovechando las ventajas tanto de la generación centralizada como de la pequeña generación distribuida [14]. Siendo así, la integración de las nuevas tecnologías de medición en los mercados de energía traería grandes beneficios como mayor estabilidad de la red y permitiría resolver graves problemas que se presentan actualmente como lo es la congestión o sobrecarga.

Dentro de las posibilidades de la nueva plataforma de medición inteligente, se encuentra lograr un rápido conocimiento del estado de la red y de las características que presenta en cada instante. Al integrarla de manera adecuada con los mercados de energía, esto puede permitir un cambio en la concepción de mercado inelástico a mercado elástico. En el cual una variación en los precios puede influir de manera sustancial en la variación de la cantidad demandada del servicio [57].

En un enfoque de prestación del servicio de energía eléctrica elástico, se obtienen múltiples beneficios, entre los cuales se encuentran:

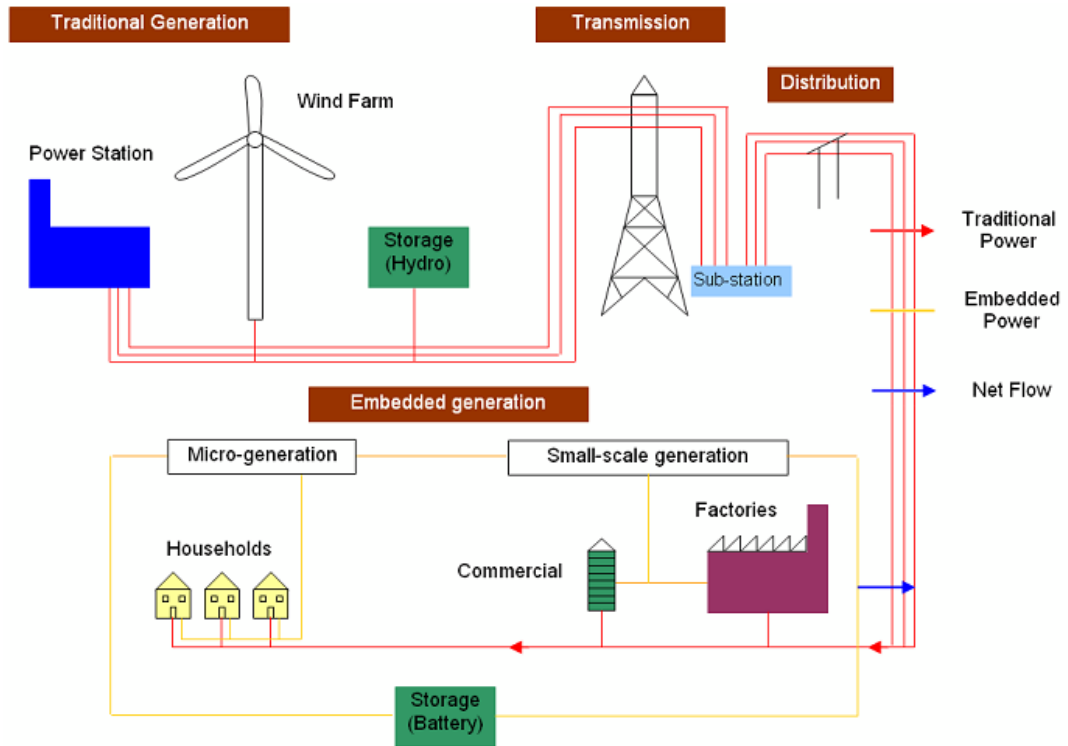
1. La participación activa de los clientes minoristas en la dinámica del mercado.
2. La reducción de los picos de carga, gracias a la interacción entre la cantidad de energía demanda por los consumidores y las tarifas de presentes en el mercado.

Por otra parte, la conversión del mercado de energía actual a un mercado dinámico, estimula la competencia entre los grandes prestadores del servicio. Al aumentar la competencia entre ellos, se da un cambio en las condiciones del servicio, ya que las empresas mejorarán las condiciones a los usuarios minoristas con el fin de atraerlos y que estos accedan a sus servicios.

Además de esto se mejorarán aspectos del sistema como la flexibilidad, la calidad, la eficiencia de los sistemas de energía eléctrica y se aumentará la integración de la generación distribuida con el fin de contribuir con la mejora de aspectos ambientales [42] [22].

La Figura 23 muestra los componentes de un sistema eléctrico inteligente, que se deben integrar para lograr un mercado de energía dinámico y flexible.

Figura 24. Componentes de un sistema eléctrico inteligente para lograr un mercado de energía dinámico.



Fuente: Using Smart Metering for Load Aggregation: Towards an Integrated Smart Grid/Active Network Management Framework. Bassilious, V.; Ozveren, C.S.; Birch, A.P. [42].

2.2.1.2. Monitorización de variables eléctricas.

En los sistemas de energía eléctrica, generalmente se usan analizadores de red que son dispositivos que miden distintos parámetros tanto de corriente (I) como de la tensión (V), que permiten la monitorización de diferentes variables eléctricas como el consumo de energía activa (kWh), el consumo de energía reactiva

(kVAh), la frecuencia del sistema eléctrico, el consumo de potencia activa (W), el factor de potencia, así como parámetros para establecer la calidad de la energía.

- **Calidad de la energía eléctrica.**

El constante desarrollo energético y las mejoras presentes en la infraestructura de energía eléctrica a nivel mundial contemplan el tema de la calidad de la energía eléctrica como uno de los factores de mayor importancia en el desarrollo industrial de cada nación. La creciente demanda de este servicio no puede ser suplida solo con cantidad sino también con altos estándares de calidad. Por tal razón se han venido desarrollando grandes avances respecto a este tema. Entre los que se resalta la infraestructura de medición avanzada (AMI), la cual permite:

- Medición en tiempo real de las variables fundamentales de la energía eléctrica (Tensión, corriente, frecuencia, entre otras). Las cuales por medio de diversos algoritmos son analizadas, determinando de esta forma la calidad del servicio que se presta en cada momento.
- Seguimiento a huecos de tensión presentes en el suministro de energía eléctrica. Lo cual incluye, contabilizar el número de eventos presentes en un periodo determinado de tiempo, su duración y la causa que lo produjo.
- Gestión en cortes de energía. Lo cual permite restablecer en el menor tiempo posible el suministro de energía eléctrica en caso de presentarse un corte en el fluido eléctrico por cualquier circunstancia. Además de contabilizar el tiempo de la interrupción y la cantidad de eventos de este tipo que se presentan en un periodo de tiempo determinado.

- Control adecuado en la cantidad de energía despachada desde las plantas generadoras. Lo cual permite mejorar notablemente la eficiencia energética de las redes de distribución de energía eléctrica.

A continuación se mencionan algunos casos en donde se han implementado o se están implementando estructuras y elementos necesarios para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica.

En la infraestructura de medición avanzada, un componente fundamental es el PQA, analizador de la calidad de la energía eléctrica. Este equipo dispone de hardware y algoritmos de software para monitorizar los parámetros de calidad. Este analizador, se encuentra en fase de desarrollo, tiene los problemas de calidad bien definidos y diferentes parámetros relacionados con la calidad de la energía eléctrica como: caídas de tensión, interrupciones, armónicos, flicker, desviación de magnitud, desviación de frecuencia, las desviaciones de fase de tensión y de corriente [11].

Un factor importante en la mejora de la eficiencia energética es el aumento de la calidad. Para mejorar la calidad de la energía eléctrica, un aspecto importante que se debe tener en cuenta, es la eliminación de armónicos en la red. La presencia de componentes armónicas, tanto en la tensión como en la corriente, representan problemas en: el suministro de la energía. Estos problemas generan la necesidad principalmente de las empresas, de filtrar armónicos y de separar a los consumidores en grupos de acuerdo a las cargas que son cuasi lineales y a los que no lo son. Para esto se sugiere la implementación de un medidor inteligente que permita la medición independiente de armónicos fundamentales, los cuales contribuyan a realizar una buena facturación que incluya armónicos y evite pérdidas significativas en las grandes empresas de suministro de energía [12].

- **Monitorización de carga y análisis de carga.**

El control y el análisis de la carga tienen un papel representativo en la medición inteligente. La innovación es uno de los ejes fundamentales para un buen aprovechamiento tanto de la medición inteligente como de las redes inteligentes [26] [1]. Una parte considerable de la información estudiada plantea diferentes métodos para el control de la carga.

En la actualidad grandes empresas como Whirpool, GE, LG y Samsung están diseñando y fabricando aparatos con IP a fin de que un medidor inteligente pueda controlarlos cuando se requiera [1], esto permitiría que dichos aparatos se programen para trabajar en momentos de baja demanda o en tiempos que representen una ventaja para la red de energía eléctrica.

El método más representativo de control de carga se basa en un desarrollo del MIT de la década de 1980 el cual consiste en un monitoreo de carga no intrusiva conocido por sus siglas en Ingles como NALM (Nonintrusive Appliance Load Monitoring), desarrollado por George Hart, donde en principio se quiso analizar la carga de los edificios residenciales.

NALM registra los cambios que suceden en la red ante la activación o desactivación de un electrodoméstico, para ello es necesario analizar aparato por aparato para determinar los flancos de subida de cada uno de ellos cuando comienzan a tomar energía de la red. Es importante tener en cuenta que los aparatos con una conmutación rápida son complicados de detectar ya que sus flancos de subida y de bajada se presentan en intervalos muy pequeños de tiempo.

NALM es un sistema no intrusivo desarrollado por George Hart en el Instituto Tecnológico de Massachusetts en la década de 1980. Un sistema no intrusivo es un sistema donde cada aparato dentro de la casa no tiene un medidor o un sensor especial, toda la información se analiza pero desde las variaciones que suceden

en la red cuando se conecta un artefacto eléctrico. A partir del enfoque Hart que es se han desarrollado gran cantidad de avances respecto al control de carga como el sistema desarrollado por el Sr.Pihala en Finlandia, también Murata realizó una clasificación de cargas y Baranski también desarrolló un sistema basado en Hart en Alemania, en Japón Nakano usó la transformada rápida de Fourier (FFT) para detectar la conmutación simultánea en las cargas ya que es útil usar los armónicos más altos de corriente para diferenciar las cargas.

El mejor análisis de la carga se da al integrar el estado estacionario y el estado transitorio que se presenta en el sistema mientras se alimenta la carga y ante las conmutaciones de la misma. En el 2000 Shaw investigó en detalle el estado transitorio en las cargas, en 2003 Lee y Laughman analizaron conjuntamente el estado transitorio y el estable y determinaron que es la manera más efectiva para identificar determinada carga [27] [28] [29], las aplicaciones del manejo de cargas dentro del hogar se denomina HEMS (Home Energy Management System), una consideración importante es que estos métodos de monitorización de carga tanto intrusivos como no intrusivos deben garantizar los aspectos de seguridad, para que no se revele información confidencial del cliente, este tema será abordado en el siguiente capítulo.

3. SEGURIDAD INFORMATICA Y NORMARTIVIDAD EN SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.

Los sistemas de medición inteligente se diseñan a fin de proveer mejoras en cuanto a los sistemas de medición y monitorización de sistemas eléctricos. Los grandes avances que se han producido en las dos últimas décadas se están implementando en la medición con miras a lograr una eficiencia energética adecuada.

La medición inteligente integra medición, comunicación y computación. Estos tres aspectos generan grandes posibilidades de desarrollo e innovación en los sistemas de medición pero a su vez acarrean grandes retos, siendo uno de ellos la seguridad informática en la medición inteligente.

Además de esto, el desarrollo de cualquier tipo de proyecto requiere del establecimiento de una serie de parámetros y estándares dirigidos a encaminar de manera adecuada el desarrollo del proyecto bajo unos lineamientos previamente establecidos. Esta etapa es de gran importancia y puede ser fundamental para definir el éxito o fracaso de la labor iniciada, por lo tanto no debe ser subestimada.

Para el desarrollo del sistema de medición inteligente de energía eléctrica se deben considerar algunas norma sy estándares para su implementación. Estas normas y estándares definen toda la estructura desarrollada para lograr la adecuada implementación de la red de medición inteligente propuesta. Éstas describen desde la funcionalidad que debe cumplir cada uno de los componentes de medidor inteligente, hasta los protocolos de comunicación que deben ser utilizados en cada uno de los segmentos de la estructura de medición propuesta.

3.1 SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN.

En la gran parte de los casos se toma a la seguridad de la información como un aspecto secundario, debido a esto se desarrollan los sistemas y después del

desarrollo se piensa en la seguridad de la información de los mismos. Se debe tener en cuenta que la seguridad de la información en los sistemas inteligentes es una prioridad, por lo cual el desarrollo de la seguridad debe ser paralelo al de la medición y comunicación. El desconocer la importancia de la seguridad, podría ocasionar problemas como: cambio en el valor de las facturas, robo de energía eléctrica de manera informática, e incluso se podría ocasionar un colapso total de la red de energía eléctrica.

Ante esta problemática se han desarrollado diferentes estudios en cuanto a seguridad de la información se refiere, a fin de blindar a los sistemas de medición inteligente en torno a los ataques informáticos que se podrían presentar. Lo anterior son estudios, actualmente no hay una normatividad que regule la seguridad en estos sistemas. En la actualidad hay comités en Europa y algunos países donde se están adelantando estudios para regular los aspectos concernientes a seguridad informática. La regulación es vital y es urgente debido a que actualmente los sistemas de energía eléctrica están integrados por muchos países, por lo cual en un futuro próximo la integración de diferentes sistemas de medición inteligente podría representar un problema.

3.1.1 Problemas para la implementación de la seguridad informática en sistemas de medición inteligente.

A continuación se enumerarán algunos de los problemas asociados con la seguridad de la información que fluye en un sistema de medición inteligente.

Falta de interés para invertir en seguridad informática: Los gobiernos, organizaciones o demás entes interesados en el desarrollo de una tecnología presentan un gran desinterés en cuanto a seguridad informática. Esto se presenta porque la seguridad informática representa costos y trabas en el desarrollo de una tecnología. El hecho de representar trabas puede significar que la tecnología no puede salir tan rápido al mercado, lo cual podría acarrear pérdidas económicas

considerables a corto plazo [58]. En el desarrollo de algunos proyectos, los directores encargados buscan minimizar inversiones, excluyendo aquellas que se podrían erróneamente considerar de baja importancia, como es el caso de la seguridad informática. Por esta razón, los proyectos se diseñan para que ejecuten la tarea para la cual fueron desarrollados y no se tienen en cuenta detalles vitales como la seguridad informática, solamente después de salir al mercado, es cuando se comienzan a ver los problemas.

Falta de regulación entorno a la seguridad informática: No existe una normatividad que regule la seguridad informática en los sistemas de medición inteligente [58]. Esto se debe a que los proyectos se desarrollaron de diferente manera entre los países o empresas y es sólo ahora cuando la falta de estándares hace que exista una gran cantidad de prototipos de medidores, todos desarrollados bajo perspectivas diferentes, con diferentes aplicaciones y diferentes sistemas de seguridad informática. Esto dificulta la integración de los sistemas de medición inteligente y hace que sea complicado para algunos países, que hasta ahora están integrando la medición inteligente determinar cuáles son las tecnologías ideales para implementar en estos países. Se observa que la falta de regulación complica el desarrollo y la implementación de la medición inteligente.

Falta de análisis adecuados y completos de las vulnerabilidades: Las vulnerabilidades son los puntos críticos en los cuales el sistema puede ser manipulado por personas no autorizadas, estos puntos son los lugares en donde se debe centrar los estudios para realizar mejoras la de seguridad informática. Los análisis adecuados y completos se desarrollan para determinar de manera acertada todos los puntos críticos del sistema. El determinar estos puntos hace que se gane tiempo, ya que los esfuerzos para brindar seguridad de la información se centran los puntos críticos y no en puntos que no representan inconvenientes.

La falta de interés por estos estudios de vulnerabilidades son los que hacen que se presenten grandes problemas a la hora de implementar la tecnología.

3.1.2 Problemas que se presentan en caso de fallas en los sistemas de seguridad de la información.

Se pueden observar algunas circunstancias por las cuales la seguridad de la información se remite a un segundo plano en la medición inteligente, ahora se presenta porque esas malas prácticas pueden llevar acarrear costos superiores y serios problemas. Algunos de los problemas que se presentan en caso de tener una seguridad de la información no adecuada son los siguientes:

Adaptar la seguridad después de que una tecnología ha sido desarrollada resulta costoso: Como se planteó anteriormente la seguridad informática, generalmente es abordada en etapas avanzadas de un proyecto. Esto genera vacíos de seguridad informática complicados de identificar. El desarrollar un proyecto y después tratar de integrar la seguridad genera altos costos, debido a que es complicado identificar los vacíos o los huecos en la seguridad informática. Para integrar la seguridad informática en ocasiones se debe incluso modificar la tecnología desarrollada para una correcta adaptación o lo que podría ser peor, dejar sistemas obsoletos en cuanto a seguridad informática [58].

Existen consecuencias graves si se produce una violación de la seguridad de la información: En el sistema de medición inteligente lo que se maneja es un producto indispensable para el diario vivir del ser humano, la energía eléctrica. Se debe entender que cualquier violación a los sistemas de seguridad de la información de medición inteligente puede acarrear colosales problemas, que

abarcaría todos los eslabones de nuestros sistemas desde los usuarios residenciales hasta la seguridad informática de estado. Una falla de seguridad podría traer problemas de menor importancia como cambiar consumos para disminuir el pago de una factura, hasta problemas de gran envergadura como hacer colapsar el sistema de suministro de energía eléctrica en una ciudad, región o incluso en toda la nación. Un mal sistema de seguridad informática permitiría que un ataque a la red pueda penetrar y acceder al control y desestabilizar todo el sistema, un fraude por la alteración de la lectura del medidor, capacidad de monitorizar los consumos de la personas para modificarlos ante la ausencia de ellos, capacidad para cerrar la red, hurto de energía, robo de identidad, eliminación de cargas no autorizadas, control de ciertos dispositivos dentro del medidor, manipular tarifas de energía o falsificar lecturas generadas y exposición de la información mantenida por estos sistemas. Se observa que fallas en los sistemas de seguridad de la medición inteligente pueden generar diversos inconvenientes.

3.1.3 Medidas que se pueden implementar para lograr una alta fiabilidad en los sistemas de seguridad de la información.

Las medidas adoptadas para la medición inteligente tienen que ver directamente con las medidas de seguridad de la información que tienen los sistemas de comunicación y los sistemas computacionales actualmente. Las medidas de seguridad informática que se tienen para estos servicios se adecuan para que sean aplicables a la medición inteligente. A continuación se plantean todas las medidas que existen para asegurar la fiabilidad del sistema, esto a raíz de que existen diferentes estudios que proponen como se debe garantizar la seguridad informática. Los aspectos que se deben considerar, para lograr una seguridad de la información adecuada son:

Realizar la implementación de la seguridad de la información desde las primeras etapas: Como se mencionó anteriormente el desarrollo de la seguridad de la información desde etapas avanzadas de los proyectos conduce a problemas en la

misma. Es complicado cuando un proyecto está avanzado determinar cuáles son las debilidades del mismo y el aplicar las correcciones. Desde el inicio del proyecto se deben implementar los análisis de amenazas y de esta manera determinar donde el sistema es vulnerable para que se puedan aplicar los correctivos necesarios y de esta manera garantizar un alto nivel de seguridad de la información [58].

Derechos de acceso a dispositivos físicos y lógicos: Estos son derechos que se brindan de acuerdo a un rango de importancia. Cada rango de éstos permite tener mayor o menor control sobre el sistema de medición inteligente. Para los usuarios existe un nivel de acceso mínimo esto le permite manejar en parte y conocer solamente la información relacionada con su propio medidor. El usuario puede remotamente conocer el consumo actual de energía, los datos de consumo de la hora anterior, del día anterior, del mes anterior e igualmente los precios de la energía tanto instantáneos como históricos, un sistema de intrusión mínimo del usuario hacia su propio medidor. El comercializador de energía tendría mayores permisos de acceso a todos los dispositivos, ya que el comercializador podría conocer los datos de consumos tanto instantáneos como históricos de todos sus clientes; además, podría activar y desactivar de manera remota el sistema de medición. Los derechos de acceso permiten que personas ajenas no irrumpieran en los datos de otros clientes, ya que irrupciones de este tipo podrían prestarse para actos ilegales. Si una persona pudiera visualizar los consumos de varios residentes en un barrio podría determinar quienes están ausentes de la casa para de esta manera, por ejemplo cometer un robo. Se determina de esta manera que deben existir derechos de acceso a dispositivos lógicos y físicos dependientes de si se es un usuario o un administrador.

Operaciones de cifrado: Las operaciones de cifrado son aplicaciones usadas para cifrar contraseñas, identificaciones e informaciones. Estas operaciones permiten que la información que se envíe desde un medidor inteligente, si es interceptada no pueda ser descifrada, de esta manera se tiene seguridad de la no identificación

del medidor desde el cual proviene la información ni los demás datos que se transmiten en el mensaje.

Los datos al viajar de manera alámbrica o inalámbrica pueden ser interceptados, lo que se busca es que no puedan ser descifrados. Cifrar los datos representa costos adicionales ya que puede representar sistemas de comunicación más robustos, debido a que generalmente el cifrar mensajes aumenta el peso del mismo respecto a la información normal y además el cifrar y descifrar estos mensajes trae costos en software.

Redundancia en aspectos de seguridad: La redundancia en los sistemas de seguridad permite tener un respaldo o respaldos en caso de que alguna aplicación de seguridad no funcione, entonces si no funciona la primera aplicación de seguridad debe funcionar la segunda. Esto provee de un grado alto de fiabilidad a un sistema de seguridad informática [44].

Sistemas de seguridad informática con el paso del tiempo: Además de las anteriores pautas los sistemas se deben diseñar para que sean efectivos con el paso del tiempo, esto es posible a través de la actualización del software del medidor y también la actualización en los sistemas de comunicaciones. Esto permite que a pesar del tiempo, los sistemas sigan siendo aún tan efectivos como desde que se puso en funcionamiento todo el sistema.

3.1.4 Requisitos de los sistemas de seguridad de la información.

Son cuatro las características que debe tener los sistemas de seguridad de la información para que se consideren fiables para el desarrollo de sus funciones; estos son: disponibilidad, seguridad, facilidad de mantenimiento, confidencialidad.

Disponibilidad: El sistema de seguridad de la información, siempre debe estar funcionando para evitar cualquier ataque imprevisto, sin importar los eventos externos que puedan presentarse.

Seguridad informática del sistema: Sin importar la amenaza que se presente, el sistema debe ser capaz de responder a ella e impedir que tome el manejo del mismo por una persona no autorizada.

Facilidad de mantenimiento: El sistema debe poderse modificar para estar actualizado contra las nuevas amenazas que se van descubriendo o que van surgiendo con el paso del tiempo.

Confidencialidad: Todos los datos que viajen a través de los medios de comunicación o los que se almacenen tanto en el medidor inteligente como en las bases de datos deben ser confidenciales, para que sus datos o contenidos solo puedan ser vistos o analizados por personal autorizado.

3.1.5 Modelo de cascada de desarrollo del software de seguridad.

Para la implementación de este modelo se debe considerar lo siguiente:

1) Especificación de requisitos: Se deben recoger todos los requisitos del sistema que se va a proteger. Se debe asignar quienes y en que categorías tienen derecho a la información y además se debe dar niveles en cuanto a seguridad de la información que se recopila, nivel de información alto, nivel de información moderado y nivel de información bajo. Hay diferentes tipos de datos y procesos que se deben proteger. Se deben proteger la identidad del cliente, sus consumos, la identificación del medidor, además la conexión y desconexión de los servicios. La conexión y desconexión de dispositivos debe estar controlada ya que si alguien no autorizado toma el control del sistema, podría hacerlo colapsar.

2) Sistema de análisis y diseño: Se debe identificar cuales posibles ataques se podrían lanzar contra el sistema de medición inteligente y donde es más

vulnerable el sistema, a fin de encontrar la manera de evitar esas vulnerabilidades y lograr que haya inmunidad.

3) Sistema de ejecución: No se debe escatimar en recursos a la hora de garantizar la seguridad de la información en el sistema de medición inteligente, se deben escoger los métodos más seguros, más confiables y que mejores resultados han presentado en torno a la seguridad informática de otros sistemas, tales como los protocolos de seguridad informática con métodos de cifrado fuertes, cortafuegos, mecanismos de control de acceso de usuario. Se deben seleccionar ubicaciones físicas seguras de los componentes de “hardware” del sistema, para evitar la manipulación de personas no autorizadas.

4) Sistema de integración y ensayos: Antes de poner en uso el sistema se deben efectuar una serie de pruebas. Se deben ejecutar diferentes tipos de ataques informáticos, ataques bajo los que estarían los sistemas de medición inteligente en estado normal. En estas pruebas, el sistema debe evitar todo tipo de acceso no autorizado. En caso de que en alguna se acceda al sistema, se deben realizar las correcciones necesarias para blindar este punto crítico.

5) Sistema de implementación y mantenimiento: En este punto es donde el sistema ya está en funcionamiento. La seguridad de la información del sistema en este momento se garantiza a través de análisis del sistema y auditorías periódicas de seguridad informática. De esta forma se garantiza que el sistema quede protegido contra ataques informáticos maliciosos.

En las auditorías se debe realizar una inspección física y lógica exhaustiva del sistema de medición inteligente, se examinan los sistemas de cifrado y si hay disponibles sistemas de cifrados más óptimos, estos deben reemplazar al sistema anterior. Las políticas de seguridad de la información deben ser verificadas para asegurar su validez. Estas auditorías son muy importantes ya que las nuevas

amenazas y ataques informáticos surgen todos los días, debido a la naturaleza evolutiva de estos sistemas. En caso de presentarse un problema se deben aplicar medidas correctivas y si hay nuevas aplicaciones de seguridad, estas deben reemplazar a las anteriores.

6) Sistema de obsolescencia: Se debe garantizar las medidas de seguridad informática de los datos después de que los sistemas se vuelvan obsoletos, este es un tema vital para evitar cualquier manipulación mal intencionada de los datos.

3.2. NORMATIVIDAD RELACIONADA CON LA MEDICIÓN INTELIGENTE.

El avance de la medición inteligente se ha venido desarrollando de manera paralela en diferentes países alrededor del mundo, principalmente en el continente europeo. Lo que los hace estar un poco por delante de las naciones asiáticas y americanas que pretenden implantar esta nueva tecnología y por tanto ser pioneros en normas y estándares respecto a la operatividad de la medición inteligente. Otros países avanzados en el tema de la medición inteligente en el continente asiático lo son China e India, los cuales también desarrollan sus propias normas y estándares dirigidos a la plataforma de medición avanzada AMI. Por el continente americano, la nación con mayor avance respecto al tema de la medición inteligente son los Estados Unidos, que al igual que los demás países mencionados anteriormente desarrolla sus propias normas y estándares.

Actualmente el desarrollo de la medición inteligente alrededor del mundo se ha convertido en un componente clave de la visión futura que se tienen de las redes de energía eléctrica. Esto es debido a que la implantación de una red inteligente trae consigo una serie de beneficios y características necesarias para lograr suplir las necesidades actuales y futuras de una adecuada prestación del servicio de energía eléctrica. Este desarrollo se ha visto reducido en muchos casos debido a las limitaciones de diferentes índoles que se presentan en cada uno de los sitios interesados en implantar la nueva tecnología. Entre estas limitaciones se

encuentran aspectos del tipo político, social, económico, tecnológico, normativo y del tipo regulatorio, que influyen de forma trascendental en la realización de cualquier proyecto [59].

El tema político se convierte en un aspecto fundamental cuando se propone la realización de un proyecto de gran magnitud, como lo representa la implantación de la medición inteligente, ya que en este caso se ven involucrados intereses de diversos tipos. Es importante resaltar que el aspecto político se convierte prácticamente en uno de los componentes de mayor influencia para lograr el desarrollo de cualquier proyecto.

Por otro lado, el tema social no es menos importante en cualquier lugar en el cual se piense en llevar a cabo la aplicación o desarrollo de un proyecto de medición inteligente; ya que en cada región hay patrones de comportamiento variables que pueden influir notoriamente en la planeación de cualquier actividad; pudiéndose llegar al punto de simplemente no permitir el desarrollo de ciertas actividades dado que no van en concordancia con sus patrones habituales de comportamiento o no concuerdan con sus estilos de vida que llevan.

Otro punto fundamental es el tema económico que al igual que el tema social es ampliamente variable de acuerdo a la región que se está analizando. Y que para el caso de la implantación de un proyecto como el mencionado en este documento es de vital importancia. Ya que desde cualquier perspectiva que se analice, para el despliegue de una plataforma avanzada de medición inteligente, siempre se deberá considerar la gran inversión económica que esto representa. Este aspecto, en la mayoría de los casos se convierte en el componente de mayor influencia y de mayor peso, ya que su relevancia es tal que sin la cantidad suficiente de este recurso sería imposible de llevar a cabo un proyecto de esta magnitud.

Por último, aparece el aspecto tecnológico, que se constituye como un requisito fundamental para poder llevar a cabo un proyecto de automatización de las redes de energía eléctrica por medio de una plataforma de medición inteligente AMI.

Actualmente el acceso a los recursos tecnológicos de punta se encuentra limitado a unas pocas naciones, lo cual dificulta un despliegue a escala mundial de la estructura AMI. Este último aspecto, está enlazado directamente con la capacidad económica debido a que un menor acceso a las tecnologías existentes se traduce en una mayor inversión para llevar a cabo el desarrollo de cualquier proyecto.

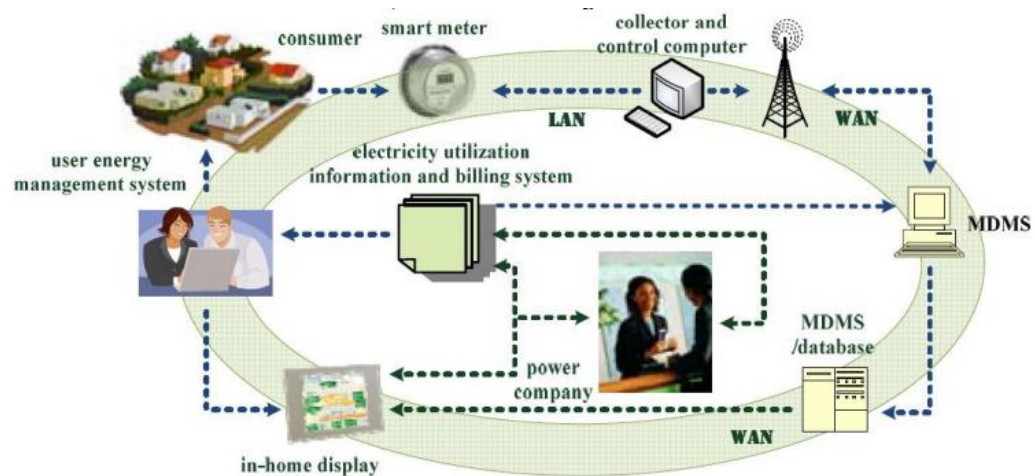
Considerando todos los aspectos antes mencionados es como se puede lograr el establecimiento de normas, regulaciones y planes de apoyo que permitan llevar a cabo un proyecto de esta magnitud.

En la actualidad, los países que se encuentran actualizando sus redes de energía eléctrica a redes inteligentes, establecen en la mayoría de los casos sus propios estándares y normas de regulación y control. Lo anterior hace que cada uno de estos focos de desarrollo se lleve a cabo de una manera aislada y lenta. Y que a su vez posibilita en mayor grado la existencia de falencias en los sistemas implementados. Por esta y muchas otras razones se debe buscar una normalización general que permita un despliegue sólido, eficaz e incluyente de la plataforma de medición inteligente AMI, que permita la integración adecuada de todos los entes que participan en el desarrollo de tecnologías sostenibles y amigables con el medio ambiente a nivel mundial.

Un esquema de medición inteligente completo es aquel que incorpora dentro de un mismo conjunto todas las etapas de la estructura de una red de energía eléctrica. Es decir, enlaza adecuadamente desde el generador de energía central hasta el último elemento de consumo existente en la ubicación del usuario final, incluyendo también otros servicios asociados diferentes a la energía eléctrica como lo son el agua y el gas. Desde el punto de vista de normatividad se puede hacer una división aproximada de un esquema de medición inteligente en el que existan dos componentes, regulados cada uno de ellos por un conjunto de normas establecidas muy específicas. El primero de estos componentes viene integrado por toda la estructura energética que administra el usuario final en su hogar o

La estructura de distribución de energía eléctrica también cuenta con una serie de normas, estándares y protocolos de comunicación establecidos para lograr su incorporación adecuada a la estructura de medición inteligente planteada. Para este caso, estas normas también varían de acuerdo a las políticas propias del lugar de análisis. Se puede destacar dentro de las normas que regulan este parte de la estructura de la red, la gran cantidad de exigencias en cuanto a las funciones que deben cumplir los medidores inteligentes utilizados y sus niveles de confianza. También se pueden resaltar los diversos protocolos y estándares de comunicación que se han establecido para lograr la conexión entre los medidores de energía locales y los concentradores de datos centrales, como los son los sistemas PLC, Ethernet, 3G, entre otros. La Figura 25 muestra la estructura y composición de una red de distribución AMI.

Figura 26. Estructura y composición de una red de distribución AMI.



Fuente: Functional Analysis of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid. Bai Xiao-min; Meng Jun-xia; Zhu Ning-hui [10].

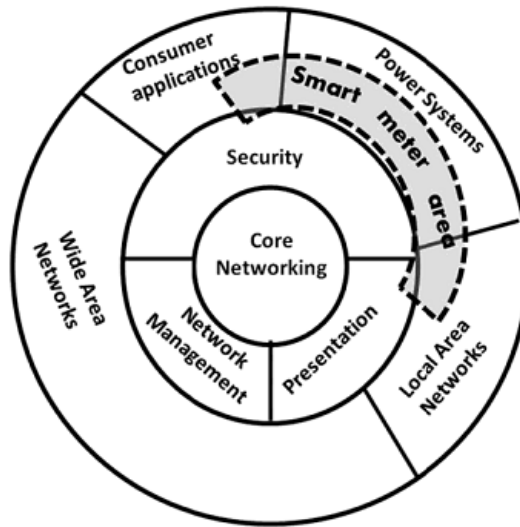
Lo descrito previamente muestra los beneficios que conlleva una adecuada definición de normas, estándares y protocolos para el desarrollo adecuado de

cualquier proyecto. Más allá de esto, lo importante es insistir en la definición de estándares, normas y protocolos globales, que permitan lograr una adecuada interoperabilidad entre los componentes locales, nacionales e internacionales de una red de energía inteligente.

Uno de los mayores retos que presenta actualmente la integración de los medidores inteligentes es definir una serie de características comunes e interoperables que permitan que los dispositivos y los sistemas de comunicación puedan interactuar eficazmente en una red de medición inteligente [48]. Este problema se origina por falta de un estándar internacional que regule los canales de comunicación y las propiedades que deben tener los medidores inteligentes al momento de su instalación, lo que en un momento se puede convertir en un problema cada vez mayor, ya que en la actualidad existen gran cantidad de proyectos que buscan implantar esta plataforma de medición.

Por esta razón y buscando una solución a este inconveniente, fue diseñada la estructura mostrada en la Figura 26, la cual agrupa los servicios que deben disponer los medidores inteligentes, de acuerdo a una serie de características comunes e interoperables que permiten a los dispositivos y sistemas de comunicación interactuar eficazmente.

Figura 27. Sistemas de comunicación de medidores inteligentes.



Fuente: Electricity Smart Meters Interfacing the Households. Benzi, F.; Anglani, N.; Bassi, E.; Frosini, L. [48].

Esta estructura de comunicación clasifica y establece los protocolos de comunicación definidos para cada grupo de servicios, que al ser aplicados de manera adecuada permiten lograr la interoperabilidad de los dispositivos de una manera eficaz. Por ejemplo, esta clasificación establece que la zona de influencia de los medidores inteligentes abarca por una parte, las redes de área local (LAN), con alternativas tecnológicas como Ethernet, WiFi y ZigBee; también considera las aplicaciones de los consumidores finales, estableciendo tecnologías para la automatización del hogar como Konnex Y LonWorks. Por último, considera las operaciones de medición en el sistema de distribución de energía a través de protocolos como DLMS (Device Language Message Specification) / COSEM (Companion Specification for Energy Metering) [48].

Actualmente en Europa, existen proyectos que buscan que lo planteado previamente deje de ser un sueño y se convierta en una realidad. Es por ello que el comité europeo de normalización electrotécnica CENELEC, por medio del

mandato de Europa 2009 de la Comisión Europea, tiene la misión de definir una norma común que permita por medio del uso de los protocolos de comunicación la interoperabilidad integrada de los medidores de energía, gas, y agua de manera eficaz [48].

Otro tipo de normas establecidas para regular la incorporación de los medidores de energía inteligente, están enfocadas a la parte de la seguridad de la transferencia de datos y la privacidad de los perfiles de carga de los clientes finales. Este tipo de normas, al igual que las establecidas para lograr la interoperabilidad de los medidores, no tienen un estándar internacional definido y por consiguiente, la mayoría de las naciones tienen sus propias normas regulatorias en este campo. En muchos de los proyectos de medición inteligente desarrollados se han implementado sistemas de seguridad para la transferencia de datos basados en los esquemas de seguridad informáticos de las corporaciones bancarias, las cuales se supone tienen los más altos estándares de fiabilidad para lograr la protección de la información. Aunque esta solución no es considerada la más adecuada, hasta el momento se han obtenido resultados favorables que permiten validar la metodología propuesta.

Otro de los objetivos del desarrollo de una normatividad internacional conjunta que regule a todos los participantes en la ejecución de un sistema de medición inteligente, es lograr la motivación y participación activa de nuevos usuarios en el sistema AMI. Es decir, lograr que desde el consumidor final hasta el generador de energía central se comprometan con el desarrollo sostenible del proyecto, interactuando de manera activa en pro del mejoramiento día a día de sistema de medición propuesto. Es importante resaltar que este objetivo, aunque no está muy relacionado con la operatividad técnica del sistema, sí representa un aspecto vital para lograr llevar a cabo el desarrollo de un proyecto de esta magnitud y características en cualquier zona en la que se piense su implementación.

Dentro de las leyes, normas y regulaciones que se han desarrollado hasta la fecha relacionadas con la medición inteligente y de las nuevas políticas de desarrollo ambiental, se destacan normas dirigidas a la implementación masiva de energías renovables. Estas normas tienen como objeto motivar tanto a grandes como pequeños consumidores a la utilización de fuentes de energía renovables tales como solar y eólica, lo que a su vez permite que los consumidores finales interactúen de una forma más estrecha con la nueva plataforma de medición inteligente. Además incentiva a los usuarios a ser más amigables con el medio ambiente y de esta forma disminuir las emisiones de carbono generados por el uso de combustibles fósiles.

Otro tipo de normas se han establecido con la intención de definir las características técnicas que deben presentar los medidores inteligentes. Al igual que las mencionadas anteriormente varían de un lugar a otro dependiendo de múltiples factores presentes en la zona de implementación. Entre estas normas se encuentran algunas resoluciones que abordan temas como:

1. Las funciones mínimas que debe incorporar los medidores inteligentes, tal como se enunciaron en capítulos anteriores.
2. Las pruebas que se deben realizar al medidor de energía inteligente antes de comenzar a funcionar. Así como también las pruebas de rutina establecidas para verificar el correcto funcionamiento del medidor una vez comienza a operar.
3. Según la norma europea EN 62056-21, los medidores inteligentes tienen un formato fijo para la transmisión de los datos. En esta norma se definen los tiempos de funcionamiento para el envío y recepción de la información, importantes para no entorpecer ni comprometer la eficiencia del sistema [60].
4. La norma IEEE 1646 contempla el tiempo máximo establecido para que el medidor inteligente logre la desconexión efectiva de la carga ante

situaciones de diferente índole, tales como fallas del sistema o cortes controlados [61].

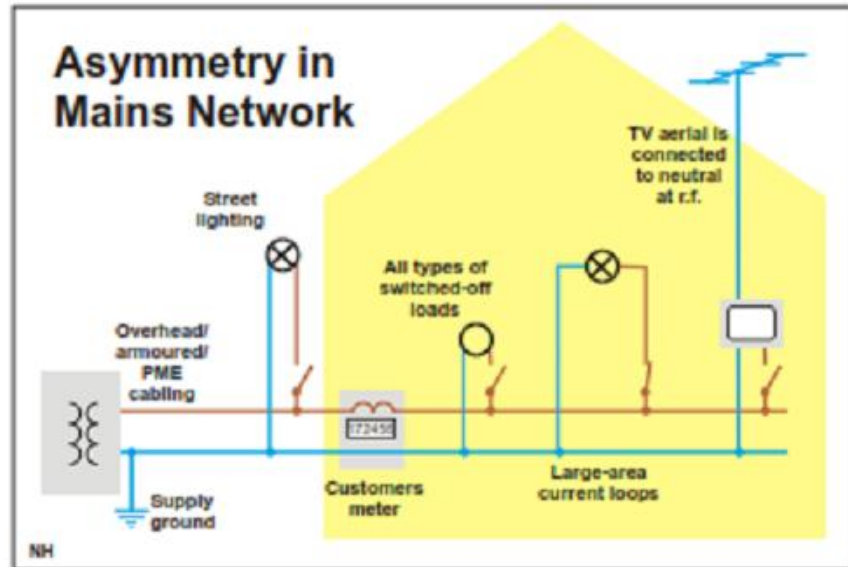
5. Las características físicas del medidor inteligente para reducir al mínimo la vulnerabilidad del sistema, previniendo interrupciones forzosas de tipo malicioso y malintencionado que traten de alterar las condiciones normales de funcionamiento.

La implantación de la nueva plataforma de medición inteligente ha generado en algunos sectores de la comunidad inquietudes con respecto al aumento de la radiación electromagnética, lo cual ha generado debates y polémicas. Algunos sectores de la comunidad, principalmente en países como Estados Unidos argumentan un deterioro en las condiciones de salud que presentan luego de la implantación de los nuevos medidores, lo cual en algunos casos logró detener la ejecución de este tipo de proyectos.

Por esta razón fue necesario establecer una serie de normativas adicionales encargadas de regular las emisiones electromagnéticas producidas por la implantación de la nueva plataforma de medición inteligente AMI. Estas regulaciones están contempladas en diversas normas europeas como las normas (CEM) relacionadas con la compatibilidad electromagnética, donde además de este tema se analizan y se limitan las emisiones electromagnéticas que generan los medidores inteligentes y que pueden causar interferencia en otro tipo de instrumentos electrónicos [24].

La Figura 27 muestra diversos equipos que generan radiación electromagnética en el hogar y que pueden provocar interferencia en las redes de comunicación y mal funcionamiento de los dispositivos electrónicos.

Figura 28. Equipos que generan radiación electromagnética en el hogar.



Fuente: Potential EMC Implementation problems of Smart Metering, Display and Communications. Tyndall, M.; Marshall, R.; Armstrong, E.K.; Marshman, C [24].

Con relación a la normalización de los sistemas de medición inteligente, la comunidad europea está generando una normatividad que permita integrar diversos sistemas con el estándar OMS (Open Metering System).

El sistema de medición abierto (OMS), es un esfuerzo Europeo enfocado a lograr un estándar de comunicación y una interoperabilidad entre los distintos tipos de medidores. El estándar se está desarrollando para incorporar mediciones de energía eléctrica, volúmenes de gas y agua, y calor.

Esta iniciativa surgió en mayo del 2007, con grupos de trabajo financiados por una gran cantidad de empresas han estado trabajando a fin de usar las normas existentes para desarrollar un Sistema de Medición Abierto y de esta manera lograr una interoperabilidad entre diferentes sistemas de medición avanzada. En su desarrollo se han considerado normas vigentes para normalizar los diferentes

procesos de medición. El listado de normas vigentes EN 13757, generadas por el CENELEC que se utilizan en el protocolo OMS son las siguientes:

EN 13757-1:2003 (Sistema de comunicación por metros y la lectura a distancia de contadores, Parte 1: El intercambio de datos).

EN 13757-2:2004 (Sistemas de comunicación para y la lectura remota de contadores, Nivel de capa y enlace).

EN 13757-3:2004 (Sistemas de comunicación para y la lectura remota de contadores, Parte 3: Capa de aplicación dedicada).

EN 13757-4:2005 (Los sistemas de comunicación para los medidores y la lectura remota de contadores, Parte 4: Grupo de productos Wireless (lectura Radio metros para el funcionamiento en la de 868 MHz a 870 MHz banda SRD)).

EN 13757-6:2008 (Los sistemas de comunicación para los medidores y la lectura remota de contadores, Parte 6: Local Bus).

EN 13757-5:2008 (Los sistemas de comunicación para los medidores y la lectura remota de contadores - Parte 5: la retransmisión inalámbrica). Este conjunto de normas se definió como la principal comunicación entre los medidores y el concentrador de datos.

En la comunicación remota se logra a través de diferentes tipos de comunicación que son de gran uso y con cualidades definidas como: conexiones DLS, GPRS, o PLC (Power Line Communication), la visualización del consumo, y la integración de la automatización de una residencia, la gestión de la carga, los planes tarifarios, las desconexiones remotas, se desarrollan bajo el estándar de KNX.

Existen factores importantes en el estándar OMS, que convergen con las normas que existen en los diferentes países en cuanto a medición inteligente (NTA 8130, KEMA, etc.), requisitos fuertes en torno a la seguridad en la medición inteligente y

la urgencia de la implementación de la norma bajo una autoridad neutral para garantizar la compatibilidad e interoperabilidad de acuerdo al estándar OMS.

El medidor inteligente debe medir el consumo de agua, electricidad, gas y calor desarrollado bajo el estándar OMS, el estándar de comunicación se desarrolla bajo la norma europea EN 13757, para que sin importar el equipo de medición utilizado, este se pueda comunicar con los demás equipos de medida inteligentes.

OMS es un estándar de comunicación abierto, el cual se basa en normas europeas y no es el diseño de un solo fabricante, es un desarrollo conjunto. Este sistema de medición abierto es el mejor instrumento para ser utilizado a largo plazo.

Medidores inteligentes de energía eléctrica, gas, agua y calefacción están obligados a reducir el consumo de energía, agua o gas. El primer paso es el desarrollo de sistemas inteligentes, ya que de esta manera la cogeneración puede ser aprovechada en gran medida. La inmersión de sistemas inteligentes y la inclusión de energías renovables pueden lograr altas reducciones de CO₂.

En la página del grupo existe una cantidad considerable de documentos que se pueden consultar. Estos tienen que ver con las especificaciones para usar o desarrollar bajo el estándar abierto, informes técnicos, información para reguladores, documentos de la constitución del grupo OMS, formulario para inscribirse en el grupo, estatutos del mismo.

Las ventajas del estándar abierto OMS son:

- OMS es un estándar de comunicación que se basa en las normas europeas y que cuenta con el apoyo de la industria, lo cual a futuro lo convertirá en un estándar internacional.
- Permite la libre elección de proveedores: ya que los medidores con el protocolo OMS de diferentes fabricantes pueden comunicarse entre si.

- La comunicación directa con los medidores es posible, permitiendo la lectura del consumo, el control de los medidores, la localización de medidores defectuosos o de fugas, la desconexión de medidores, entre otros.
- La visualización del consumo así como la automatización del hogar, que se desarrollan bajo las normas ISO / IEC 14543-3 (EN 50090 (KNX)) se incorporan plenamente en el perfil de aplicación OMS. Instalaciones de uso final diseñadas con el protocolo KNX, operan bajo el mismo modo de comunicación de los medidores del protocolo OMS (EN 13757).
- Mejora de la fidelidad de los clientes por los servicios de valor agregado que se pueden ofrecer: la facturación mensual, el consumo transparente, los nuevos productos y los posibles beneficios adicionales.
- Los medidores OMS facilitarán la introducción de redes inteligentes para la reducción del consumo de energía y una mejor integración de la cogeneración.
- Se tendrá un ahorro de energía a partir del conocimiento y de la concienciación de los datos de los consumo actuales.
- Permitirá la interoperabilidad y la compatibilidad garantizada de todos los medidores inteligentes diseñados con protocolos OMS.
- Cumple con los estándares de Bruselas (EN 13757, relacionados con la reducción de CO2).
- Se tiene una facturación adecuada del consumo de energía, gas, calor o agua.
- Se abre el mercado de la energía eléctrica a una amplia variedad de modelos de tarifas: tarifas variables, tarifas prepago, etc.

- Es adecuado para el incremento de la medición, ya que se basa en normas europeas y en una tecnología controlada y utilizada por muchos fabricantes.

[82]

4. PROYECTOS Y PATENTES RELACIONADOS CON EL DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE MEDICIÓN INTELIGENTE.

Con el objetivo de complementar lo expuesto anteriormente, se realiza a continuación un breve resumen de diferentes proyectos y patentes que se han o se están llevando a cabo en diferentes partes del mundo con respecto a la medición inteligente. Algunos de ellos muestran resultados positivos, otros resultados negativos y otros aún siguen en su fase de desarrollo e implementación.

4.1. PROYECTOS DESTACADOS DE MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN DIFERENTES LUGARES DEL MUNDO.

En esta sección se realiza la descripción de algunos de los proyectos destacados en diferentes lugares del mundo. Estos proyectos incluyen información de diferentes desarrollos e implementaciones, la cual sirve como guía para quienes se interesen por el estudio y futuros desarrollos de la estructura de medición inteligente de variables de sistemas eléctricos.

Entre la información que se presenta están diferentes proyectos de medición inteligente propuestos por grupos de investigación en distintos lugares del mundo e incluyen el estado en el que se encuentran muchos de ellos, presentando los datos de costos, financiación, duración y los resultados obtenidos en algunos de estos proyectos.

4.1.1. Principales proyectos de medición inteligente en países europeos.

En esta parte del trabajo de grado se realiza una recopilación de lo que ha existido, existe y existirá sobre la estructura de medición inteligente en el continente europeo.

Proyectos piloto en Italia desde la óptica de medición inteligente.

Italia es considerada un país líder cuando se habla de medición inteligente. Hay alrededor de 33 millones de medidores inteligentes de energía eléctrica que ya están instalados y su objetivo para la actualidad es instalar alrededor de 36 millones de ellos.

La empresa ENEL es la que se ha encargado de la implementación de medidores inteligentes en este país. Estos proyectos han representado un buen experimento y ejemplo para el mundo, ya que después de su despliegue, los países de todo el mundo comenzaron su propio programa de medición inteligente uno tras otro.

Actitudes de los clientes de energía eléctrica en Noruega.

En Noruega, se han realizado encuestas para analizar las actitudes de los clientes hacia la medición inteligente. Estos análisis tienen como objetivo establecer los impactos que tendrían los clientes en la implementación de los medidores inteligentes. Adicionalmente se establecen los diversos beneficios que no tienen tanto los clientes como los operadores de red encargados del suministro de energía eléctrica.

La encuesta realizada va dirigida a una muestra representativa de clientes de electricidad de Noruega. Se han llevado a cabo alrededor de 40 estudios desde el año 1997 y estos se han realizado debido a que las leyes de Noruega indican que todas las casas en Noruega deben tener contadores inteligentes. Las encuestas se enfocan en establecer la actitud hacia la medición inteligente, por parte de los usuarios, la forma como se realizan las lecturas de los medidores, la confianza que se tiene hacia la medición inteligente, la disposición a pagar la energía facturada por los medidores inteligentes, los ahorros de energía, los servicios adicionales, los beneficios, las oportunidades, entre otros [49].

Austria: implementación de medidores en ENERGY AG.

En Austria, varios actores han participado activamente en la implementación de medidores en Energy AG. Esto fue planeado como un proyecto piloto con el tamaño de 10000 medidores inteligentes en el año 2008. Se espera haber implementado los medidores inteligentes para el 85% de sus consumidores en el 2015.

Por su parte, LINZ AG un operador de red en la ciudad de LINZ Austria, ha iniciado un proyecto piloto en un parque de energía ecológica en la empresa.

Lanzamiento de la medición inteligente en los Países Bajos.

En los países bajos, un número de operadores de red como Delta, Continuon, y Oxxio han comenzado con el lanzamiento de proyectos de medición inteligente. En el 2008, Delta desplego 350 medidores en hogares residenciales. Continuon, puso en marcha en el 2008, 38000 medidores inteligentes para hogares domésticos y Oxxio por su parte, puso en marcha desde el 2006 alrededor de 100000 medidores inteligentes. En total, fueron instalados alrededor de 150000 medidores inteligentes como parte de proyectos piloto por los operadores de red en diferentes países bajos. [43]

Además de esto, se desarrollo el proyecto Smart City [83] en Ámsterdam el cual se describe con detalle a continuación:

Es un proyecto lanzado a nivel europeo como respuesta a los crecientes retos energéticos que se presentan a nivel mundial. Su desarrollo se enmarca en el plan 20-20-20 propuesto por la unión europea, que establece los objetivos para en el año 2020 conseguir un aumento en la eficiencia energética del 20%, una reducción de las emisiones de CO2 del 20% y un aumento de las fuentes de energía renovable en un 20% [84]. "El objetivo de este proyecto es lograr una mejor gestión de la energía eléctrica en las redes, balances eficientes de demanda

y lograr involucrar todos los agentes del sistema eléctrico, desde la generación hasta el consumo” [85].

Llevar a cabo un proyecto de este tipo lleva incluido consigo el despliegue de “tecnologías de última generación en smart metering, comunicaciones y sistemas, automatización de la red, generación y almacenamiento, e infraestructura inteligente de carga de vehículos” [85].

A nivel europeo se han desarrollado múltiples proyectos de este tipo, entre los que se destaca la ciudad de Ámsterdam en Holanda, pionera en la implementación exitosa de este tipo de proyecto y razón por la cual se convirtió en el principal ejemplo internacional del proyecto smart city enfocado en la eficiencia y gestión energética.

Este proyecto tuvo su inicio en el 2009 bajo los mismos lineamientos del proyecto smart city, con la idea de contribuir a los objetivos climáticos de Ámsterdam, de Holanda y de la Unión Europea. Y con la intención de convertir a esta ciudad europea en la primera ciudad en ser totalmente sostenible y con la mayor tasa de ahorro de energía para el 2015.

El desarrollo del proyecto Ámsterdam smart city, se planificó para desarrollarse en cuatro áreas diferentes denotadas así: Trabajo sostenible, vida, movilidad y espacios públicos, las cuales serán descritas más adelante.

Estos frentes de trabajo fueron distribuidos en 3 zonas a lo largo de la ciudad denominadas: Nieuw West, Zuid Oost e Ijburg como muestra la Figura 29. Las cuales fueron elegidas debido a sus características que favorecen la implementación del proyecto.

Figura 29. Distribución de las áreas de trabajo en la ciudad de Ámsterdam para el desarrollo del proyecto smart city.



Fuente: http://www.fomentosansebastian.org/images/stories/sectores_emergent/s/energias%20renovables/01AmsterdamSmartCity_Intro_AIM.pdf [87]

La zona Nieuw West, brinda una representación de la densidad demográfica y del alto consumo energético presentado en la ciudad de Ámsterdam. Además de esto, en esta zona se desarrolló el primer proyecto relacionado con las Smart Grids en Holanda, el cual sirvió como columna vertebral para la integración de las nuevas fuentes de energía renovable incluidas en el proyecto smart city [88].

La zona Zuid Oost constituye la representación de las zonas de esparcimiento y entretenimiento de Ámsterdam. En esta zona se encuentran ubicados gran cantidad de parques deportivos, zonas verdes, lagos, bosques e imponentes construcciones como el estadio nacional Ajax Arena y otros complejos deportivos y recreativos. Por consiguiente este lugar en una importante zona de

investigación, al ofrecer la oportunidad de desplegar gran variedad de fuentes de energía renovables que permitan disminuir las emisiones de carbono de la ciudad [88].

La zona Ijburg comprende el barrio más joven del distrito de Ámsterdam, el cual nació a finales de los 90. En este lugar la mayoría de sus habitantes son gente relativamente joven, lo cual permite que sean personas abiertas a los cambios. Pero como punto fundamental, esta zona de Ámsterdam cuenta con la red de Internet de banda ancha más rápida del mundo (Cerca de 500 Mb/s). Lo cual la convierte en un lugar extraordinariamente interesante para desarrollar nuevos productos y servicios por medio de las redes inteligentes [88].

Áreas de trabajo planteadas.

Como parte del área de **trabajo sostenible**, está será implementada en la zona denominada Nieuw West, exactamente en la prestigiosa torre ITO, en el área de Zuidas. Cuyo objetivo es convertirse en un edificio sostenible gracias a la utilización de las últimas tecnologías inteligentes para edificaciones. Por otro lado, en la parte del área **vida sostenible**, 728 viviendas del distrito Geuzenveld, también en la zona denominada Nieuw West, contarán con diferentes instrumentos de última tecnología para el ahorro de energía. Por su parte, en el área **movilidad sostenible** se realizan actualmente las preparaciones necesarias para instalar una cantidad considerable de puntos de recarga eléctrica en el puerto de Ámsterdam, para que de este modo, los barcos no necesiten utilizar los generadores de energía diesel. Esta área del proyecto está siendo desarrollada en la zona denominada Ijburg. Por último, el área de trabajo **espacios públicos** se encuentra en desarrollo bajo el nombre de espacios públicos sostenibles, y está siendo implementado en la prestigiosa calle de compras conocida como Utrechtsestraat, la cual por medio de la implementación de este proyecto, planea convertirse en la calle de compras más sostenible de Europa [86].

Resultados preliminares

En los primeros años de implementación de este proyecto se han conseguido múltiples objetivos, los cuales traen consigo grandes beneficios como:

- La implementación del área denominada **trabajo sostenible** en la torre ITO, con su programa de desconexión de luces y aparatos electrónicos fuera de las horas de oficina ha permitido una reducción del 18% del consumo de energía eléctrica del edificio, lo cual equivale a 20 MWh al año. En este mismo proyecto, se reemplazaron 300 lámparas halógenas por luces LED, lo que resultó en una disminución adicional del 42% de energía eléctrica, lo cual equivale a 47 MWh al año [87].
- La inclusión de la generación distribuida por medio de fuentes de energía renovables en las diferentes zonas de la ciudad ha permitido una reducción en las emisiones de CO2 de cerca del 50%. Además de permitir convertir las construcciones en lugares autosuficientes [87].
- Los negocios comerciales redujeron su consumo promedio un 9% lo cual incentivo la inversión en las nuevas tecnologías. Permitiendo así un incremento en el comercio de toda la ciudad [87].

Todo el despliegue que ha tenido la ciudad de Ámsterdam con el proyecto smart city la ha hecho merecedora de grandes premios y distinciones a nivel mundial. Entre los que se destaca el premio a la ciudad más inteligente del mundo otorgado en el año 2012, lo cual la ha convertido en un ejemplo para todas las ciudades del planeta.

Proyectos realizados en Dinamarca, Finlandia, Alemania y Reino Unido.

A continuación se describen los proyectos sobre medición inteligente que se están desarrollando en estos países:

- En Dinamarca, un número de operadores de red han instalado un total de 300000 contadores inteligentes para grandes usuarios en su mayoría consumidores industriales. En el 2004, se empezó un proyecto con 50 hogares con el objetivo de implementar medidores para poder observar sistemas de autocontrol y extender el acceso y las experiencias de todos los servicios públicos, registrando los consumos por intervalos de tiempo para poder realizar una comparación con datos históricos.

Como resultado se obtuvo un ahorro anual de aproximadamente 200 kWh por usuario o alrededor del 5% y se logró estimular a las personas a realizar un mejor uso de la energía eléctrica.

Además de esto en otro estudio realizado en Dinamarca, se pudo instalar medidores y tomar su consumo para realizar una comparación con países vecinos. Como resultado a este proyecto se logró durante el primer año una reducción de aproximadamente el 22% en el consumo de energía eléctrica.

- Por otro lado, en Alemania, se desarrolló un proyecto en los años 2008-2010 con el objetivo de poner a prueba medidores inteligentes funcionando en conjunto con un portal web. Este proyecto aún no ha finalizado pero se han observado ciertos resultados en donde se muestra el interés y la visión positiva de la mayoría de las personas hacia la medición inteligente. [62].
- En otros países de Europa como en Finlandia, la medición inteligente comenzó a principios de marzo de 2009 y se tiene como requisito legal implementar el 80% de los medidores inteligentes para el año 2014.

- En el Reino Unido en 2009, el gobierno anunció el programa de medición inteligente y dijo que este se completaría en el año 2020. Este programa fue lanzado con el fin de cambiar el hábito de consumo de energía de las personas y con el fin de reducir emisiones de CO2 para poder contribuir a mejorar las actuales situaciones climáticas. Como se puede observar todavía hay una necesidad urgente de investigar sobre este tema de medición para poder desarrollar diferentes proyectos innovadores en distintas partes del mundo. [43].

Empresas energéticas de Reino Unido estarán a cargo de la puesta en marcha y se espera que en ese año se logre el máximo ahorro y se aumente el uso de energías renovables. El departamento de energía y cambio climático de Reino Unido dijo que se esperan 47 millones de medidores en el año 2020.

Otros proyectos en Europa.

Como la necesidad de energía aumenta constantemente en distintas partes del mundo, la medición inteligente se ha convertido en el principal interés de las empresas de energía eléctrica en diferentes partes del mundo. Es por esto que se presentan los principales alcances del proyecto TOISE (acrónimo inglés de *Trusted Computing for European Embedded Systems*, Computación Segura para Sistemas Embebidos Europeos), el cual tiene su principal interés en la seguridad de las redes de distribución de energía eléctrica abordando algunos escenarios que se relacionan con la privacidad y la integridad en el uso de la energía. [63].

El proyecto Smart House (2001-2005), fue patrocinado por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC) y *la Asociación Europea para la Coordinación de la Representación de los Consumidores* en

la Normalización (ANEC). Este proyecto se llevó a cabo en dos fases, la primera (2001-2003) concluyó con un informe que destacaba el papel fundamental de los estándares de interoperabilidad y la segunda terminó en el 2005 con un informe con visión general de tecnologías, aplicaciones y estándares basados en consultas con casi todos los operadores.

En Europa, hay una necesidad de mejorar el uso final que se le da a la energía eléctrica con el fin de poder realizar una mejor gestión de la demanda. Es por esto que se presenta un sistema de lectura de contadores QUNDIS AMR.

El sistema QUNDIS AMR ofrece una base para la medición inteligente y consta de diferentes niveles entre los cuales se encuentran los dispositivos de nivel de campo, la red de área local y las puertas de enlace que ofrecen mayor flexibilidad mediante la lectura de datos. [3].

Además de esto en Europa también, se ha presentado un portal para un sistema de medición inteligente que está destinado a los consumidores. En este portal, el usuario final es informado a diario sobre el consumo y puede tomar diferentes decisiones sobre cómo manejar su consumo. Esta implementación se ha realizado usando la plataforma de Google App Engine y el servicio de Google Spreadsheets.

Como resultado se ha observado que simplifica el proceso de desarrollo y que se reducen costos de mantenimiento. [64].

4.1.2. Medición inteligente en Oceanía.

En Australia, debido a las sequías y al aumento del costo del agua, se ha impulsado la implementación de medidores inteligentes de agua y con ello la posibilidad de aprovechar la infraestructura de comunicaciones que ya está

establecida en la medición inteligente de energía eléctrica. El sector energético ha tenido cierto éxito y ha logrado modificar el comportamiento del cliente a través de una mayor conciencia beneficiando tanto a los usuarios como a los encargados del suministro de energía eléctrica.

Los resultados iniciales en el estado de Victoria han hecho que se incremente la medición inteligente de energía eléctrica a más usuarios. Con esto se aspira a una reducción de costos en la implementación de medidores inteligentes de agua, pues se aprovecha la red de comunicaciones existente para su implementación. [21].

Otro proyecto estudiado, propone una red de medición inteligente para la supervisión de vehículos eléctricos. Esta red cuenta con el uso de dispositivos de medición de bajo costo y sistemas de comunicación ZigBee.

Los vehículos eléctricos son una excelente alternativa para la eficiencia energética, pero usan cargadores de baterías que son circuitos de potencia que debido a su naturaleza no lineal, inyectan fácilmente armónicos a la red; por lo tanto, es necesario estudiar los efectos de los vehículos eléctricos en la calidad de la energía eléctrica del sistema donde son conectados [9].

Como se puede observar, estados como Victoria ya tienen implementados varios medidores inteligentes con el fin de reducir el consumo de energía y de reducir las emisiones de carbono.

Además de Australia, en Nueva Zelanda, desde el año 2006 se inició con un programa de medición inteligente y con esto se han generado diversos estudios sobre el desempeño de los sistemas de comunicación, en donde se ha revelado que se tienen problemas en las funciones de supervisión en tiempo real y con la comunicación con otros dispositivos [6].

4.1.3. Situación actual de la medición inteligente en países asiáticos.

Con relación a la medición inteligente en los países del continente asiático, a continuación se resaltan los proyectos que mayor importancia han tenido.

- En la India, después de una extensa investigación sobre medición inteligente, se realizó un intento para diseñar una arquitectura eficaz y óptima. La investigación considera los medidores inteligentes y el mercado de energía, y además de esto propone a bajo costo un dispositivo adicional para los medidores de energía, que permite actualizar a los clientes la facturación y el consumo de energía eléctrica. En la india, la red inteligente como en muchas partes del mundo se considera una necesidad pero los precios actuales de los medidores inteligentes han retrasado su masificación. El trabajo consultado fue realizado con el propósito de estudiarla barrera económica y además tratar problemas existentes como el robo de energía y la poca interacción con los clientes que pueden ser solucionados con los medidores inteligentes; así como el estudio de los diferentes sistemas de comunicación [65].
- En Corea, se revisó el sistema de medición inteligente de otros países con el fin de establecer los beneficios de su implantación. Este estudio se centró en la verificación de la eficacia de los visualizadores de los medidores de energía en los hogares para reducir las pérdidas de los proveedores de energía debidas a los altos costos de generación de esta energía.

Entre los países que fueron analizados se encuentran Estados Unidos y Australia, país que espera completar la cobertura total de su sistema de medición inteligente a finales de 2013.

Con todos estos estudios se concluyó que con la utilización de visualizadores, existe un ahorro de energía eléctrica sin necesidad de

cambiar tarifas o controlar de otra forma los dispositivos que se utilicen. Esto indica que proporcionar información en tiempo real del consumo de energía eléctrica induce a la autorregulación por parte de los usuarios de aproximadamente el 10 % del consumo [66].

- En China se han lanzado diversos proyectos que mejoran la eficiencia y la seguridad de la red eléctricas en general. La mayor parte de energía eléctrica en China es generada por plantas de carbón. El gobierno chino ha comenzado a ampliar los recursos energéticos y quiere en el año 2020 alcanzar un 15% del suministro total de energía mediante el uso de la generación de energía renovable. [5]. A partir de 2008 el gobierno ha comenzado el proceso de normalización. En Diciembre de 2009, la corporación estatal de red eléctrica de China, termino la primera convocatoria de licitación de medidores inteligentes.
- En Kioto, Japón, en enero de 2002 se empezó con el estudio de 9 hogares con el objetivo de estimular a los clientes a cambiar el comportamiento en el consumo de energía con el fin de lograr un ahorro significativo. Se analizó el consumo de todo el hogar y de algunos aparatos específicos. Como resultado se obtuvo una reducción promedio del 9% y un ahorro de energía en aparatos como televisores, calefacción y refrigeradores.

El estudio y el análisis de estos proyectos se consideran fundamentales a la hora de considerar implementaciones de sistemas de medición inteligente, ya que con ellos se pueden estudiar diversos casos y se pueden observar los diferentes impactos y beneficios que han tenido los medidores inteligentes en diferentes partes del mundo.

4.1.4. Principales proyectos de países de América del Norte.

A continuación se describen los proyectos que sobre medición inteligente se han venido desarrollando en diferentes estados de los Estados Unidos y en Canadá.

- En Estados Unidos se han desplegado una serie de proyectos pilotos para ayudar con el ahorro de energía por parte de los clientes y con la gestión eficiente de los recursos públicos. Pequeños software, hardware y sistemas a nivel de las empresas de desarrollo han comenzado a crear soluciones para los clientes que buscan reducir sus facturas de energía. Google ha desarrollado un medidor inteligente que utiliza algoritmos desarrollados en la MIT para proporcionar a los clientes una visualización en casa de la energía que se consume en tiempo real. [67].

En otros estados de EEUU como en los Ángeles, también decidieron aplicar AMI a sus clientes. Grandes empresas como Microsoft y Cisco Systems, también están incursionando en esta área con productos y planes para la implementación de sistemas de medición inteligente.

Adicionalmente, el departamento de energía de los Estados Unidos ha identificado siete características que debe contemplar una red inteligente en sistemas eléctricos: optimizar la utilización de activos y la eficiencia operativa; dar cabida a todas las opciones de generación y almacenamiento de energía eléctrica; proporcionar calidad en la energía eléctrica; anticipar y responder a las perturbaciones de la red eléctrica; actuar adecuadamente contra ataques físicos, cibernéticos y desastres naturales; tener participación activa de los consumidores y activar nuevos productos y servicios en el mercado de energía eléctrica. Todo esto se define dado que en los Estados Unidos se espera reemplazar alrededor de 150 millones de medidores analógicos por medidores inteligentes.

Por lo tanto se analizan y se estudian las características que deben tener los medidores inteligentes y se presenta atención especial a los consumidores y a la información que se les brinda. En este sentido, los medidores inteligentes deben contar con pantallas que le muestren al usuario en tiempo cuasi real el consumo de energía y su costo correspondiente.

Algunos de estas pantallas muestran también las emisiones de CO₂ e indican la demanda de energía eléctrica, cambiando el color en la pantalla. Si la demanda pasa de cierto umbral, el color de la pantalla cambia entre verde, amarillo y rojo. El verde indica que la demanda de energía eléctrica es baja, amarillo una demanda de energía eléctrica media y rojo una demanda de energía eléctrica muy alta.

Con esto el usuario no necesita un conocimiento específico respecto a la forma como se leen las pantallas y la pantalla inteligente recibe información periódica del medidor inteligente. Estas pantallas son relativamente económicas y fáciles de instalar.

En conclusión, este proyecto presenta algunas características básicas con las cuales debe contar un medidor inteligente, para que pueda cumplir con la vida útil estimada y puedan ofrecer los beneficios que los consumidores requieren, necesitan como entender y manejar su consumo de energía de una manera adecuada y con herramientas que sean de fácil manejo [68].

- En California tres grandes empresas de servicios públicos comenzaron los proyectos de medición inteligente. Pacific Gas Y Electric Company, Southern California Edison Company y San Diego Gas y Electric, se encargan de estos proyectos en donde lo primordial es contar con medidores inteligentes que permitan la comunicación con los clientes.

- A finales del año 2010 el ministerio de energía de Ontario ordenó que todos los hogares residenciales deberían tener instalados medidores inteligentes. Por esto se empezó a trabajar en ello y se creó el diseño de un modelo tecno económico con diferentes funcionalidades.

Este modelo fue creado por una empresa de distribución de Ontario con el fin de determinar los niveles de factibilidad y la opción más viable de implementación de medición inteligente. En este estudio se utilizaron tres niveles de funcionalidad los cuales son: medidores inteligentes con funcionalidades mínimas, medidores inteligentes con displays para cada hogar, y medidores inteligentes con una unidad de control de demanda.

El medidor inteligente con funcionalidades mínimas, registraba la energía consumida y los tiempos en los que fue utilizada dicha energía. Sus datos se podían recoger de manera remota a través de una área local.

El medidor inteligente con displays, se combinaba con un monitor que mostraba el consumo de energía de cada hogar y se operaba a través de un sistema inalámbrico.

El medidor inteligente con unidad de control de demanda, permitía a un programa la posibilidad de controlar el consumo de energía durante las horas de demanda pico de energía.

En el modelo creado, estos niveles se compararon para saber cuál ofrecía mejor beneficio anual y cual generaba una reducción en la energía eléctrica consumida. El modelo no ofrecía como tal recomendaciones pero si ayudaba a las empresas de servicios públicos a tomar decisiones al respecto. [35]

- En Canadá, se dio un proyecto en los años 2004-2006 cuyo objetivo era beneficiar a más de 400 familias con el desarrollo de un dispositivo de retroalimentación en tiempo real para reducir el consumo de energía eléctrica y con el fin de promover la cultura de ahorro de energía en los distintos consumidores. Como resultado se obtuvo un impacto positivo y se redujo el consumo principalmente en la calefacción eléctrica de los hogares.
- En Ohio, en enero de 2006 se empezaron a utilizar medidores inteligentes de energía eléctrica en 60 hogares con el objetivo de explorar efectos en tiempo real de los entornos residenciales y de investigar las actitudes socioeconómicas respecto a la medición inteligente. La idea consistió en observar el consumo de electricidad de cada hogar, el costo por hora y comparar los datos con datos históricos. Como resultado se obtuvo que no existían ahorros significativos de energía eléctrica, a pesar de que aumentó la conciencia del uso de la energía.
- Electric Power Research Institute (EPRI), Intelligrid Consumer Portal (2005), es otro proyecto que nace con el objetivo de establecer un marco de referencia prestando apoyo a un portal del consumidor que establece un camino de comunicación entre empresas y clientes, permitiendo servicios avanzados para los consumidores relacionados con la energía eléctrica y la automatización de los hogares.
- HydroOne es una corporación ubicada en Toronto (Ontario, Canadá), que desempeña un papel muy importante en la energía eléctrica ya que propone iniciativas para el desarrollo y la mejora de la medición inteligente.

Su propósito es hacer realidad el aumento de la fiabilidad del sistema y ofrecer al cliente un servicio mejorado. HydroOne está trabajando en prácticas para la industria, con el fin de poner a prueba diferentes tecnologías que le permitan definir adecuadamente la red inteligente que se tendrá en el futuro. Su trabajo es uno de los mayores despliegues de América del Norte, cuya iniciativa comenzó en el año 2005 con el objetivo de alcanzar diferentes beneficios como las lecturas automáticas de los medidores, un mayor control de los consumos de energía, una supervisión y análisis de los hogares y negocios sobre el uso de la electricidad a través de internet y un día después de su uso, una comunicación bidireccional, la mejora de los sistemas en la gestión de apagones, y la implementación de dispositivos en los hogares como monitores de energía que permitan observar cada minuto el uso de la energía de los distintos aparatos que se tengan en funcionamiento [69].

4.2 OTROS PROYECTOS.

A continuación se presentan algunos diseños, desarrollos e investigaciones realizadas en el campo de la medición inteligente en diferentes partes del mundo y que están reportados en revistas científicas.

En cada ítem se realiza una síntesis del trabajo reportado. Los trabajos reportados incluyen aspectos como: la comunicación en la medición inteligente, la operación de sistemas eléctricos considerando la medición inteligente, la detección de consumos anómalos con medidores inteligentes, la gestión energética de sistemas eléctricos y el diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica.

- En la referencia [16] se propone la instalación de un sistema inteligente para detectar el uso ilegal de la energía eléctrica. Esto se realiza mediante el envío de una señal de prueba de alta frecuencia a la red, y un software que calcula la impedancia de línea y compara los valores obtenidos al momento

de la instalación. Así el sistema puede buscar y localizar el lugar de uso ilegal de la energía eléctrica. El sistema está basado en la comunicación a través de la red eléctrica (PLC) por ser esta la forma más económica de transmitir datos en un sistema.

- En la referencia [52] se presenta el diseño de un medidor inteligente con sistema de comunicación ZigBee. Los resultados experimentales de este diseño e implementación muestran que este medidor puede ser integrado eficazmente en la infraestructura AMI. La comunicación a través de ZigBee se utiliza para transmitir los datos de consumo, y el medidor además de ser utilizado para la recopilación de datos, sirve para el registro de datos cuando se presentan perturbaciones en el sistema eléctrico. Con este medidor y esta tecnología de comunicación no solo se puede ahorrar costos de lecturas manuales sino que también se presenta información detallada del consumo de energía, para su posterior análisis. En este proyecto, se utiliza un analizador de red inalámbrica ZENA para inspeccionar y examinar la transmisión de datos.
- En la referencia [73] se propone un sistema de medición inteligente con comunicación a través de la línea eléctrica (PLC), por ser esta una tecnología apropiada para la lectura de los medidores inteligentes y para el control automático que se necesita en una red inteligente. Este sistema propuesto incluye generación y suministro, intercambio de datos, y gestión y transmisión segura de los datos.

La seguridad es uno de los puntos clave de estos medidores y por esta razón se presenta un estudio que contiene los requisitos de seguridad y los sistemas primitivos criptográficos que se utilizan para su construcción. Para

ello se analizan los principales ataques que se pueden presentar y se establecen las principales características que debe tener el medidor inteligente.

- El problema de la seguridad en la información que fluye en la medición inteligente es abordado en la referencia [94]. En esta referencia, se aborda la problemática de proteger los datos personales de los usuarios que se relacionan con los hábitos que se tienen del consumo de diferentes servicios públicos.

Es por esto que en la infraestructura de medición inteligente se propone una nueva arquitectura para la privacidad de las mediciones de los clientes. Esta nueva arquitectura consiste en introducir nuevos nodos funcionales encargados de proteger la privacidad y que son capaces de obtener mediciones agregadas sin tener acceso a la información personal de los usuarios. Los resultados obtenidos de esta arquitectura, muestran que esto representa un escenario viable para entornos donde interactúen una gran cantidad de medidores inteligentes.

- En la referencia [70] se presentan aplicaciones sobre respuesta a la demanda de las redes de energía inteligentes y se propone un sistema que integra la respuesta a la demanda y la gestión de energía a través de un medidor inteligente. La respuesta a la demanda juega un papel importante en las redes de energía eléctrica, ya que ayuda a evitar apagones y ayuda a distribuir las pérdidas de energía eléctrica entre los distintos consumidores para poder minimizar los efectos que se producen. El sistema propuesto integra un medidor inteligente con un módulo ZigBee para la monitorización del consumo de la energía eléctrica.

Para la aplicación de la gestión energética y de la demanda, se implementan perfiles de carga dinámica basados en los datos proporcionados por el medidor inteligente, que deben cumplir las siguientes características: Monitorización de todos los consumos de energía eléctrica o almacenamiento de los datos para futuros análisis, realización de una gestión de la energía eléctrica a través de los medios de comunicación y los servicios web, y crear una interfaz con el usuario para que pueda acceder a todos los parámetros. En general, en esta aplicación se usan medidores inteligentes para obtener la información de energía eléctrica y transmitir los datos a través de un software para que estén disponibles para el algoritmo de control.

- La aplicación de los medidores inteligentes en la reducción del consumo de energía eléctrica de los hogares aproximadamente entre un 10 y un 15 % es presentado en la referencia [1]. Este porcentaje se logra con la integración y la programación de los diferentes electrodomésticos de los hogares con el fin de que puedan funcionar durante distintos periodos con tarifas relativamente bajas. Lo ideal es que se tengan hogares inteligentes con sistemas de automatización en donde los principales electrodomésticos tengan un control del consumo de energía de manera remota y así conectar y desconectar los electrodomésticos cuando se requiera durante los periodos valle y pico respectivamente. Es por esto, que grandes empresas de electrodomésticos del mundo como Whirlpool, LG y Samsung ya están desarrollando diferentes dispositivos para sus electrodomésticos con el fin de que estos puedan ser integrados exitosamente al sistema de medición inteligente.

- Con relación a la calidad de la energía eléctrica, en sistemas de distribución de energía eléctrica, unos de los principales problemas que se presenta es el desbalance que puede aparecer entre las fases del sistema trifásico. En la referencia [18] se presenta el desarrollo de una aplicación basada en la medición inteligente para lograr balancear las cargas conectadas al sistema trifásico.

La mayoría de los proveedores de energía eléctrica dividen a sus clientes monofásicos en tres grupos y conectan cada grupo a una fase para lograr un sistema balanceado. En el pasado este método de balancear las fases tenía éxito debido a que casi todos los clientes utilizaban equipos o dispositivos eléctricos comunes todo el tiempo y por eso la carga de una fase podía ser fácilmente igual a otra. Sin embargo, en la actualidad las cargas han cambiado debido al uso de diferentes equipos en cada hogar con diferentes consumos de energía.

Es por esto que en esta referencia se ha propuesto un medidor inteligente que cuenta con relés (uno para cada fase) que permiten a los proveedores de energía activar o desactivar un cliente y cambiarlo de fase cuando sea necesario y así se pueden balancear las cargas eléctricas de las tres fases.

- Por otra parte, otra problemática de los sistemas eléctricos que debe abordarse con los medidores inteligentes son los problemas de distorsión armónica. Estos medidores, pueden estar en capacidad de determinar la calidad de energía eléctrica relacionada con la distorsión armónica que se pueda presentar en el sistema eléctrico.

En la referencia [46], además de abordar el problema de calidad de energía, se analizan dos aspectos importantes: la reducción del impacto de las cargas no lineales en los usuarios conectados al sistema eléctrico, para

evitar perturbaciones en la red y la protección de los usuarios especiales que tienen demandas particulares con relación a las perturbaciones que se presentan en la red.

El principal problema que trae consigo la distorsión armónica es que la presencia de un gran contenido de armónicos en las señales de corriente, puede hacer que se presenten distorsiones de tensión y pérdidas, cuando la tensión alcanza niveles de distorsión que pueden afectar el funcionamiento de los diferentes equipos sensibles de los usuarios conectados a la red. Por esta razón, se propone un procedimiento para la evaluación del grado de distorsión armónica en algunos medidores inteligentes, para lo cual se hace un desarrollo de la aplicación en una plataforma FPGA que incluye los procesos de calibración necesarios para lograr un adecuado funcionamiento.

- Otro de los trabajos relacionado también con armónicos en la red es el de la referencia [12]; se propone la implementación de medidores inteligentes con un filtro de componentes armónicas. Las componentes armónicas tienen un impacto negativo en las componentes de la red de suministro eléctrico. Es por esto que muestra la importancia de implementar medidores inteligentes que separen la energía de las componentes armónicas para poder tener un sistema de compensación que garantice una adecuada calidad en la energía eléctrica que se está ofreciendo a todos los usuarios.
- Se presenta el principio de funcionamiento de un medidor inteligente con la aplicación de un transformador de línea de corriente cero que analiza las conexiones actuales y permite mejorar la capacidad de protección de la tecnología de medición inteligente. Al momento de instalar estos medidores se debe tener cuidado con la conexión, ya que este es el principal fundamento para poder realizar muy bien la medición de los parámetros

necesarios. Las empresas encargadas del suministro deben realizar mantenimientos y tener cuidado con conexiones ilegales realizadas intencionalmente ya que esto les puede ocasionar errores en la medición y puede ocasionar problemas con la calidad de energía que ofrecen a los usuarios. [71].

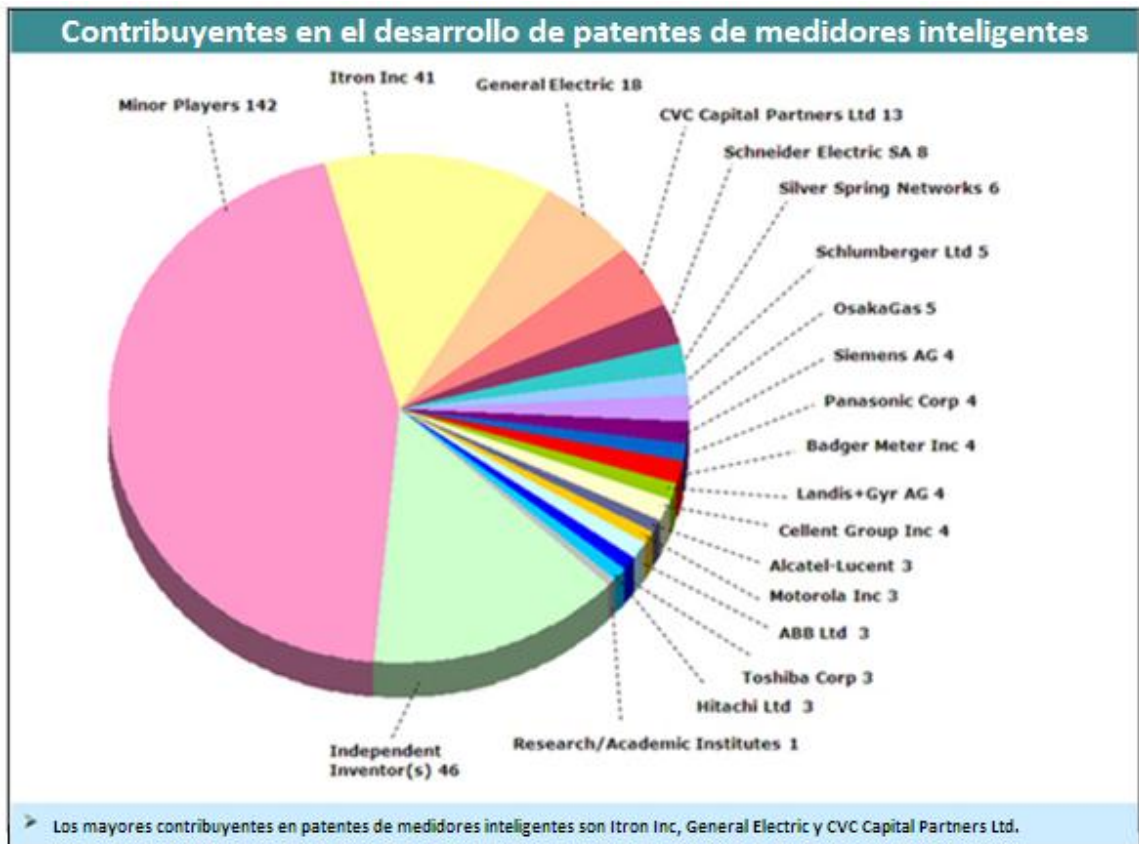
- Finalmente en la referencia [72], se describe una plataforma de simulación que se puede utilizar para predecir el consumo de energía eléctrica de una casa que cuenta con gran variedad de aparatos o electrodomésticos. Según los experimentos realizados el simulador que se propone puede predecir perfiles de carga reales en los equipos. Este simulador se puede utilizar para reducir el consumo de energía eléctrica y con él se puede simular, probar, verificar y optimizar la medición inteligente.

Este simulador propone un sistema de medición inteligente que se considera tiene un dispositivo encargado de medir y transferir la información al medidor. El intercambio de información se da mediante el uso de la línea de la red de suministro (PLC).

4.3. DESARROLLO DE PATENTES EN MEDICIÓN INTELIGENTE A NIVEL MUNDIAL.

El desarrollo de patentes relacionados con sistemas de medición inteligente ha sido amplio. Su progresión es dada por el interés de las empresas líderes en productos eléctricos y en grupos de investigación, adscritos a diferentes universidades. En la Figura 30 se observa que una cantidad considerable de empresas y centros de investigación han certificado sus desarrollos a través de patentes.

Figura 30. Empresas y centro de investigación con patentes.



Fuente: <http://www.patent-art.com/AssigneeWisew11.html> [89]

La necesidad de avanzar en este campo ha hecho que diferentes empresas se unan, con el fin de desarrollar productos competitivos, relacionados con la medición inteligente. Haciendo de esta manera contrapeso a los grandes productores de medidores eléctricos. En la Tabla 3 se presentan algunos de los grupos conformados por diferentes empresas, las patentes que han certificado y el área de enfoque de cada patente.

Tabla 4. Desarrollos compartidos por diferentes empresas en medición inteligente.

DESARROLLOS COMPARTIDOS			
Patente/ Publicación No	Colaboradores	Título	Area de enfoque
JP2001128256A	Toyo Keiki Co. Ltd.; Nagano Japan Radio Co.	Sistema automatico de medición	Sistema automático de lectura de medidor con la estación base que incorpora código sincrónico en los datos de demanda
JP2006345662A	Panasonic Corporation; The Tokyo Electric Power Co. Inc.	Monitorización remota/Sistemas de control para casas	Monitorización remota/Sistemas de control para casas
JP03818912B2	Tokyo Gas Co. Ltd.; Takenaka Seisakusho Co. Ltd.; Fuji Electric Holdings Co. Ltd.	Un medidor de gas y setter para producción	Medidor de gas con éxito de indicación de fallo de comunicación con respecto al setter sobre la base de datos de salida del interruptor de lectura
JP2005174107A	Chugoku Keiki Kogyo Kk; Saiko Engineering kk	Sistema de lectura automatica	Sistema de medición de lectura automatica/transmisión de datos de lectura de medidor de electricidad superpuestas a la señal de paquetes entre par de convertidores
JP2006064430A	Yazaki Corporation; Panasonic Corporation	Unidad de medición y lectura automatica	Unidad automatica de lectura de contadores para la conmutación y la visualización de información de lectura de medidores, la cantidad residual de dinero pagado por adelantado y el gas utilizable

Fuente: <http://www.patent-art.com/AssigneeWisew11.html> [89]

En la Tabla 4 se presenta un grupo de investigación de la Universidad de Oxford que tiene una patente en sistemas de medición inteligente. Se debe resaltar que los institutos de investigación trabajan arduamente para lograr la innovación y la efectividad que se espera de los sistemas de medición inteligente.

Tabla 5. Medidores inteligentes / Institutos de investigación.

Medidores inteligentes / Institutos de investigación			
Patente/ Publicación No	Institutos de investigación	Título	Area de enfoque
GB2461915A	University of Oxford	Utility meter	Método de medición del uso de la utilidad de un medidor con un procesador que analiza los valores recibidos que representan el uso de una utilidad, para determinar la información sobre el uso de otra utilidad

Fuente: <http://www.patent-art.com/AssigneeWisew11.html> [89]

En la Tabla 5 se indica el área de enfoque de las empresas que tienen más patentes relacionadas con los sistemas de medición inteligente. Los enfoques están relacionados con todos los procesos de medición inteligente como fabricación del medidor, medición de variables eléctricas, monitorización, comunicación y almacenamiento de datos, entre otros.

Tabla 6. Enfoque de la tecnología.

Enfoque de la tecnología	
Empresa	Area de enfoque
Itron Inc	Tipo de comunicación, visualización, control y monitorización de datos
General Electric	Tipo de comunicación, detección y control de lecturas de los medidores
Cvc Capital Partners Ltd	Tipos de redes y comunicación, configuración de medidores, recolección de datos y medición de energía
Schneider Electric SA	Fabricación de medidores, almacenamiento de datos, monitorización y control de datos
Silver Spring Networks	Tipo de red y su gestión

Fuente: <http://www.patent-art.com/AssigneeWisew11.html> [89]

A continuación se presentan las temáticas relacionadas con la medición inteligente de reciente publicación:

- Vinculación de medidores inteligentes y redes sociales
- Arquitectura inteligente para el control de la congestión del acceso remoto a los medidores de energía eléctrica.
- Construcción de infraestructuras basadas en protocolos web para medidores inteligentes.
- La medición inteligente como un medio para promover el consumo de energías renovables.
- Investigación socio técnicas en sistemas de medición inteligente y desarrollo en sistemas de retroalimentación.

A continuación se nombran algunos productos que ya han sido patentados. Estos han sido desarrollados bajo la visión de los sistemas de medición inteligente:

- CENTRON GPRS Smart Meter
- CENTRON ® C1SC Meter
- CENTRON Polyphase metros
- Tarifa aplicación que utiliza la C100R Smart Meter
- SM150VR + Visual Read (N1.5m³ / h)
- GE kV2c [™] contador polifásico comercial e industrial
- GE I-210 + [™] Medidores
- PRI Metros
- WiMax Solución inteligente del medidor (WiMax basada en MDS 3650 Mercury radio)
- I-210 + c ® SmartMeter
- Solución de medición inteligente
- Medición Automatizada y Sistemas de Información (AMIS)

Estos resultados fueron obtenidos con un rastreador de patentes. El rastreador se llama SciTech, y su utilización permite obtener una visión general de las patentes, tendencias en presentación de patentes, principales empresas e institutos de investigación que aportan al desarrollo de patentes relacionadas con los sistemas de medición inteligente.

5. VENTAJAS, NECESIDADES, PROBLEMAS E IMPACTOS QUE SE PRESENTAN CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.

En este capítulo se presentan las principales ventajas asociadas con el uso de la medición inteligente, así como la necesidad de implementar estos sistemas, y se exponen los principales problemas que se presentan tanto técnicos, como normativos y culturales. También se establecen los impactos que se podrán presentar en el medio ambiente y en la sociedad con el desarrollo y la implementación masiva de esta nueva tecnología.

5.1 VENTAJAS ASOCIADAS AL USO DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN INTELIGENTE.

La infraestructura de medición avanzada, además de traer consigo un gran número de beneficios tanto para sus clientes como para los encargados de suministro de energía eléctrica, proporciona también una serie de ventajas, que hacen que esta tecnología se convierta en una necesidad para toda la sociedad.

Una red inteligente es aquella que integra la generación y suministro de la energía eléctrica con diferentes tecnologías de comunicación con el fin de garantizar una energía eléctrica de calidad al usuario final. Esta red debe cumplir con ciertas características para poder cumplir con su objetivo fundamental. Entre estas características se tienen: La capacidad de suministrar energía eléctrica de calidad, las características de auto curación cuando ocurran diferentes fallas, la integración de fuentes de generación distribuida, la capacidad de enfrentar ataques a la seguridad, entre otras. [39].

Entre las principales ventajas que ofrece AMI se encuentran: la reducción de errores presentados por lecturas humanas, la reducción de los costos operativos de las lecturas, el mejoramiento del servicio al cliente por parte de las empresas, los informes frecuentes, las diferentes tasas de precios, la identificación de anomalías que ocurran en todo el sistema, la facturación más rápida y con menor incertidumbre, la reducción de costos de la interacción cliente-empresa, la reducción de fraudes que se presentan constantemente, un mejor control de la potencia máxima, el almacenamiento de información, la detección de consumos de energía eléctrica no autorizados, el control de diferentes electrodomésticos, la adecuada transmisión de energía, un mejor mantenimiento de la red eléctrica, un adecuado tratamiento de fallas, el control de demanda, el análisis de la calidad de la energía eléctrica, entre otras. [14] [3].

5.2 NECESIDADES PARA SU IMPLEMENTACIÓN.

La medición inteligente se ha convertido en una necesidad y un prerrequisito para lograr una buena competitividad en el mercado de energía eléctrica, ya que permite proporcionar una información fiable a la red y satisfacer las necesidades tanto del lado del cliente como del lado de las empresas que suministran este servicio. Además de esto en muchos países de Europa, ha sido considerada como un medio con el cual se pueden satisfacer necesidades de eficiencia energética establecidas en algunos protocolos y normas directivas como el protocolo de Kioto.

En medición inteligente se habla que a pesar de que su implementación se da debido a la gran cantidad de ventajas que ofrece, los principales motores para su implementación son la gran necesidad de reducir costos (hasta un 50% en los precios del mercado, si la demanda se reduce tan solo en un

5% en horas pico), y la disminución de la utilización completa del sistema cuando no sea necesario. Además de estos existen otros factores que hacen necesario la implementación de los medidores inteligentes como la mejora en las operaciones, la calidad del servicio, la eficiencia energética, la reducción del calentamiento global y de las emisiones de CO₂, la expansión moderada de la red eléctrica, entre otros.

Los cuatro entes más importantes de un sistema de medición inteligente se describen a continuación y se da un breve resumen de sus necesidades y de los beneficios que ofrece la implementación de este sistema.

1. Operadores de red: Los medidores inteligentes generan un gran impacto sobre la forma de gestionar y operar la red eléctrica. Estos medidores deben proporcionar la información adecuada para que ellos puedan cumplir eficientemente con las funciones en el negocio del mercado de la energía eléctrica. Además se les permite tener una visión de todos los consumidores para que puedan tomar decisiones y puedan mejorar sus operaciones para brindar un mejor servicio.
2. Proveedores de energía: la implementación de medidores inteligentes es necesaria para la introducción de nuevos servicios. Los proveedores podrán sensibilizar a sus consumidores sobre el consumo de la energía eléctrica y sobre el ahorro de energía. Además de esto ellos podrán brindar múltiples beneficios como ofrecer energía eléctrica prepago, entre otros.
3. Entidades encargadas de asuntos económicos del país: Son entidades que se encargan de regular asuntos económicos como la energía eléctrica, el gas combustible, las exportaciones, las importaciones, etc. La conducción de estas empresas se debe realizar de una manera

técnica, independiente y transparente, promoviendo el desarrollo sostenido de los diferentes sectores económicos, regulando los monopolios, incentivando la competencia donde sea posible y atendiendo oportunamente las necesidades de los usuarios y las empresas. Estas entidades se deben basar en políticas de responsabilidad y transparencia. En los sistemas de energía eléctrica son los encargados de abrir los mercados de energía y de numerosos aspectos del mercado económico, para los cuales la información de los medidores inteligentes es fundamental para tomar sus decisiones.

4. Consumidores: Gente consciente de la necesidad de medición inteligente para mejorar su comportamiento con el consumo de energía eléctrica y realizar una adecuada gestión de la energía que requiere para satisfacer sus necesidades. [43] [47].

5.3 PROBLEMAS CON LOS MEDIDORES INTELIGENTES.

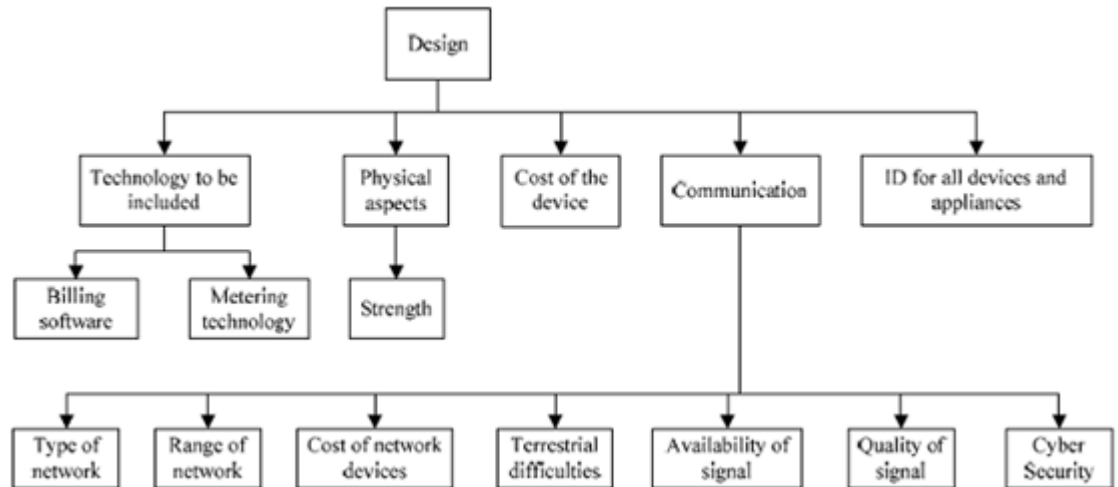
Al igual que con la incorporación que cualquier nuevo producto, la integración de los medidores inteligentes presenta inconvenientes del tipo técnico, normativo y cultural. Todos estos tipos de problemas deben ser considerados de manera adecuada para lograr el éxito en la implantación del nuevo producto o servicio.

Problemas técnicos relacionados con los medidores inteligentes

Este tipo de inconvenientes afecta directamente la operación eficaz de un sistema de medición inteligente, ya que involucra situaciones como la interoperabilidad entre los medidores como: La poca de capacidad de las redes de comunicación, la mala calidad de software, las posibles brechas

de seguridad entorno a los datos transmitidos, la inyección de armónicos, la presencia de congestión de las redes eléctricas, el fraude, las limitaciones en la cobertura, los daños físicos en los cables de comunicación, entre otros. Estas situaciones deben ser corregidas de manera adecuada para lograr un funcionamiento óptimo de la infraestructura de medición inteligente [48] [14]. En la figura 31 se muestran algunos problemas técnicos relacionados con el diseño de un sistema de medición inteligente.

Figura 31. Problemas de diseño en un sistema de medición inteligente.



Fuente: “Smart Meters for Power Grid – Challenges, Issues, Advantages and Status” Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru; Lingfeng Wang; Vijay Devabhaktuni; Nikhil Gudi. [14]

Problemas normativos relacionados con los medidores inteligentes.

La disposición de normas nacionales e internacionales impulsará campañas para la implantación masiva de medidores inteligentes, ya que permitirían

facilitar los recursos necesarios para un mayor despliegue de infraestructuras de medición avanzada (AMI) alrededor del mundo. Desafortunadamente actualmente no se cuenta con la regulación suficiente, con la estandarización adecuada y con la disposición política necesaria para llevar a cabo la implantación masiva de esta tecnología [43].

Problemas culturales relacionados con los medidores.

Este tipo de inconvenientes está más directamente relacionado con los usuarios del sistema de energía eléctrica, ya que deben soportar el periodo de transición del sector eléctrico y los cambios que este periodo representa. Los nuevos servicios que ingresan gracias a la implementación de una plataforma de medición inteligente, como lo son la lectura remota de los medidores, la visualización del consumo de energía eléctrica en tiempo real, los esquemas de precios variables, el corte del servicio de energía a distancia, empleo de nuevas formas para la cancelación de facturas, entre otros, no siempre son bien recibidos entre los usuarios finales, lo que finalmente se convierte en un problema que se debe resolver para lograr la correcta implementación de la nueva plataforma de medición. Es normal que inconvenientes de este tipo se presenten, ya que cambios en las costumbres comunes de las personas normalmente toman periodos de tiempo apreciables, para lo cual es de vital importancia la implementación de programas de capacitación que ayuden a suavizar el impacto de proyectos de este tipo.

Adicionalmente se han presentado múltiples quejas sobre posibles efectos que generan los medidores de energía inteligentes en la salud de las personas. Estudios realizados al respecto, indican que las bandas de frecuencia utilizadas para la comunicación de los medidores cumplen con

las restricciones planteadas y por tanto no deben causar ningún tipo de efectos sobre la población [24]. Temas como estos aún se encuentran en debate y probablemente el tiempo se encargara de resolverlos.

5.4 IMPACTOS.

Entre los principales impactos que se tienen al introducir los contadores inteligentes, se pueden apreciar dos grandes grupos que son: los impactos relacionados con el medio ambiente y los impactos relacionados con el ser humano.

A continuación se nombran algunos de los impactos más importantes que se dan con el desarrollo de las nuevas tecnologías de medición de las redes inteligentes.

Un punto importante en los posibles impactos que puede tener la medición inteligente es el nivel de los campos electromagnéticos que pueden emitir. Estos niveles se deben más que todo a la parte de las comunicaciones del medidor inteligente. En cualquier medidor inteligente se producen emisiones electromagnéticas. Existen emisiones intencionales y no intencionales, siendo las intencionales las producidas al momento de transmitir los datos por diferentes tecnologías de comunicación. [24].

Por otra parte, con la implementación de los medidores inteligentes se desea aumentar la conciencia sobre el cambio climático. El impacto de estos medidores, se dará principalmente en la protección del medio ambiente con la reducción de emisiones de carbono y otros gases para poder impulsar la eficiencia energética y evitar el calentamiento global que

tanto está afectando y causando estragos en distintas partes de nuestro planeta [7].

Con respecto a los impactos del cliente, lo que se busca es muchos desarrollos de proyectos, es que ellos gocen de diferentes beneficios que se pueden obtener con la tecnología y así puedan adquirir una actitud positiva hacia la implementación de la medición inteligente. Entre estos beneficios que se toman para poder impactar positivamente a los clientes, se encuentran: los ahorros en el uso de la energía, la confianza en los datos medidos, la comprensión de la utilidad de los servicios, las estrategias y diferentes opciones de precios, la comunicación de dos vías con las empresas de suministro, más funciones para usuarios comerciales e industriales, diferenciación de productos entre otros [49].

6. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo se realiza una síntesis del trabajo de grado, resaltando las conclusiones más relevantes así como algunas observaciones y recomendaciones sobre futuros trabajos en esta línea.

Síntesis del proyecto, Smart Metering: estado del arte de aplicaciones al sector eléctrico.

En este documento se ha presentado una revisión del estado del arte sobre aplicaciones de la medición inteligente en el sector eléctrico.

Este trabajo de investigación fue elaborado basado en un proceso de selección y clasificación de un gran número de publicaciones de acuerdo a su importancia en este campo de la Ingeniería Eléctrica. Este proceso de selección como ya se mencionó antes, se realizó a través de la base de datos de la IEEE bajo el parámetro de búsqueda “Smart Metering”. Con este parámetro, se obtuvo una muestra de 150 artículos relacionados con el campo de la medición inteligente, los cuales fueron analizados uno a uno con el objetivo de poder clasificar la información obtenida y descartar aquellos artículos que no tenían mayor importancia. Al final el número de referencias que contenían la información a tratar fueron 82, las cuales se detallan en la bibliografía.

El documento recopila la información más sobresaliente sobre los desarrollos tecnológicos, patentes, artículos e implementaciones existentes en esta temática junto con una serie de proyectos llevados a cabo por empresas, centro de investigación y entidades gubernamentales, para que puedan servir como herramienta a quien desee profundizar en el avance de estas nuevas tecnologías de medición inteligente y sirva de guía en el desarrollo de proyectos de aplicación de medición inteligente de variables eléctricas.

En este trabajo de grado, se describe la medición actual de energía eléctrica y el desarrollo de nuevas tecnologías en este campo. Se realiza una comparación entre estos sistemas de medición, con el fin de comprender la necesidad que existe en la evolución de la medición de variables eléctricas. También se enfatiza que la medición inteligente está avanzando rápidamente, para lo cual se presentan los avances existentes en el estudio de estas nuevas tecnologías de medición, su forma de funcionar, sus principales componentes, sus campos de aplicación y por su puesto sus ventajas y desventajas tanto para los usuarios como para los encargados del suministro de la energía eléctrica.

Igualmente, se identifican los diferentes protocolos de comunicación y se resalta que estos, son componentes fundamentales para que la medición inteligente sea un proceso exitoso. Aquí se nombran y se habla de muchos protocolos de comunicación pero finalmente se destacan los más importantes y los que han permitido tener éxito en diferentes proyectos desarrollados a nivel mundial.

Por otra parte, luego de analizar la forma de comercializar energía eléctrica con medidores inteligentes, resulta de interés el estudio tanto de la seguridad, como de la calidad de energía eléctrica. Estos se reconocen como principales factores que pueden llegar a afectar la comercialización de la energía eléctrica si no se les da la importancia que requieren.

Así mismo, se resalta la necesidad de establecer parámetros y estándares con el fin de encaminar de manera adecuada el desarrollo y la implementación de estas nuevas tecnologías de medición, para lo cual se revisó la normatividad establecida en diferentes partes del mundo, con el fin de definir una estructura conveniente para lograr adecuadas implementaciones de la red inteligente que requieren los distintos usuarios del sector eléctricos junto con sus respectivas fuentes de suministro.

Finalmente, se incluyeron proyectos y trabajos que se han desarrollado o se están desarrollando a nivel mundial, con el fin de mostrar sus avances o resultados, los

cuales permiten mostrar que la medición inteligente se ha convertido en una necesidad para satisfacer a todas las personas, pues no existe quien no se beneficie o goce de alguna manera del servicio de energía eléctrica.

Objetivos alcanzados.

A través del desarrollo del trabajo de grado se pudo observar que se cumplieron a cabalidad con cada uno de los objetivos propuestos en la descripción del proyecto, presentados a continuación.

- **Realizar un estado del arte de los desarrollos tecnológicos, patentes, artículos e implementaciones existentes, llevadas a cabo en el sector eléctrico en los campos de medición y facturación basados en la medición inteligente.**

Se desarrolló el estado del arte como se había planteado ya que se buscó, se clasificó, se analizó y se plasmó la información concerniente a los diferentes desarrollos tecnológicos, a las patentes, a las implementaciones y los artículos existentes, desarrollados entorno a los sistemas de medición inteligente de energía eléctrica.

- **Revisar un mínimo de cinco (5) proyectos piloto llevados a cabo por empresas, centros de investigación, entidades gubernamentales o demás entes involucrados en el desarrollo de la medición inteligente a nivel mundial.**

Se analizaron más de 5 proyectos pilotos realizados a nivel mundial por diferentes entidades, permitiendo establecer el estado de cada uno y su importancia en la evolución de la medición inteligente de energía eléctrica.

- **Establecer las mejoras en el proceso de facturación, a partir de cambios en los modelos de medición y recolección de datos.**

Se muestra que es posible por medio de la implementación de una infraestructura de medición avanzada (AMI), lograr notables mejoras en todo el proceso de comercialización de la energía eléctrica, entre los cuales se encuentran facturación, medición de variables eléctricas, y recolección y procesamiento de datos.

- **Indagar sobre los principales protocolos de comunicación, utilizados en el envío y recepción de datos para la implementación de Smart Metering en los sistemas de distribución.**

Se presenta una breve descripción en donde se resaltan los protocolos más utilizados en la comunicación como pieza fundamental para permitir la correcta implantación de una plataforma de medición avanzada (AMI).

- **Comparar la tecnología actual y las nuevas tecnologías AMI y AMR a fin de dar criterios para seleccionar la mejor opción con miras a la automatización en los sistemas de distribución.**

Se han dado importantes avances, sobre la evolución de la forma de medición de variables eléctricas, dejando ver que existe una necesidad de implementación de

nuevas tecnologías de medición que permitan ofrecen múltiples beneficios a todos los que intervienen en el proceso de comercialización de energía eléctrica.

De forma general y luego de obtener los resultados se concluye, que realizar un estado del arte de los diferentes desarrollos tecnológicos, patentes, artículos e implementaciones existentes, llevadas a cabo en el sector eléctrico sobre medición inteligente de variables eléctricas, es de vital importancia ya que permite establecer bases para realizar proyecto futuros en este campo.

Observaciones y recomendaciones

Para futuros desarrollos en sistemas de medición inteligente se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

Se recomienda desarrollar el software o hardware de medición inteligente bajo los lineamientos de OMS (Open Metering System), ya que de esta manera se garantiza la interoperabilidad en sistemas de medición inteligente desarrollados por diferentes empresas.

Los desarrollos de seguridad a nivel de comunicación, medición, o hardware del medidor, se deben abordar desde las fases iniciales del proyecto. De esta manera se disminuye la probabilidad de fallas en la seguridad de los sistemas de medición inteligente desarrollados.

Ante una implementación de proyectos de otros países o regiones, es vital analizar los cambios sociales y culturales, para llevar a buen término la implementación de un sistema de medición inteligente.

Es importante ante el desarrollo e implementación de un sistema de medición inteligente de energía eléctrica, que se tengan en cuenta el costo del proyecto y los ahorros del mismo. Intentando encontrar un punto de equilibrio, para no invertir

demasiado dinero en sistemas que no se van a usar en su totalidad o para no tener desarrollos que no representen un impacto significativo, con respecto al sistema de energía eléctrica actual.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Ahmad S. "Smart Metering and Home Automation Solutions for the Next Decade". Secure Meters Ltd., India. Abril 2011.
- [2] Lee, P.K.; Lai, L.L. "A Practical Approach of Smart Metering in Remote Monitoring of Renewable Energy Applications". Power peg NSI Limited, Hong Kong. Energy Systems Group, City University London, United Kingdom. Julio 2009.
- [3] Derbel F. "Trends in Smart Metering". Qundis Advanced Measuring Solutions, Germany. Marzo 2009.
- [4] Bruno, S, Member, IEEE; Lamonaca, S. Student Member, IEEE; La Scala, M, Fellow, IEEE; Rotondo, G, Student Member, IEEE; Stecchi, U, Student Member, IEEE "Load Control Through Smart Metering on Distribution Networks," Paper accepted for presentation at 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania. Junio 2009.
- [5] Long Zhou; Fang-Yuan Xu; Ying-Nan Ma "Impact of Smart Metering on Energy Efficiency". Energy System Group, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, EC1V 0HB, UK. Julio 2010.
- [6] Fang Yuan Xu. Long Zhou; Yi Lin Wu; Yingnan Ma "Standards, Policies and Case Studies in Smart Metering". IEEE Student Members. Julio 2010.
- [7] Rahman, M.M; Mto A "Technologies required for efficient operation of a smart meter network". School of Engineering and Built Environment,

Faculty of Sciences, Engineering and Health, CQ University, Rockhampton, Qld 4702, Australia. Junio 2011.

[8] Tse, Norman C.F.; Chan, John Y.C.; Lai, LL "Development of a Smart Metering Scheme for Building Smart Grid System". City University of Hong Kong, HKSAR, China. City University London, UK. 2009.

[9] Tse, N.C.F; Lau, W.H; Chan, .Y.C. "ZigBee based smart metering network for monitoring building integrated electric vehicle charging circuits". Members IEEE. Julio 2010.

[10] Bai Xiao-min; Meng Jun-xia; Zhu Ning-hui "Functional Analysis of Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid". Electric Power Research Institute CEPRI, Beijing, China. Octubre 2010.

[11] Selvam, C; Srinivas, K.; Ayyappan, G.S.; VenkatachalaSarma, M. "Advanced Metering Infrastructure for Smart Grid Applications". Central Scientific Instruments Organization CSIR Madras Complex, Chennai, Tamilnadu, India. Abril 2012.

[12] Suslov, K.V.; Solonina, N.N.; Smirnov, A.S. "Smart Meters For Distributed Filtering Of High Harmonics In Smart Grid". Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia. Mayo 2011.

[13] Chen Hong ; Zhu Feifei ; Jin Hong ; Zhu Ping. "Design of the Two-way Smart Meter Based on Industrial Ethernet ". College of Energy and Power Engineering, Yangzhou University Yang Zhou, China. Beichen Electric Company Limited Yang Zhou, China. Septiembre 2011.

[14] Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru; Lingfeng Wang; Vijay Devabhaktuni; Nikhil Gudi "Smart Meters for Power Grid – Challenges, Issues, Advantages and Status" Noviembre 2011.

[15] Vukmirovic, S.; Erdeljan, A.; Kulic, F.; Lukovic, S. "Software Architecture for Smart Metering systems with Virtual Power Plant". Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia. Faculty of Informatics – AlaRI, University of Lugano, Lugano, Switzerland Abril 2010.

[16] Pashdar, A.; Mirzakhaki, S. "A Solution to Remote Detecting of Illegal Electricity Usage Based on Smart Metering". Industrial and Science University of Iran. Agosto 2007.

[17] Vijayananda, W.M.T.; Samarakoon, K.; Ekanayake, J. "Development of a Demonstration Rig for Providing Primary Frequency Response through Smart Meters". Ceylon Electricity Board, Sri Lanka. Ceylon Electricity Board, Sri Lanka. Agosto 2010.

[18] Pashdar, A.; Mirzakhaki, S. "Three Phase Power Line Balancing Based on Smart Energy Meters". Iran University of Science and Technology. Mayo 2009.

[19] Ling Zou; Sihong Chu; Biao Guo. "The Design of Prepayment Polyphase Smart Electricity Meter System". Electric and Electronic Engineering College, Hubei University of Technology Wuhan, China. Octubre 2010.

[20] Lee, P.K.; Lai, L.L. "Smart Metering in Micro-Grid Applications". Powerpeg NSI Limited, Hong Kong. Energy Systems Group, City University London, United Kingdom. Julio 2009.

[21] Macfarlane, B., Marchment Hill Consulting Melbourne, Australia; Cox, J., Marchment Hill Consulting Central, Hong Kong "Enhancing the Smart Metering Business Case with Water" Noviembre 2009.

[22] Deconinck, G. ; Delvaux, B. ; De Craemer, K. ; ZhifengQiu ; Belmans, R. "Smart meters from the angles of consumer protection and public service obligations".K.U.Leuven, ESAT-ELECTA, Kasteelpark Arenberg 10 bus 2445, 3001 Leuven, Belgium. Septiembre 2011.

[23] Tewolde, M.; Fritch, J.C.; Longtin, J.P. "High-Resolution Meter Reading Technique for Appliance Gas Usage Monitoring for the Smart Grid". Department of Mechanical Engineering. Stony Brook University. Stony Brook, NY 11790. Noviembre 2011.

[24] Tyndall, M.; Marshall, R.; Armstrong, E.K.; Marshman, C. "Potential EMC Implementation problems of Smart Metering, Display and Communications". York EMC Services Ltd, York, UK. Richard Marshall Limited. ACGI Cherry Clough Consultants Ltd. Diciembre 2011.

[25] Hongfei Li.; Dongping Fang. ; Mahatma, S.; Hampapur, A. "Usage Analysis for Smart Meter Management". IBM T. J. Watson Research Center Yorktown Heights, NY, USA, 10598. Noviembre 2011.

[26] Livgard, E.F. "Electricity Customers' Attitudes towards Smart Metering".TNS Gallup Norway. Julio 2010.

[27] Benyoucef, D.; Klein, P.; Bier, T. "Smart Meter with Non-Intrusive Load Monitoring for Use in Smart Homes". Hochschule Furtwangen. Diciembre 2010.

[28] Kalogridis, G.; Zhong Fan; Basutkar, S. "Affordable privacy for home smartmeters". Toshiba Research Europe Limited. Telecommunications Research Laboratory, 32 Queen Square, Bristol, BS1 4ND, UK. University of Bristol, Electrical and Electronic Engineering Department, MVB, Bristol, BS8 1UB, UK. Mayo 2011.

[29] Rajagopalan, S.R.; Sankar, L.; Mohajer, S.; Poor, H.V. "Smart meter Privacy: A Utility-Privacy Framework". Dept. of Electrical Engineering, Princeton University, Princeton, NJ 08544. Octubre 2011.

[30] Kadurek, P., Student member, IEEE; J.Blom, Cobben, J.F.G.; Kling, W.L. Member, IEEE. "Theft detection and smart metering practices and expectations in the Netherlands". Octubre 2011.

[31] Deb, S.; Bhowmik, P.K. ; Paul, A. "Remote Detection of Illegal Electricity Usage Employing Smart Energy Meter—A Current Based Technique ".Dept. of Electrical Engg National Institute of Technology,Silchar Assam,Pin: 788010 INDIA Diciembre 2011.

[32] Al Abdulkarim, L.; Lukszo, Z "Information Security Assurance in Critical Infrastructures: Smart Metering Case ". Members IEEE. Noviembre 2008.

[33] Sendin, A.; Guerrero, R.; Angueira, P., Senior Member IEEE. "Signal Injection Strategies for Smart Metering Network Deployment in Multitransformer Secondary Substations". Octubre 2011.

[34] Sitong Wang. ; Ranran Luo; Hui Zhou; Jie Su ; Xiaolei Zhu "Research on Reliability Enhancement Testing for Single-phase Smart Meter " North China Grid Co. Ltd. Center of Metrology. Beijing, China. North China Electric Power University. Baoding, Heibei, China.Norte de China Septiembre 2011.

[35] Andrey, E.; Morelli, J. "Design of a Smart Meter Techno-Economic Model for Electric Utilities in Ontario". Department of Physics, Engineering Physics and Astronomy Queen's University Kingston, Ontario, K7L 3N6. Agosto 2010.

[36] McKinstry, G.; Galloway, S.; Kocar, I. "An Initial Assessment of the Potential Impact of Smart Metering on a Decentralised Energy Network." University of Strathclyde. Septiembre 2010.

[37] Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru; Lingfeng Wang; Vijay Devabhaktuni; Nikhil Gudi "Smart Meters for Power Grid – Challenges, Issues, Advantages and Status" Noviembre 2011.

[38] LibiaoQiao; Xiaojun Liu; Baochen Jiang "Design and Implementation of the Smart Meter in Vehicle-to-Grid". School of Mechanical, Electrical & Information Engineering Shandong University at Weihai. Weihai 264209, P. R. China. Julio 2011.

[39] Kaplantzis, Sophia. ; Sekercioglu, Y. Ahmet "Security and Smart Metering". Department of Electrical and Computer Systems Engineering Monash University, Clayton 3800, Australia. Abril 2012.

[40] Arian, M.; Ameli, M.; Soleimani.; Ghazalizabath, S. "Intelligent Migration from Smart Metering to Smart Grid" Smart Metering Department Sherkate Kontorsazie Iran (SKI Co.) Tehran, Iran. Islamic Azad University, Karaj Branch Karaj, Iran Septiembre 2011.

[41] Zhang Luhua; Yi Zhonglin; Wang Sitong ; Yuan Ruiming ; Zhou Hui ; Yin Qingduo "Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on Relations of

Power Supply and Application in Smart Grid".North China Grid Company Limited Metering Centre Beijing 100045. Septiembre 2010.

[42] Bassilious, V.; Ozveren, C.S.; Birch, A.P. "Using Smart Metering for Load Aggregation: Towards an Integrated Smart Grid/Active Network Management Framework". University of Abertay, Dundee, UK. Birchwood Power, Perth, UK. Septiembre 2011.

[43] Alabdulkarim, L.O.; Lukszo, Z., Member,IEEE "Smart Metering for the Future Energy Systems in the Netherlands" Marzo 2009.

[44] Mak, S.T. "A Synergistic Approach to Implement Demand Response, Asset Management and Service Reliability Using Smart Metering, AMI and MDM Systems." IEEE. Julio 2009.

[45] Vukmirovic, S.; Erdeljan, A.; Kulic, F.; Lukovic, S. "A Smart Metering Architecture as a step towards Smart Grid realization". Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia. Faculty of Informatics – AlaRI, University of Lugano, Lugano, Switzerland. Diciembre 2010.

[46] De Capua, C.; Romeo, E. "A Smart THD Meter Performing an Original Uncertainty Evaluation Procedure". University Mediterranea of Reggio Calabria, Department of Computer Science and Electrical Technology. Agosto, 2007.

[47] Rusitschka, S.; Gerdes, C.; Eger, K. "A Low-cost Alternative to Smart Metering Infrastructure Based on Peer-to-Peer Technologies". Siemens AG, Corporate Technology, Information and Communications. Germany, Munich. Mayo 2009.

[48] Benzi, F.; Anglani, N.; Bassi, E.; Frosini, L. "Electricity Smart Meters Interfacing the Households". University of Pavia, Department of Electrical Engineering. Italy, Pavia. Octubre, 2011.

[49] Livgard, E.F. "Norwegian Electricity Customers' Attitudes Towards Smart Metering". TNS Gallup Norway. Julio 2010.

[50] Protocolos de comunicación. En línea. Disponible: <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Smart%20grid%20-%20Jaime%20Boal.pdf>, consultado el 22 de Enero de 2013.

[51] Protocolos de comunicación. En línea. Disponible: <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Smart%20grid%20-%20Jaime%20Boal.pdf>, consultado el 22 de Enero de 2013.

[52] Shang-Wen Luan. ; Jen-HaoTeng. ; Shun-Yu Chan; Lain-Chyr Hwang. "Development of a Smart Power Meter for AMI Based on ZigBee Communication". I-Shou University, Cheng-Shiu University. Taiwan, Kaohsiung. Noviembre 2009.

[53] Lewis, R.P.; Igic, P.; Zhongfu Zhou. "Assessment of Communication Methods for Smart Electricity Metering in the U.K.". Swansea University. United Kingdom, Wales. Septiembre 2009.

[54] Deconinck, G.; Decroix, B. "Smart Metering Tariff Schemes Combined with Distributed Energy Resources". K.U. Leuven, ESAT/ELECTA. Belgium. Marzo 2009.

[55] Livgard, E.F. "Smart Metering Opportunity or Threat to the Power Industry?" TNS Gallup Norway. Octubre 2010.

[56] Khan, T.H. ; Paul, T.K. ; Shahabuddin, G.M. ; Wahid, K. ; Chowdhury, A.H. ; Kabir, S.M.L. "Towards Design of a Smart Prepaid Gas Metering System" Diciembre 2009.

[57] Kiani, A.; Annaswamy, A. "The effect of a smart meter on congestion and stability in a power market". 49th IEEE Conference on Decision and Control. USA, Atlanta. Diciembre 2010.

[58] AlAbdulkaarim, L.O.; Lukszo, Z. "Information Security Implementation Difficulties in Critical Infrastructures: Smart Metering Case". Delft University of Technology, Faculty of Technology, Policy and Management. Netherlands. Abril 2010.

[59] Efthymiou, C.; Kalogridis, G. "Smart Grid Privacy via Anonymization of Smart Metering Data". Toshiba Research Europe Ltd, Telecommunications Research Laboratory. United Kingdom, Bristol. Octubre 2010.

[60] Akselrad, D.; Petcu, V. ; Romer, B. ; Schmid, A. ; Bytschkow, D. ; Engelken, M. "Making Home Energy Usage Transparent for Households using Smart Meters". Maximilian Center for Digital Technology and Management (CDTM). Germany, Munich. Septiembre 2011.

[61] Samarakoon, K.; Ekanayake, J.; Jenkins, N. "Investigation of Domestic Load Control to Provide Primary Frequency Response Using Smart Meters". IEEE transactions on smart grid, Vol 3, No 1. Marzo 2012.

[62] Zhifeng Qiu. ; Deconinck, G. "Smart Meter's Feedback and the Potential for Energy Savings in Household Sector: A Survey". International

Conference on Networking, Sensing and Control. Netherlands, Delf. Abril 2011.

[63] Barengi, A.; Bertoni, G.M.; Breveglieri, L.; Fugini, M.G.; Pelosi, G. "Smart Metering in Power Grids: Application Scenarios and Security". Politecnico di Milano, Dipartimento di Electronica e Informazione. Italy, Milan. Noviembre 2011.

[64] Popa, M.; Ciocarlie, H.; Popa, A.S.; Racz, M.B. "Smart Metering for Monitoring Domestic Utilities". Politehnica University, Faculty of Automation and Computers, Faculty of Mechanics. Romania, Timisoara. Mayo 2010.

[65] Prudhvi, P. ; Bhalodi, D. ; Manohar, M. ; Padidela, V. ; Adapa, S. "A Smart Energy Meter Architecture in Indian Context". 2nd Iranian Conference on Smart Grid. NIT Warangal, Department of Engineering Electrical and Electronic. Iran, Tehran. Mayo 2012.

[66] Tae-Seop Choi ; Kyung-RokKo ; Seong-Chang Park ; Young-Sik Jang; Yong-Tae Yoon ; Sang-Kuglm "Analysis of Energy Savings using Smart Metering System and IHD (In-Home Display)". Seoul National University and LS Industrial System Corporation. Korea, Seoul. Octubre 2009.

[67]Bennett, C.; Wicker, S.B. "Decreased Time Delay and Security Enhancement Recommendations for AMI Smart Meter Networks". Cornell University, Department of Electrical and Computer Engineering. USA, New York. Enero 2010.

[68] Kulatunga, N.A.; Loetscher, R.; Kuruppu, S. "Smart Meter Based Tools to Enhance Feedback Oriented DSM with Time of Use Rates". Landis+Gyr

and Purdue University, Department of Electrical and Computer Engineering Technology. USA, West Lafayette. Octubre 2010.

[69] Davies, R. "Hydro One's Smart Meter Initiative Paves Way for Defining the Smart Grid of the Future". Hydro One Networks Inc. Canada, Ontario. Julio 2009.

[70] Dissanayaka, D.M.L.B.; Fernando, C.T.J.; Abeyratne, S.G. "Smart Meter Based Inverter Controlling Network for Demand Response Applications in Smart Grids". 2011 6th International Conference on Industrial and Information System, ICCIIS. Sri Lanka. Agosto 2011.

[71] ShouchaoFeng; Ling Zhu; Zhenbo Liu. "The Zero Line Current Transformer in Smart Meter". International Conference on Computer Science and Electronics Engineering. North China Electric Power University, College of Electrical and Electronic Engineering. Northeast Electric Power Research Institute Co Ltd, Department of Metering. China, Baoding, Shenyang. Marzo 2012.

[72] Seunghyun Park; Hanjoo Kim; Hichan Moon; Jun Heo; Sungroh Yoon "Concurrent Simulation Platform for Energy-Aware Smart Metering Systems". IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol 56, No 3. National Research Foundation of Korea, Korea University. Korea, Seoul. Agosto 2010.

[73] Sungwook Kim; Eun Young Kwon; Myungsun Kim; Jung HeeCheon; Seong-ho Ju; Yong-hoon Lim ; Moon-seok Choi. "A Secure Smart-metering Protocol over Power-Line Communication". IEEE Transactions on power delivery, vol 26, No 4. Octubre 2011.

[74] El futuro de las Smart Grid en España. En línea. Disponible: http://energyforenergy.blogspot.com/2012/11/normal-0-21-false-false-false-es-trad-x_27.html, consultado el 28 de Enero de 2013.

[75] Unidad de Planeación Minero Energética UPME. "Proyección de Demanda de Energía Eléctrica y Potencia." En línea. Disponible: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyecci%C3%B3n_demanda_ee_mar_2008.pdf.

[76] Cajita mágica para el robo de energía eléctrica. En línea. Disponible: <http://www.unchindeto.com/cajita-mgica-para-el-robo-de-energia-electrica.html>, consultado el 28 de Enero de 2013.

[77] G. Vidrio, "Infraestructura de medición avanzada (AMI), en las redes inteligentes", Instituto de Investigaciones Eléctricas, México. Julio de 2011.

[78] R. Van Gerwen, S. Jaarsma, R. Wilhite, "Smart Metering", Distributed Generation, July 2006.

[79] K. De Craemer, G. Deconinck, "Analysis of State-of-the-art Smart Metering Communication Standards". 2010.

[80] Telelectura de medidores de energía con tecnologías AMR y AMI, <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=124>. Fuentes: *Siemens– Neptune Technology Group – Metering Central América & Caribbean 2007*. Fecha de revisión Febrero 20 de 2012.

[81] R. Cespedes, "Desarrollo de Smart Grids en Colombia". II Taller de fundamentos de Smart Grids en Sistemas Eléctricos. Bogotá D.C Colombia, Julio de 2011.

[82] <http://www.oms-group.org> , consultado el 4 de Febrero de 2013.

[83] http://www.ctecno.cat/wp-content/uploads/2012/03/Hoja-de-Ruta-Smart-Cities_def.pdf, consultado el 11 de Febrero de 2013.

[84] <http://www.ecoticias.com/alimentos/15213/rss.php>, consultado el 11 de Febrero de 2013.

[85] http://www.endesa.com/es/conoceendesa/lineasnegocio/principalesproyectos/Malaga_SmartCity, consultado el 11 de Febrero de 2013.

[86] <http://www.ecointeligencia.com/2011/11/amsterdam-smartcity/>, consultado el 11 de febrero de 2013.

[87] http://www.fomentosansebastian.org/images/stories/sectores_emergentes/energias%20renovables/01AmsterdamSmartCity_Intro_AIM.pdf,

Consultado el 10 de Febrero de 2013.

[88] <http://amsterdamsmartcity.com/projects#themes>, consultado el 14 de Febrero de 2013.

[89] <http://www.patent-art.com/AssigneeWisew11.html>. Consultado el 11 de Febrero del 2013.

[90] <https://www.xm.com.co>, consultado el 18 de junio del 2012.

[91] Coalton Bennett, Steven B. Wicker, “Decreased Time Delay and Security Enhancement Recommendations for AMI Smart Meter Networks”. Department of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, 2010.

[92] <http://docencia.udea.edu.co/bibliotecologia/seminario-estudios-usuario/unidad4/unidad4.html>, Página oficial de la Universidad de Antioquia, Colombia. Página revisada el 15 de octubre del 2012.

[93] Zapata.J, Vidrio.G, Gomez.J, Mijárez.R, “Medición de la energía eléctrica bajo esquemas de libre mercado”. Secretaría de Energía, Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas. Estados Unidos Mexicanos. Enero-Febrero del 2001.

[94] Rottondi.C, Verticale.G, Capone.A, “A Security Framework for Smart Metering with Multiple Data Consumers”. Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano. Milano, Italy. The 1st IEEE INFOCOM Workshop on Communications and Control for Sustainable Energy Systems: Green Networking and Smart Grids. Agosto del 2012.