



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

TEMA:

“ANÁLISIS DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PARA UNA RED DE ÁREA DEL  
HOGAR DE UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE”

AUTOR: JULIO CÉSAR MORA MÉNDEZ

DIRECTOR: MSC. EDGAR DANIEL JARAMILLO VINUEZA

IBARRA – ECUADOR

2019



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

#### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DEL CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	100364636-9		
APELLIDOS Y NOMBRES	Mora Méndez Julio César		
DIRECCIÓN	Ibarra, San Antonio – Calle 27 de Noviembre		
E-MAIL	jcmora@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	062551265	TELÉFONO MÓVIL	0959728501

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	ANÁLISIS DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PARA UNA RED DE ÁREA DEL HOGAR DE UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE
AUTOR	Mora Méndez Julio Cesar
FECHA	16 de Diciembre 2019
PROGRAMA	Pregrado
TÍTULO POR EL QUE SE ASPIRA	Ingeniero en Electrónica y Redes de Comunicación
ASESOR/DIRECTOR	MSc. Edgar Daniel Jaramillo Vinuesa

#### 2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que sume la responsabilidad sobre contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, 16 de diciembre del 2019.

EL AUTOR:



Mora Méndez Julio César

CC. 100364636-9



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y REDES DE COMUNICACIÓN

## CERTIFICACION

MAGISTER EDGAR DANIEL JARAMILLO, DIRECTOR DEL PRESENTA TRABAJO DE TITULACION CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación “ANÁLISIS DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PARA UNA RED DE ÁREA DEL HOGAR DE UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE” fue desarrollado en su totalidad por el Sr. Julio Cesar Mora Méndez, bajo mi supervisión.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor de la verdad

A handwritten signature in blue ink, reading 'Edgar Daniel Jaramillo', is written over a horizontal dotted line. The signature is enclosed within a large, hand-drawn blue oval. Below the signature, the text 'MSc. Edgar Daniel Jaramillo' is printed in a black, sans-serif font.

DIRECTOR DE TESIS

## AGRADECIMIENTO

*Brindo mis sinceros agradecimientos a Dios por darme la vida, fortalecer mi ser espiritual, y darme la inteligencia para poder alcanzar las metas que en su propósito tenga para mi vida, según su voluntad.*

*A mi padre Julio Mora y a mi madre Luz Méndez, por el inculcarme ser una persona de bien, mediante la correcta guía y apoyo en mi vida cotidiana y académica. En especial a mi madrecita que siempre estuvo conmigo en los momentos más difíciles y gracias a su paciencia y lucha constante, supo brindarme siempre su mano para no decaer y seguir hasta culminar mis metas.*

*A mis hermanos Franklin y Galo que a pesar de estar un poco distantes y no compartir gran parte de mi vida, ellos fueron un gran ejemplo a seguir, ellos motivaron mi ser de superación y supieron darme el apoyo moral para seguir adelante.*

*A mis hermanas Sandra y Verito, por estar siempre pendientes de mí en todo momento, dándome el apoyo y sus consejos, los cuales motivaron a seguir adelante.*

*A mi tutor Msc. Edgar Daniel Jaramillo y asesores Msc. Fabián Cuzme y Msc. Vladimir García, que a través de la paciencia y sus conocimientos supieron guiarme adecuadamente en el proyecto de titulación.*

*Julio Cesar.*

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto se lo dedico a mi madre Luz Elvia Méndez, ya que por su gran amor, dedicación, lucha y paciencia supo guiarme por el camino del bien y es el motor que me impulse a seguir adelante en mi vida, a mi padre por tener la visión de sacar a sus hijos adelante en los estudios, a mis hermanos y hermanas por su apoyo incondicional en todo momento.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE .....	I
CERTIFICACION.....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
DEDICATORIA.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VI
INDICES DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
Resumen .....	XII
Abstract.....	XIII
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1. Nombre del Proyecto .....	1
1.2. Descripción del Problema.....	1
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos .....	3
1.4. Alcance .....	3
1.5. Justificación .....	5
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Red Eléctrica Inteligente.....	7

2.1.1.	Conceptos .....	8
2.1.2.	Beneficios de una Red eléctrica inteligente.....	9
2.1.3.	Tecnologías Requeridas.....	11
2.1.4.	Estándares .....	12
2.2.	Sistemas de Comunicación en una Red Eléctrica Inteligente .....	3
2.2.1.	Infraestructura.....	3
2.2.2.	Subredes de comunicación de una Red eléctrica inteligente.....	5
2.2.3.	Arquitectura de una Red de Comunicación .....	8
2.3.	Tecnologías de Comunicación .....	10
2.3.1.	Comunicación mediante tecnología alámbrica:.....	11
2.3.2.	Comunicación mediante tecnología Inalámbrica: .....	12
2.3.3.	Tecnologías utilizadas en diferentes subredes SG.....	14
2.3.4.	Aplicación de Tecnologías en redes WAN, FAN, HAN.....	20
2.4.	Red de Área del Hogar (HAN) .....	23
2.4.1.	Arquitectura y elementos que componen una HAN .....	25
2.4.2.	Protocolos de Comunicación .....	27
2.4.3.	Seguridad .....	28
2.5.	Sistema de Medición inteligente: .....	30
2.5.1.	Principales componentes de la Infraestructura de medición avanzada.....	33
2.5.2.	Variables de medición: .....	34
2.5.3.	Tecnologías de Comunicación en sistemas AMI .....	35
2.6.	Despliegue de Redes Inteligentes .....	38
2.6.1.	América .....	38
2.6.2.	Europa.....	41
2.6.3.	Asia.....	44
2.6.4.	África: .....	46
2.6.5.	Oceanía: .....	47
CAPITULO III .....		49
3.1.	Requerimientos de una red HAN.....	49
3.1.1.	Tecnología.....	49

3.1.2.	Potencia.....	50
3.1.3.	Distancia.....	50
3.1.4.	Latencia.....	50
3.1.5.	Frecuencia de Operación:.....	51
3.1.6.	Confiabilidad:.....	52
3.1.7.	Velocidad de datos:.....	53
3.1.8.	Seguridad:.....	53
3.2.	Protocolos de Comunicación para HAN.....	54
3.3.	Revisión de Protocolos.....	56
3.3.1.	ZigBee.....	56
3.3.2.	WIFI.....	60
3.3.3.	Z-wave.....	63
3.3.4.	Bluetooth.....	67
3.4.	Comparación de Protocolos.....	70
3.5.	Elección de protocolo para HAN.....	74
CAPITULO IV.....		76
4.1.	Formato Mensaje HAN.....	76
4.1.1.	Dato de Identificador de dispositivo.....	77
4.1.2.	Datos de control de encendido y apagado.....	79
4.1.3.	Lectura de la potencia y corriente.....	80
4.2.	El protocolo ZigBee.....	82

4.2.1. Trama de la Capa Física: .....	82
4.2.2. Trama de la Capa MAC:.....	85
4.3. Parámetros para protocolo de comunicación de una HAN.....	88
4.3.1. Protocolo propuesto vs ZigBee: .....	92
4.4. Escenarios de Simulación.....	93
4.4.1. Escenario 1.....	94
4.4.2. Escenario 2.....	96
4.4.3. Escenario 3.....	97
4.4.4. Escenario 4.....	98
Conclusiones.....	99
Recomendaciones.....	101
Glosario de Términos y Acrónimos.....	103
Bibliografía.....	105

## INDICES DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Infraestructura de comunicación para redes eléctricas inteligentes .....	5
<i>Figura 2.</i> Velocidades de transmisión y rango de cobertura para WAN, FAN y NAN. ....	6
<i>Figura 3.</i> Arquitectura multi-capa de una red eléctrica inteligente. ....	9
<i>Figura 4.</i> Arquitectura general de una red eléctrica, b) Arquitectura general de una red de comunicación en Smart Grid. ....	10
<i>Figura 5.</i> Diagrama de tecnologías de Comunicación involucradas en SG. ....	10
<i>Figura 6.</i> Aplicación típica de una WLAN en SG.....	16

<i>Figura 7.</i> Especificaciones técnicas de Bluetooth 3.0 y Bluetooth 4.0.....	17
<i>Figura 8.</i> Red típica WiMax .....	18
<i>Figura 9.</i> Especificaciones técnicas de las tecnologías de la familia 3GPP .....	19
<i>Figura 10.</i> Ejemplo de aplicación de tecnologías en una red inteligente. ....	23
<i>Figura 11.</i> Arquitectura general de una HAN y sus elementos. ....	27
<i>Figura 12.</i> Componentes Sistemas AMI.....	34
<i>Figura 13.</i> Diagrama Red PLC Simplificada.....	36
<i>Figura 14.</i> Sistema RF de Largo Alcance en SG.....	37
<i>Figura 15.</i> Sistema RF Mesh en una AMI.....	38
<i>Figura 16.</i> Protocolos de comunicación en ambiente HAN .....	55
<i>Figura 17.</i> Arquitectura típica de Zigbee master-esclavo.....	57
<i>Figura 18.</i> Arquitectura de protocolo ZiggBee.....	58
<i>Figura 19.</i> Capa Física Protocolo ZigBee.....	59
<i>Figura 20.</i> Arquitectura Wi-Fi - pila de protocolo .....	61
<i>Figura 21.</i> Arquitectura de Z-Wave.....	64
<i>Figura 22.</i> Tramas de datos Z-Wave en las 3 Capas .....	66
<i>Figura 23.</i> Arquitectura de capas de Bluetooth .....	68
<i>Figura 24.</i> Representación de nomenclatura de ID dispositivo a binario.....	78
<i>Figura 25.</i> Datos de control .....	79
<i>Figura 26.</i> Datos de potencia en binario .....	81
<i>Figura 27.</i> Datos de corriente en binario .....	81
<i>Figura 28.</i> Mensaje de aplicaciones en HAN .....	82
<i>Figura 29.</i> Encabezado de la trama física.....	83

<i>Figura 30.</i> Trama de la Capa Física.....	84
<i>Figura 31.</i> Trama de la capa MAC .....	86
<i>Figura 32.</i> Control de trama.....	86
<i>Figura 33.</i> Trama de datos del nuevo protocolo de comunicación.....	91
<i>Figura 34.</i> Referencia de escenario propuesto (OPNET) .....	95
<i>Figura 35.</i> Referencia de escenario propuesto (OPNET) .....	97

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aplicación de tecnologías de comunicación en subredes WAN, FAN, HAN. ....	22
Tabla 2 Tecnologías aplicadas para medidores inteligentes en varios países de Europa.....	44
Tabla 3 Requisitos de latencia para aplicaciones smart grid.....	51
Tabla 4 Resumen de Requerimientos de una HAN.....	54
Tabla 5 Cuadro comparativo de protocolos de comunicación inalámbrica .....	73
Tabla 6 Validación de protocolo de comunicación.....	74
Tabla 7 Nomenclatura para datos de identificador de dispositivos.....	78
Tabla 8 Valores de tamaño de trama.....	84
Tabla 9 Cuadro comparativo de Simuladores de Red.....	94

## Resumen

La presente tesis se orienta al estudio de protocolos de comunicaciones para usarse en una red de área del hogar (HAN), a través del modelo de investigación bibliográfica exploratoria del mercado de las tecnologías inalámbricas usadas en redes eléctricas inteligentes, con el propósito de encontrar un protocolo adecuado que se ajuste a las necesidades de una red del hogar. Esta investigación toma como fuente primaria, artículos científicos publicados en IEEE y por otro lado, fuentes de libros, documentos publicados por entidades gubernamentales, y artículos de organizaciones involucradas con las redes eléctricas inteligentes. Aborda fundamentación teórica y despliegue de tecnología Smart Grid, luego se establecen un estudio de protocolos para identificar y definir un protocolo de comunicación que más se ajuste a las redes de área del hogar y finalmente se estable los parámetros del protocolo que se adapte en sistemas o aplicaciones destinadas a redes de área del hogar. De acuerdo al estudio realizado se toman parámetros más destacables para la propuesta de un nuevo protocolo de comunicación, que permita comunicar los dispositivos y electrodomésticos inteligentes del hogar, mediante el establecimiento del mensaje a ser transmitido, parámetros de sincronización de la trama, campos de direccionamiento, seguridad, habilitación de ACK, comprobación de errores e información útil, concluyendo que dicha trama es la que más se ajusta a las necesidades de una aplicación HAN, pero para efectos de aplicabilidad en ambientes reales conllevaría altos costos, por cuanto es necesario del desarrollo del protocolo de comunicación, por lo que se estableció escenarios de simulación con el fin de que en un futuro, poder analizar cada uno de los parámetros establecidos en ésta tesis para el establecimiento de un protocolo de comunicación más robusto y su posterior desarrollo e implementación en un ambiente HAN real.

*Palabras Clave:* Redes eléctricas inteligentes, protocolos, aplicaciones del hogar, zigbee.

### **Abstract**

This thesis is aimed at the study of communications protocols for use in a home area network (HAN), through the exploratory bibliographic research model of the wireless technologies market used in smart grids, with the purpose of finding a appropriate protocol that fits the needs of a home network. This research takes as a primary source, scientific articles published in IEEE and on the other hand, sources of books, documents published by government entities, and articles of organizations involved with smart grid. It addresses theoretical foundation and deployment of Smart Grid technology, then a study of protocols is established to identify and define a communication protocol that best fits the home area networks and finally the protocol parameters that adapt to systems or systems are established. applications intended for home area networks. According to the study carried out, more remarkable parameters are taken for the proposal of a new communication protocol, which allows the communication of smart home devices and appliances, by establishing the message to be transmitted, plot synchronization parameters, addressing fields , security, ACK enablement, error checking and useful information, concluding that said frame is the one that best suits the needs of a HAN application, but for applicability purposes in real environments it would entail high costs, since it is necessary for development of the communication protocol, so simulation scenarios were established so that in the future, to analyze each of the parameters established in this thesis for the establishment of a more robust communication protocol and its subsequent development and implementation in A real HAN environment.

*Keywords:* Smart grid, ZigBee, protocols, smart home, smart meter.

## CAPITULO I

### 1. ANTECEDENTES

#### 1.1. Nombre del Proyecto

“ANÁLISIS DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN PARA UNA RED DE ÁREA DEL HOGAR DE UNA RED ELÉCTRICA INTELIGENTE”

#### 1.2. Descripción del Problema

En la actualidad la sociedad necesita grandes cantidades de energía para el funcionamiento de su industria, el comercio, transporte, hogares, etc. Siendo éste recurso tradicionalmente proporcionado por combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), los cuales son recursos no renovables, es decir que están limitados y terminarán por agotarse. Lográndose tener un modelo energético altamente contaminante, y con una demanda creciente exponencial. Sin embargo, según los datos del Banco Mundial, en 2014 esta forma de generar energía representaba el 80,8% a nivel mundial. (AIE, 2017). En el futuro, las fuentes de energía renovable tendrán un papel dominante en la generación de electricidad y se enfocarán en alcanzar una mayor eficiencia para su consumo, a través de una correcta administración de los recursos energéticos en sus diferentes etapas de producción y en especial en la etapa de distribución, la cual presentan mayores pérdidas, provocando enormes impactos económicos, sociales y ambientales.

Es por todo ello que, mediante el desarrollo tecnológico, ha definido un nuevo paradigma en la industria eléctrica, las llamadas “Redes Inteligentes” o “Smart Grids”. Debido a la conciencia ecológica que ha despertado en todos los órdenes sociales, las nuevas redes eléctricas inteligentes integran las energías renovables a gran escala e incorpora Tecnologías de Información y

Comunicación (TICs) a las redes eléctricas ya existentes, maximizando la eficiencia desde la generación hasta el consumo, con la colaboración de sistemas de monitoreo, control, infraestructura de comunicación, sensores, medición inteligente, etc. (Ortega, 2012) (SIEMENS, 2016).

En Ecuador, la matriz de energía primaria ha sido históricamente el petróleo. Por el contrario, las energías renovables no han tenido mucha participación en la producción energética nacional. Sin embargo, la generación de hidroenergía ha aumentado en 72% entre 2000 y 2015, y las energías eólica y fotovoltaica empezaron a usarse en el país desde el 2007, no obstante, tienen un porcentaje muy bajo de implantación en el país. En 2015, la producción de energía primaria fue de 225 millones de BEP, el petróleo representó el 88% de esta cantidad, el gas natural obtuvo el 4% y las energías renovables alcanzaron el 7%. (MICSE, 2016) Con respecto a la demanda de energía en el país, según datos publicados en el Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), el Ecuador pasará de un promedio del 5,5% en el incremento anual de la demanda de electricidad registrado entre el 2000 y el 2012, a tasas de crecimiento que llegarán hasta el 21,3% anual en el 2017. (Maldonado, 2017) Es por todo ello y con el objetivo de optar por nuevas tecnologías en la búsqueda de resolución de problemas relacionados a la alta demanda y eficiencia, se encuentra vigente el Programa “REDES INTELIGENTES ECUADOR” (REDIE), el cual se encuentra en la primera fase, por lo que todavía no es visible el despliegue de las redes eléctricas inteligentes, que aporten a la disminución de pérdidas en las etapas de distribución de energía y los procesos de gestión, administración y automatización, medición inteligente entre otros, para garantizar servicios de calidad al usuario final. (CENACE, 2015)

### **1.3. Objetivos**

#### *1.3.1. Objetivo General*

Analizar los protocolos de comunicaciones para usarse en una red de área del hogar (HAN) de una red eléctrica inteligente, basado en un estudio teórico del mercado de las tecnologías inalámbricas usadas en redes eléctricas inteligentes.

#### *1.3.2. Objetivos Específicos*

Realizar el estado del arte de los protocolos de comunicación más usados en una red de área del hogar, en los países con mayor despliegue de redes eléctricas inteligentes.

Determinar las fortalezas, debilidades y problemas encontrados en los protocolos de comunicación más comunes usados en una red para el hogar de una red eléctrica inteligente.

Definir parámetros para la creación de un nuevo protocolo de comunicaciones, para interconectar dispositivos en una red de área del hogar de una red eléctrica inteligente.

### **1.4. Alcance**

En la primera parte se realizará una investigación acerca del estado del arte, sobre la realidad de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas usadas en redes eléctricas inteligentes en los países con mayor presencia y despliegue de dicha tecnología, en los 5 Continentes. Se enfocará en aspectos tales como, importancia, pros – contras, evolución y tendencias de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas dentro de las redes inteligentes y las redes de área del hogar (HAN);

con el propósito de comprender la situación actual, definir el punto de partida y hacia donde el Ecuador puede apuntar en el desarrollo de una red eléctrica inteligentes.

A continuación, se define teóricamente cuáles son las fortalezas y debilidades que presentan los principales protocolos de comunicación más usados en las redes de área de hogar (HAN), y la cual se enfocará en aspectos tales como, importancia, pros – contras, aspectos económicos (costos, pérdidas), técnicos (análisis de tramas, retardo, procesamiento, seguridad, entre otros), se analizarán parámetros de propagación, con el fin de seleccionar y determinar qué tipo de protocolo de comunicación necesita realmente las redes del hogar de una red eléctrica inteligente.

Posterior al análisis y resultados obtenidos de los dos primeros objetivos, se especificarán teóricamente que tipos de parámetros con los que debe contar un protocolo de comunicación en una red de área del hogar. Se fundamentará en un protocolo y/o la combinación de varios existentes con la meta de obtener un protocolo que brinde las mejores prestaciones desde distintos aspectos. Cabe recalcar que la propuesta se fundamentará únicamente en los resultados obtenidos en este estudio y no se realizará ninguna simulación. Sin, embargo un trabajo futuro se realizarán las simulaciones y las implementaciones para corroborar los resultados de éste trabajo teórico.

Finalmente, para dar terminado el proyecto, se dará a conocer las respectivas conclusiones y recomendaciones obtenidas de la investigación. Dando los cimientos para que se permitan desarrollar nuevos temas de investigación e implementación sobre la temática de las redes eléctricas inteligentes.

### **1.5. Justificación**

En Ecuador una de las iniciativas que impulsa el Gobierno Nacional es el cambio de la matriz energética, dando apertura a la introducción, desarrollo e impulso de nuevas tecnologías que aporten con el medio ambiente, por lo cual a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable-MEER lleva adelante desde octubre del 2015 el “Análisis para la Implementación de Redes Inteligentes en Ecuador” mediante la ejecución del Programa de Redes Inteligentes-REDIE, cual tiene como objetivo habilitar la operación en tiempo real de las redes y hacer uso eficiente de la energía, a través de la introducción de nuevas tecnologías que aseguren una alta relación beneficio-costos, mejorar la calidad de generación con un mínimo costo y maximizar el uso de la infraestructura eléctrica. (CENACE, 2015) (INER, 2015) Por lo que REDIE se constituye en un marco referencial único para la gestión y ejecución de diferentes proyectos e iniciativas en los ámbitos de la generación, transmisión, distribución eléctrica en el país. Por lo tanto, las Redes Eléctricas Inteligentes constituyen un cambio de paradigma y proponen otros métodos de solución innovadoras para el País. (CENACE, 2015).

Debido al gran desarrollo de las comunicaciones, han llevado a que nuevas tecnologías como las redes eléctricas inteligentes (Smart Grid), sean desplegadas alrededor del mundo, por lo que es importante mencionar que para alcanzar una adecuada comunicación de datos, es necesario el análisis de protocolos de comunicación que trabajan en ambientes tradicionales, se adapten y trabajen de forma más eficiente para una red del hogar de una red eléctrica inteligente. Es por ello que mediante el desarrollo de éste proyecto tiene como finalidad, analizar qué tipos de protocolos de comunicación son los ofrecen mejores prestaciones y así determinar los parámetros que requiere dicho protocolo de comunicación, para un ambiente de una red eléctrica inteligente de red de área del hogar.

El presente proyecto de titulación pretende aportar al desarrollo de las telecomunicaciones en Ecuador, ya que por medio de ello se intenta determinar, una línea base para establecer una Plataforma de administración y gestión del consumo energético en un hogar, la cual se encuentra en proceso de desarrollo, dirigida por el Ing. Fabián Cuzme, docente de la Universidad Técnica del Norte, de la cual éste proyecto forma parte. Por lo que dicho proyecto y con miras hacia un futuro, Ecuador pueda contar con una plataforma de gestión propietaria y así contribuir con el cambio de la matriz productiva mediante el desarrollo de nuevas tecnologías, y donde el Gobierno Nacional es el gran impulsor de tales proyectos.

## CAPITULO II

### 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El presente capítulo muestra el estudio de los fundamentos teóricos de las redes eléctricas inteligentes y sistemas de comunicación, tecnologías de comunicación que son adaptadas para la implementación de las redes eléctricas inteligentes y el despliegue de esta nueva tecnología en el mundo, aspectos que permiten conocer como los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica tradicionales, mediante la implementación de nuevas tecnologías innovadoras, permiten mantener una adecuada eficiencia energética y gestión de la creciente demanda de energía eléctrica.

#### 2.1. Red Eléctrica Inteligente

Los sistemas de red eléctrica básicamente fueron diseñados para satisfacer las necesidades del siglo pasado, desde sus inicios la generación eléctrica se concentraba en enormes plantas centralizadas, que a través de transformadores generadores pasaban a una red interconectada de alta tensión, conocida como red de transmisión y que se encarga de transportar la energía eléctrica a través de una serie de transformadores de distribución hacia los circuitos finales para la entrega al usuario final. Tradicionalmente los sistemas de red eléctrica para aumentar la generación de energía y compensar así el incremento de la demanda actual, se centraban en la necesidad de buscar e implementar nuevas facilidades generadoras, como la energía hidroeléctrica, energía nuclear o combustibles fósiles, trayendo consigo un gran impacto ambiental por las emisiones de CO<sub>2</sub>. Es por ello que hoy en día existe una gran preocupación por parte del sector eléctrico a nivel mundial, por cambiar su tradicional sistema de red, y así descarbonizar el suministro de electricidad, mediante el reemplazo de activos obsoletos y apoyándose en el uso efectivo de las tecnologías de

la información y la comunicación (TIC) para su desarrollo. Por lo tanto, la introducción de una Red Inteligente o Smart Grid (SG) es una oportunidad para modernizar el sistema de energía eléctrica tradicional, mediante la mejora de la supervisión y control de la red eléctrica con el propósito de obtener una operación efectiva, flexible y de menor coste.

### *2.1.1. Conceptos*

Una red inteligente o su traducción al Inglés Smart Grid, es una combinación de varias tecnologías que aportan a la renovación e innovación de las redes eléctricas convencionales con el fin de ofrecer soluciones al usuario final y el medio ambiente. La red eléctrica inteligente no posee una definición exacta por lo que a continuación se citará algunas definiciones realizadas por diversos actores u organizaciones.

Según European Technology Platform la define como: " Una Red Inteligente es una red eléctrica que puede integrar de manera inteligente las acciones de todos los usuarios conectados a ella (generadores, consumidores y aquellos que hacen ambas cosas) para entregar de manera eficiente suministros de electricidad sostenibles, económicos y seguros. "

Según el Departamento de Energía de los Estados Unidos: "Una red inteligente utiliza tecnología digital para mejorar la confiabilidad, seguridad y eficiencia (tanto económica como energética) del sistema eléctrico de gran generación, a través de los sistemas de entrega a los consumidores de electricidad y un número creciente de recursos de generación distribuida y almacenamiento"

De acuerdo a Smarter Grids: The Opportunity define que: "Una red inteligente utiliza detección, procesamiento integrado y comunicaciones digitales para permitir que la red eléctrica sea observable (capaz de ser medida y visualizada), controlable (capaz de ser manipulada y

optimizada), automatizada (capaz de adaptarse y auto-sanar), completamente integrado (totalmente interoperable con los sistemas existentes y con la capacidad de incorporar un conjunto diverso de fuentes de energía)."

### *2.1.2. Beneficios de una Red eléctrica inteligente*

El despliegue de la red eléctrica inteligente trae consigo grandes beneficios tanto para los servicios públicos, consumidores y la sociedad. En los servicios públicos se tendrá mejoras en la reducción de pérdidas de energía en la distribución, la creciente demanda, la mejora de capacidades y monitoreo de la red, seguridad y calidad de suministro, y un ahorro considerable sobre costos de mantenimiento y gastos de capital diferido. También se considera que los beneficios para consumidores o clientes, están relacionados a la mejora de control sobre el consumo de energía en los electrodomésticos del hogar, a través de mayor información de la oferta, para tener un cambio de comportamiento del consumidor sobre el uso de la electricidad y lograr un ahorro en los costos de energía. Finalmente, los beneficios de la red eléctrica inteligente enfocada a la sociedad, permite la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, dado a la implementación de energías no contaminantes al sistema de generación eléctrica y la integración de vehículos eléctricos. A continuación, se especifican los beneficios más relevantes que ofrecen las redes eléctricas inteligentes:

Servicios públicos.

- Garantizar óptimos niveles de fiabilidad, seguridad y calidad del suministro de energía.
- Mejora de la capacidad y eficiencia de los sistemas eléctricos existentes redes de energía.
- Permite el mantenimiento predictivo y la recuperación autocurativa
- Mejora de la fiabilidad y calidad de la potencia.

- Evita la construcción de las plantas de energía de respaldo.
- Mejoras sobre las pérdidas y perturbaciones del sistema eléctrico.
- Automatización de mantenimiento y operación de la red.
- Facilitar y mejorar la conexión y el funcionamiento de los generadores de todo tipo de tamaños y tecnologías.
- Incremento de la seguridad de la red eléctrica.

#### Consumidores.

- Proporcionar a los consumidores mayor información de la oferta.
- Permitir a los consumidores formar una parte importante en la optimización del sistema.
- Permite habilitar nuevos productos y servicios enfocados al consumo eficiente de energía.
- Los precios en tiempo real permiten a los consumidores mover parte de su consumo de electricidad a períodos de tarifas más bajas.
- A través de pantallas, teléfonos celulares, etc, el consumidor podrá ver el consumo de electricidad, permitiendo un cambio de comportamiento más eficiente en términos de energía y un ahorro de costos de energía.

#### Sociedad.

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la integración de fuentes no contaminantes.
- Reducir el impacto medioambiental del sistema eléctrico de suministro.

### *2.1.3. Tecnologías Requeridas*

En éste apartado se describe las tecnologías que son requeridas para la implementación y desarrollo de una Red Eléctrica Inteligente, como las tecnologías de la información y comunicación, tecnologías enfocadas a la medición, control y automatización de la red eléctrica, tecnologías de almacenamiento de energía y electrónica de potencia.

Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC): Los sistemas de red eléctrica en apoyo de las comunicaciones, software y hardware permiten el transporte de datos de manera bidireccional entre los diversos componentes que conforman una red de potencia, y en un enfoque hacia el usuario final, se puede proporcionar información más amplia acerca de la demanda y consumo de cargas. Ofrecer una adecuada respuesta sobre fallas ocurridas en los sistemas de distribución de energía, y proporcionar seguridad mediante los sistemas de información y comunicación.

Tecnologías de detección, medición, control y automatización: Dentro de estas tecnologías incluyen: Los dispositivos electrónicos inteligentes (DEI), los cuales ofrecen una adecuada protección avanzada en la transmisión de energía eléctrica, así también asegurar las mediciones, registros de fallas y registros de eventos en un sistema de red inteligente. Uso de las Unidades de Medición Fasorial (PDU) ofrecen mayor supervisión, protección, análisis y control, para garantizar la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia. Apoyo de sensores integrados, medición y monitoreo sensible, además de una administración automatizada evitan que se produzcan congestiones en los circuitos de transmisión y distribución, interviniendo de forma rápida para garantizar una operación adecuada de los componentes y respuestas a eventos ocurridos en los sistemas de potencia. Los medidores inteligentes, a través de hardware y software en un ambiente

de usuario final, permiten un mayor monitoreo y control sobre el uso de electricidad mediante información en tiempo real. Sistemas de facturación precisas, información detallada de consumo, permiten una administración precisa de la demanda de los consumidores.

Electrónica de potencia y almacenamiento de energía: Con el propósito de incorporar fuentes de energía renovable al sistema de red inteligente es necesario la aplicación de los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexible (FACTS), además que el desarrollo de esta tecnología, facilita el control los flujos de potencia de una red, mejoras en la capacidad de transferencia, evitar las oscilaciones del sistema de potencia, para brindar mayor flexibilidad del sistema, evitando las fallas o daños en equipos y limitaciones en la capacidad de transmisión. Incorporación del Sistema de Corriente Continua de alta tensión (HVDC por sus siglas en inglés) a la red, permitiendo el transporte de energía a larga distancia y un menor espacio, mejor precisión en el control de voltaje y dirección del flujo de potencia, para alcanzar estabilidad de la red y evitar apagones de energía ocasionados por desconexiones en cascada. Obteniéndose grandes beneficios mediante esta tecnología en relación de costos y un impacto ambiental muy bajo.

#### *2.1.4. Estándares*

Para garantizar una operación de alta eficiencia, confiabilidad y seguridad de los sistemas de red inteligente, es necesario que se establezcan ciertos estándares o protocolos. Actualmente se han propuestos varios estándares, pero otros están en etapa de estudio debido a que deben ser adaptados a los nuevos desarrollos de redes eléctricas inteligentes.

Los estándares más relevantes dentro de las Redes Inteligentes, son establecidos por la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y IEC (Comisión Electrotécnica Internacional), y estos son los siguientes:

- IEEE 1547
  - IEC 61850-7-420
  - IEC 61400-25
  - IEEE 1379
  - IEEE C37.118
  - IEEE 519
- IEEE 1547 o Estándar para la interconexión de recursos distribuidos con sistemas de energía eléctrica, se publicó en el año 2003 por el consejo de normas de la IEEE, el cual provee una serie de criterios y requisitos para la interconexión de los recursos de generación distribuida con la red eléctrica. Proporciona requisitos relevantes para el rendimiento de interconexión e interoperabilidad, operación y prueba, y consideraciones de seguridad, mantenimiento y seguridad.
- IEC 61850-7-420 “Estructura de comunicación básica - Nodos lógicos de recursos de energía distribuida”: Es un estándar relacionado con las interfaces de comunicación y control para todos los dispositivos de recursos de energía distribuidos DER, además que se encarga de definir los modelos a utilizar para el intercambio de datos entre los DER. A través del estándar es posible una implementación simple, ahorros en la instalación y mantenimiento, así también como el aumento de la confiabilidad y eficiencia dentro de las operaciones del sistema de energía.
- IEC 61400-25: Comunicaciones para monitoreo y control de plantas de energía eólica. El estándar forma parte del subconjunto de IEC 61400, estándar para el diseño de turbinas eólicas. El estándar define la comunicación necesaria para el monitoreo y control de las

plantas de energía eólica, y mediante la simplificación de los roles entre la turbina eólica y los sistemas SCADA, estableciendo un base para especificaciones y contratos de adquisición. Además, el estándar establece el control y la supervisión de la información proveniente de diferentes proveedores de turbinas eólicas de manera homogénea.

- IEEE 1379: Estándar publicado en 2000, establece una serie de normas para las comunicaciones e interoperación de unidades terminales remotas y dispositivos electrónicos inteligentes (IED) en una subestación. Los protocolos involucrados en esta norma son IEC 60870-5 y DNP3, los cuales son los más utilizados para Control de Supervisión y Datos Sistemas de adquisición (SCADA).
- IEEE C37.118: El estándar se encarga de definir los sistemas de medición de fasores sincronizados (sincrofasor) frecuencia y velocidad de cambio de frecuencia para sistemas de potencia. Se establecen una unidad de medida fasorial (PMU), la cual puede ser una unidad física independiente o una unidad funcional dentro de otra unidad física que estima un sincrofasor. Además, el estándar brinda el método preciso para evaluar la medición de PMU y establece los requisitos de cumplimiento cuando su estado es estacionario, logrando mediciones de frecuencia fasorial, magnitud y ángulo, distorsión armónica interferencia fuera de banda. Por otra parte, IEEE C37.118 no especifica hardware, software o un método para calcular fasores, frecuencia o el índice de cambio de frecuencia (ROCOF).
- IEEE 519: Práctica recomendada IEEE y Requisitos para el control armónico en Sistema de energía eléctrica. El estándar define los límites de las amplitudes armónicas para corrientes y voltajes en el punto de acoplamiento común (PCC), permitiendo garantizar que la empresa eléctrica pueda distribuir al usuario final energía relativamente limpia y a

través de ello asegurar y proteger el equipo eléctrico mediante la reducción de la interferencia y sobrecalentamiento, además se evitan pérdida de vidas por exceso de corrientes armónicas y previenen tensiones de tensión excesivas debido a armónicos de tensión excesiva.

- Para las redes de comunicación en redes eléctricas inteligentes como; WAN, FAN y HAN se han establecido los siguientes estándares: G3-PLC, Home Plug, PRIME, U-SNAP, IEEE P1901, Z-Wave, IEC 61970 e IEC 61969 e IEC 60870-6. Estos estándares se estarán describiendo y ampliando en el siguiente apartado.

## **2.2. Sistemas de Comunicación en una Red Eléctrica Inteligente**

La incorporación de los sistemas de comunicación a la red de energía eléctrica, ha permitido que se desarrolle una nueva infraestructura de comunicación, la cual conectada a la generación de energía, la transmisión, los sistemas de distribución y puntos de consumo, siendo las comunicaciones un componente esencial para el desarrollo de la Red Inteligente que garantice la seguridad, fiabilidad, flexibilidad, gestión de la demanda de respuesta y otras características como el aumento de la confiabilidad y la autoconciencia. Además, los sistemas de comunicación han permitido que a través de la digitalización de los datos de electricidad y de control se pueda crear una automatizada y amplia red eléctrica distribuida.

### *2.2.1. Infraestructura*

Una red eléctrica inteligente bien puede considerarse como una red de muchos sistemas y subsistemas que interconectados de manera inteligente proporcionan un suministro de energía confiable y rentable para aumentar la respuesta de la demanda. Además, la red inteligente se

logrará superponiendo la infraestructura de comunicación en infraestructura de sistema eléctrico, con el fin de la aplicación técnicas de comunicación avanzadas, se logre una mejora de la confiabilidad, seguridad, interoperabilidad y eficiencia de la red eléctrica, además de reducir los impactos ambientales y promueve el crecimiento económico.

Las infraestructuras de comunicación de una Red Inteligente pueden optar de dos formas, las públicas o privadas. Las redes públicas tales como Internet y por otra parte las redes móviles 2G, 3G y 4G se destacan por presentar un bajo costo, pero debido a las comunicaciones existentes, pueden generar una serie de problemas, entre los cuales se encuentra la falta de eficacia, seguridad, comunicación en tiempo real y confiabilidad. Pero dichos problemas pueden ser resueltos a través de las redes privadas virtuales (VPN por sus siglas en ingles). Las propias líneas de distribución de energía eléctrica actúan como comunicación, por medio de la tecnología de comunicación de línea de alimentación (PLC), junto con una combinación de cableado y las tecnologías inalámbricas, se logra crear así una infraestructura de comunicación compleja pero altamente confiable.

La Figura 1 muestra una vista general jerárquica del panorama de la red inteligente, su relación con los dominios NIST y ejemplos asociados de componentes y tecnologías. Cada tecnología, dominio, y miembros interactuarían entre sí para proporcionar cualquiera de los objetivos comerciales, tecnológicos y sociales de la red inteligente. (Cambridge, 2012). Gracias a la infraestructura de medición avanzada (AMI) es posible la interacción de sistemas y tecnologías, dado que permite el flujo bidireccional de información y energía en apoyo de la gestión de recursos de energía distribuida (DER) o la generación distribuida (DG) y el consumidor final.

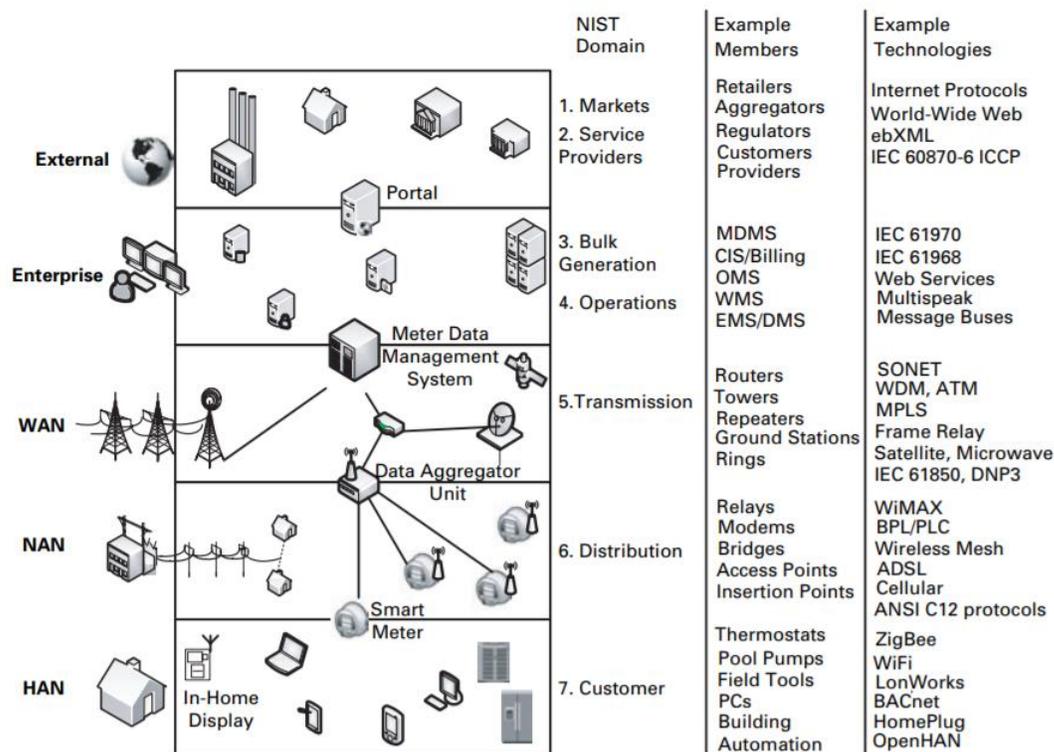


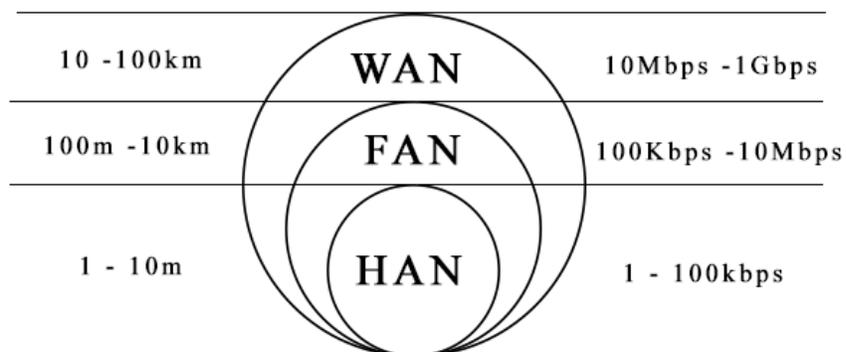
Figura 1. Infraestructura de comunicación para redes eléctricas inteligentes

Fuente: (Cambridge, 2012)

### 2.2.2. Subredes de comunicación de una Red eléctrica inteligente

Las comunicaciones en un Sistema de red eléctrica inteligente, se pueden dividir en tres categorías o capas distintas, de acuerdo a criterios tales como el área de cobertura, la velocidad de transmisión de datos y el rango. La Figura 2 muestra las velocidades de transmisión y cobertura de cada subred.

- Red de área Domestica (Home Area Network - HAN).
- Redes de área de Campo (Field Area Networks - FAN).
- Red de área Amplia (Wide Area Networks WAN).



*Figura 2.* Velocidades de transmisión y rango de cobertura para WAN, FAN y NAN.

Fuente: Adaptado por el Autor

Las Redes de área amplia (WAN): Son aquellas redes que proporciona comunicación entre la empresa eléctrica y subestaciones. Esta red también es denominada como una red de comunicación troncal, la cual tiene como característica un gran ancho de banda y una transmisión de datos a larga distancia entre los servicios eléctricos y las subestaciones, para detección, monitoreo y control de redes inteligentes. (Gungor, et al., 2013) Afirma que las WAN establecen una red de comunicación bidireccional con propósitos de monitoreo en aplicaciones Smart grid, en donde dichas aplicaciones requerirán de ciertas características, tales como una interfaz única de comunicación, respuestas en tiempo real y QoS, según sea el caso, como por ejemplo las aplicaciones como la subestación automatizada requiere de un gran ancho de banda y tiempo real, o aplicaciones como AMI que requieren un ancho de banda considerable y gran velocidad de datos.

Las redes de área de campo (FAN por sus siglas en inglés): Son aquellas redes de comunicación destinada para las áreas de distribución de energía, entre los que incluyen dispositivos de control y automatización, comunicados por redes entre conexiones de servicio individuales y puntos de retorno a los servicios eléctricos. En términos generales las FAN actúan como un lazo entre las

subestaciones de energía y las instalaciones domiciliarias o de cliente. (Gungor, et al., 2013) Afirma que una característica de las FAN es la presencia de los nodos inteligentes, los cuales son los encargados de interconectar al cliente con la subestación con el objetivo de manejar la información de los diferentes puntos que intervienen en la red, dichos nodos se encuentran conectados por medio de una puerta de enlace centralizada respaldada por servicios eléctricos para poder transmitir los datos recolectados. Para poder asegurar una comunicación confiable las FAN presentan canales de ancho de banda y recursos inalámbricos logrando ser muy robustos. El área de cobertura de las FAN incluye los sectores urbanos y suburbanos y rurales, estos rangos de área de aplicación de las FAN han permitido que aplicaciones como la infraestructura de medición avanzada, la automatización de distribución avanzada e integración de recursos de energía distribuidos, logren ser totalmente compatibles con las FAN.

Las redes de área del Hogar (HAN): Este tipo de red de comunicación interviene desde el medidor de consumo de energía eléctrica hasta los dispositivos y aparatos eléctricos ubicados dentro del hogar. (Gungor, et al., 2013) Afirma que las HAN se encargan de la gestión del lado de la demanda (DMS), ya que por medio de la conectividad de medidores inteligentes es posible brindar información al cliente sobre costos de uso de electricidad, gestión del comportamiento de consumo y toma de control sobre dispositivos o aparatos inteligentes. Para las comunicaciones las HAN requieren un bajo ancho de banda de soporte entre los electrodomésticos y medidor inteligente. Para las HAN son varias las aplicaciones que a un futuro pueden desarrollarse, tales como; mejoras en los contadores inteligentes, aplicaciones enfocadas a predicciones de costos de energía, comportamientos de consumo adecuado, concientización de consumo, gestión adecuada sobre cargas, entre otras.

### 2.2.3. *Arquitectura de una Red de Comunicación*

La red inteligente requerirá una arquitectura de sistema abierto como plataforma de integración, estándares y protocolos técnicos de comunicaciones compartidos y sistemas de información que funcionarán a la perfección entre la gran cantidad de dispositivos y sistemas inteligentes. Esto dificulta la realización de una arquitectura única y compuesta. De hecho, la red inteligente puede contener muchas arquitecturas de sistema desarrolladas independientemente o en asociación con otros sistemas. Por lo que según varios autores una red eléctrica inteligente puede adoptar un modelo de cinco capas, esta arquitectura multicapa se encuentra distribuida de la siguiente manera:

- Capa del sistema de alimentación: Esta capa se enfoca en el sistema eléctrico de potencia, como la generación de potencia, transmisión y distribución de energía hacia el cliente final.
- Capa de control de potencia: En esta capa se encuentran los diferentes sistemas, equipos o dispositivos, los cuales permiten el control de potencia en una red eléctrica inteligente, entre dichos dispositivos están: PMUs, banco de capacitores, recolectores, interruptores, medidores sensores, almacenamiento, etc.
- Capa de comunicación: Es la capa de mayor importancia dentro de un sistema de red inteligente, ya que aporta a la red la interconexión entre todos los sistemas y dispositivos de las diferentes etapas del sistema eléctrico. La capa de comunicación, se clasifica según el área de cobertura, velocidad de transmisión y el rango, para las 3 redes de comunicación existentes: WAN, NAN, HAN.

- Capa de seguridad: Es la capa que se encarga de proporcionar a la red eléctrica inteligente, la protección de la información, a través de sistema de autenticación, control de acceso, cifrado, protección sobre la integridad de la información y privacidad.
- Capa de aplicación: Es la última capa de la arquitectura multicapa de la red eléctrica inteligente, ofrece el acceso hacia los demás servicios de las anteriores capas a través de las aplicaciones finales y manejo de datos, por ejemplo: medición avanzada, respuesta de la demanda, gestión de interrupciones, gestión de activos, detección de fraudes y múltiples aplicaciones destinadas al cliente final.

La figura 3, muestra el despliegue de la arquitectura de comunicación en sus diferentes capas para una red eléctrica inteligente.

Medidores inteligentes y aplicaciones			Aplicaciones del cliente					Capa de aplicación
Autenticación, Control de acceso, Protección de la integridad, Cifrado, Privacidad								Capa de seguridad
4G LTE, WIMAX, fibra óptica			IEEE 802.22, PLC, DSL		Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth			Capa de comunicación
WAN			NAN/FAN		HAN/BAN/IAN			
PMUs	Banco de Capacitores	Reconectores	Interruptores	Sensores	Transformadores	Medidores	Almacenamiento	Capa de control de potencia
Transmisión / Generación de Potencia			Distribución de energía			Locales del cliente		Capa del sistema de alimentación

*Figura 3.* Arquitectura multi-capa de una red eléctrica inteligente.

Fuente: (Vehbi C Güngör, 2011)

Por lo tanto, se podría decir que la arquitectura general de una red eléctrica inteligente, tendría la estructura tal como se muestra en la figura 4, donde se detallan los dos niveles, la red de energía y la red de comunicaciones, las cuales conforman la arquitectura general de una red eléctrica inteligente.

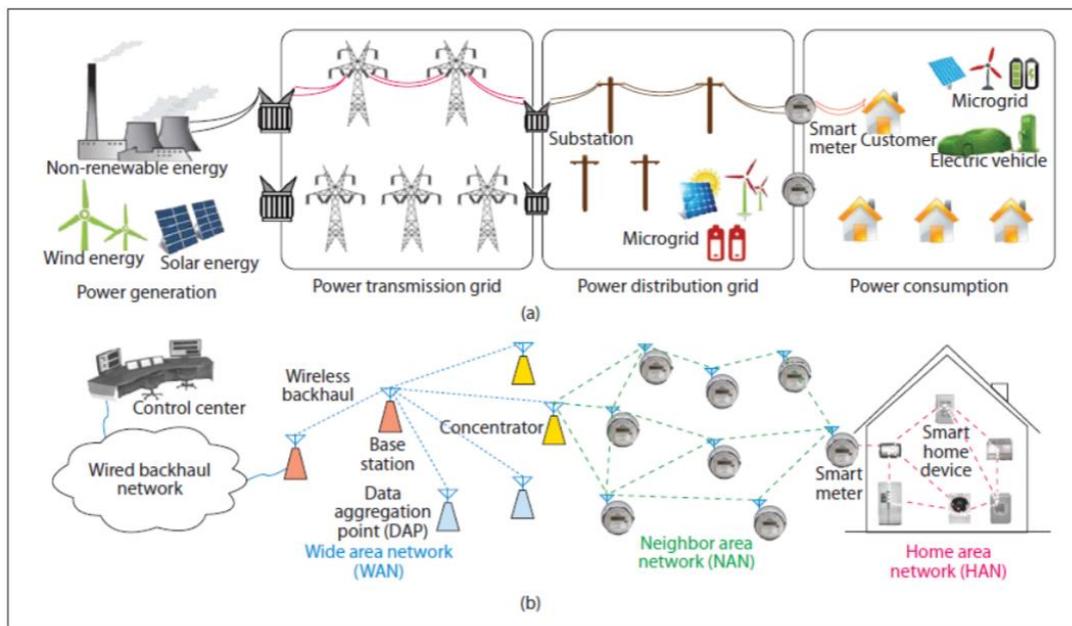


Figura 4. Arquitectura general de una red eléctrica, b) Arquitectura general de una red de comunicación en Smart Grid.

Fuente: (Sarijari, et al., 2013)

### 2.3. Tecnologías de Comunicación

En ésta sección se realiza una descripción de las principales tecnologías de comunicación tanto cableadas e inalámbricas que son adoptadas en las redes eléctricas inteligentes. Las diferentes formas de establecer comunicación sobre un sistema eléctrico se indica en la Figura 5.

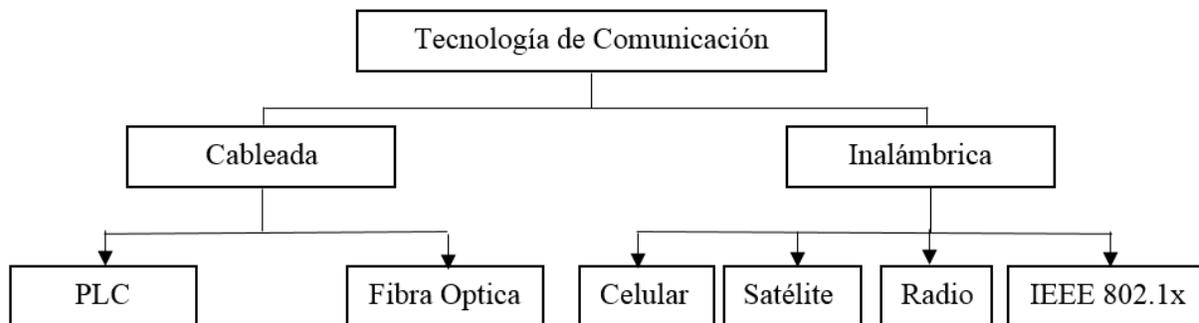


Figura 5. Diagrama de tecnologías de Comunicación involucradas en SG.

Fuente: El Autor.

### *2.3.1. Comunicación mediante tecnología alámbrica:*

En general, las tecnologías de tipo alámbrica son aquellas que a través de cableado se establece comunicación mediante un enlace físico entre el emisor y receptor. Son varias las tecnologías que aportan al desarrollo e implementación para sistemas de redes inteligentes, éstos se describen a continuación:

#### *PLC (Power Line Communication):*

(Janaka Ekanayake, 2012) y (Vehbi C Güngör, 2011) Afirman que las comunicaciones por línea de potencia son aquellas que utilizan las líneas de distribución de energía eléctrica como medio para transmitir datos o información a alta velocidad (2-3 Mbps) entre dispositivos. PLC ofrece la posibilidad de enviar datos simultáneamente con electricidad en el mismo medio, para ello se usa la Unidad de adaptación de línea (LMU), para inyectar señales en una línea de transmisión o distribución de alta tensión. La utilización de trampas de línea sobre la red, permite que la señal inyectada no se desvíe o se propague por otras rutas de la red. PLC ha sido la primera opción para la comunicación con el medidor de electricidad debido a la conexión directa con el medidor y logrando ser una tecnología muy sencilla de implementar especialmente en los sectores urbanos. En una red típica de PLC, los medidores inteligentes se conectan al concentrador de datos a través de líneas eléctricas y los datos se transfieren al centro de datos a través de tecnologías de red celular. Uno de los principales problemas encontrados en PLC es la interferencia ya que la señal de comunicación va directamente en la línea de alimentación, así también la distorsión del canal y atenuación de la señal. En PLC existen grandes dificultades para alcanzar altas velocidades de transmisión.

### *Fibra Óptica:*

(Janaka Ekanayake, 2012) Afirma que la transmisión sobre fibra óptica se usa tanto dentro de las subestaciones como para la transmisión de datos a larga distancia. Las fibras ópticas a menudo están incrustadas en los conductores trenzados de los cables blindados (tierra) de las líneas aéreas. Estos cables se conocen como cables de conexión óptica (OPGW). Un cable de tipo OPGW contiene una estructura tubular con una o más fibras ópticas, rodeadas por capas de acero y alambre de aluminio. Las fibras ópticas pueden envolverse alrededor de los conductores de fase o, a veces, un cable independiente, se utiliza un cable auto-soportante completamente dieléctrico (ADSS). En comparación con otros medios de comunicación, los cables de fibra óptica tienen un ancho de banda mucho mayor, menor susceptibilidad a la degradación de la señal y menor peso en comparación al cobre. A diferencia de las señales eléctricas en cables de cobre, las señales de luz en una fibra, no interfieren con las de otras fibras en el mismo cable. Además, la transmisión de fibra óptica es inmune a la interferencia electromagnética externa (EMI). Esto es importante en las aplicaciones del sistema de potencia ya que se requiere la transmisión de datos a través del área eléctricamente hostil de una subestación. Las principales desventajas de la transmisión de fibra óptica incluyen el costo, los requisitos especiales de terminación y su vulnerabilidad (es más frágil que el cable coaxial).

### *2.3.2. Comunicación mediante tecnología Inalámbrica:*

Las tecnologías de tipo inalámbricas son todas aquellas que tienen como medio de comunicación el aire y no se tiene un enlace físico entre los dispositivos de la red. Las tecnologías inalámbricas son una gran alternativa al uso de tecnologías cableadas, ya que aportan muchas ventajas sobre las implementaciones cableadas, una de ellas es el costo reducido de la

infraestructura, ya que no se requiere cableado físico entre los diferentes nodos separados en una red implementada a través de tecnología inalámbrica. (Richard Peter Lewis, 2009) Afirma que la desventaja en este tipo de tecnología es que existen preocupaciones sobre la interceptación de la información, ya que se propaga a través del espacio físico y puede ser captada por cualquier persona dentro del alcance del dispositivo transmisor. Entre las tecnologías inalámbricas en redes eléctricas inteligentes esta las siguientes:

*Comunicación por Radio:*

(Janaka Ekanayake, 2012) Afirma que los enlaces de radio brindan una alternativa para la comunicación entre el Centro de control y las subestaciones, ya que, por lo general, los centros de control de datos suelen estar distantes de las subestaciones de energía, por lo que el uso de una red cableada de cobre o fibra óptica es demasiado costoso. Pero existen ciertas limitaciones con este tipo de tecnología ya que la comunicación no se puede proporcionar el ancho de banda que ofrece la tecnología por cable, pero debido a las mejoras de los últimos años, la confiabilidad, el rendimiento y los costos de funcionamiento de las redes de radio han mejorado considerablemente, por lo cual se convierte en una opción atractiva. Las comunicaciones por radio pueden ser multipunto o punto a punto, y funcionan normalmente en frecuencias UHF (entre 300 MHz y 3 GHz) o en frecuencias de microondas (entre 3 y 30 GHz).

*Comunicación móvil celular:*

(Janaka Ekanayake, 2012) Afirma que la tecnología móvil celular ofrece comunicación entre objetos en movimiento. Para que esto sea posible, un área de servicio se divide en pequeñas regiones llamadas celdas. Cada celda contiene una antena que es controlada por una oficina de Conmutación de Telefonía Móvil (MTSO). En una red celular, el MTSO asegura la continuación

de la comunicación cuando un dispositivo móvil se mueve de una celda a otra. (Xi Fang, 2012) Afirma que la comunicación móvil celular ha sido una tecnología madura comprobada para la transmisión de datos durante varias décadas. Al utilizar los sistemas celulares de comunicación 3G o incluso 4G, es rápido y económico obtener cobertura de comunicaciones de datos en una gran área geográfica.

#### *Comunicación por satélite:*

Los satélites se han utilizado durante muchos años para las redes de telecomunicaciones y también se han adoptado para los sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA). Una red de comunicación por satélite puede considerarse como una red de microondas con un satélite que actúa como repetidor.

En general, las tecnologías cableadas son mejores que las inalámbricas en términos de ancho de banda, costo, contabilidad, seguridad, mantenimiento y por el ahorro en cuanto al pago del espectro. Por otro lado, las tecnologías inalámbricas son la última tendencia, debido a la escalabilidad, flexibilidad y reconfigurabilidad (desde el punto de vista de los operadores) y la movilidad, característica más atractiva para el cliente final.

#### *2.3.3. Tecnologías utilizadas en diferentes subredes SG*

##### *Tecnologías de la serie IEEE 802.1x*

IEEE 802 es un proyecto desarrollado por IEEE, cuyo fin se centra en el desarrollo de estándares para redes de área local y redes de área metropolitana. Para una red eléctrica inteligente los estándares IEEE 802 son aplicables tanto en subredes WAN en sistemas SCADA, NAN alrededor de las redes de distribución y HAN en las instalaciones de los consumidores.

Ethernet: Es una tecnología de comunicación basada en tramas sobre el estándar IEEE 802.3, es utilizada para redes de área local cableadas para ordenadores. Ethernet hace uso del medio compartido donde más de un dispositivo intenta usar el medio en común, tal efecto produce que las tramas que son transmitidas por el medio colisionen, este problema se resuelve a través del protocolo de acceso múltiple sensible a la portadora con detección de colisiones (CSMA/CD). Cuando se transmiten dos tramas simultáneamente se crea una colisión y a través del protocolo CSMA/CD se genera un dominio de colisión, por otro lado, Ethernet lleva tramas de difusión y el dominio al cual llegan dichas tramas se denomina dominio de difusión. Por lo tanto, en una red Ethernet el rendimiento se ve afectado por la forma en que los dominios de colisión y difusión se encuentran en la red, por lo que la aislación de dichos dominios es importante para obtener un rendimiento adecuado en la red. (Janaka Ekanayake, 2012) Ethernet debido a su simplicidad es utilizada ya que provee facilidad en mantenimiento, capacidad para incorporar nuevas tecnologías y confiabilidad. Tiene un bajo costo de instalación y es fácil de actualizar. Su banda de base se define en una serie de estándares tales como 10Base5, 10Base2, 10Base-T, y así sucesivamente. El primer número, es decir, 1, 10, define la velocidad de datos en Mbps, el último número o letra indica la longitud máxima del cable y el tipo del cable. Una LAN Ethernet consta de todos o algunos de los dispositivos tales como; repetidores, hub, bridge, router, y switch.

Wireless LANs: El estándar IEEE 802.11 describe la LAN inalámbrica (WLAN). La interoperabilidad de los dispositivos IEEE 802.11 está certificada por WiFi Alliance. Las WAN constan de los siguientes componentes: estación, puntos de acceso y sistema de distribución. La familia WLAN hace uso del protocolo CSMA / CA para acceder al medio de transmisión. En la

Figura 6 se muestra una aplicación típica de WLAN 802.11 en aplicaciones de redes eléctricas inteligentes.

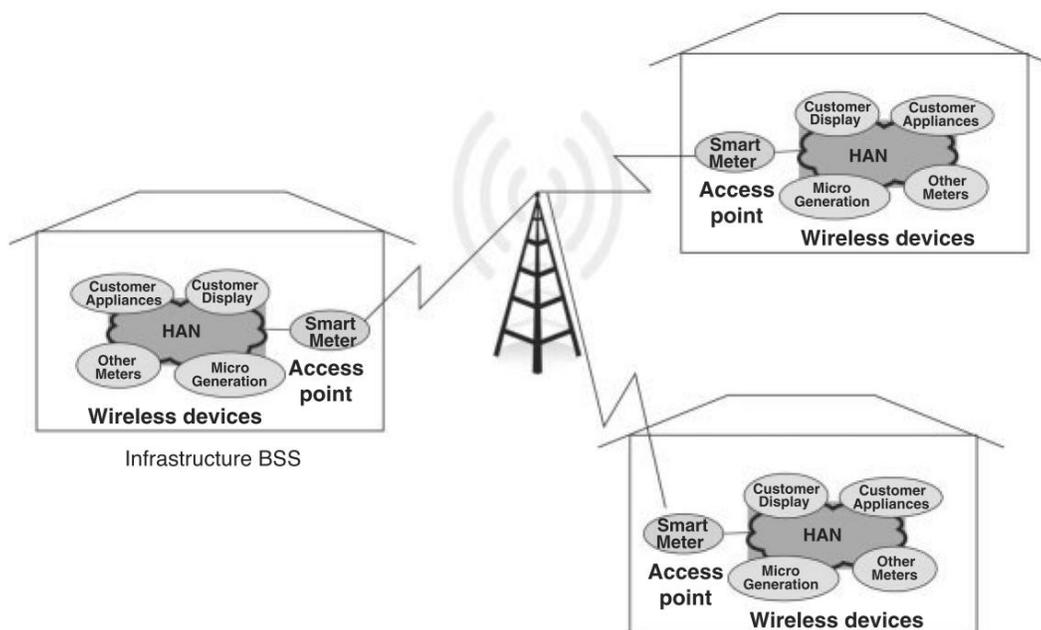


Figura 6. Aplicación típica de una WLAN en SG.

Fuente: (Janaka Ekanayake, 2012)

Bluetooth: Esta tecnología se encuentra definida por el estándar IEEE 802.15.1, diseñada para conectar dispositivos móviles o fijos mediante la transmisión de radio de baja potencia y corta distancia. Desde sus inicios se concibió como una alternativa inalámbrica a los cables de datos EIA 232. En Bluetooth se define dos tipos de arquitecturas de red llamadas piconet y scatternet. Piconet es una red bluetooth que consta de un dispositivo maestro y hasta siete dispositivos esclavos. Scatternet es el conjunto de piconets interconectados entre sí, ya puede ser a través de un puente que podría ser un esclavo de un piconet y maestro de otro piconet o esclavo de dos piconets. Existen dos tipos de enlaces Bluetooth para la transferencia de datos, el primero es orientado a conexión síncrona (SCO) y el segundo es un enlace sin conexión asíncrona (ACL). SCO se utiliza

cuando la entrega oportuna es más importante que la entrega sin errores y ACL se usa cuando la entrega sin errores es más importante que la entrega oportuna. Bluetooth tiene su versión clásica actualmente definida por Bluetooth 3.0 + HS y la nueva la versión definida por Bluetooth 4.0, la cual está diseñada para aplicaciones que requieren un bajo consumo de energía y transferencia de pequeños datos con baja latencia. La figura 7 ofrece una descripción técnica de estas dos versiones de Bluetooth. (Janaka Ekanayake, 2012)

Specification	Bluetooth 3.0+HS	Bluetooth 4.0
Distance/Range	Up to 100 m	150 m
Over the air data rate	1–3 Mbps	1 Mbps
Active slaves	7	Implementation dependent
Voice capable	Yes	No
Power consumption	100 mW	10 mW
Peak current consumption	< 30 mA	< 20 mA
Topology	Piconet, Scatternet	star, point-to-point

*Figura 7.* Especificaciones técnicas de Bluetooth 3.0 y Bluetooth 4.0

Fuente: (Janaka Ekanayake, 2012)

ZigBee: Es una tecnología de comunicación inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.15.4. ZigBee posee características tales como un bajo consumo de energía, alta flexibilidad en redes y bajo costo. En esta tecnología se crea una red auto organizada ad-hoc interconectando dispositivos fijos, portátiles y móviles. En redes eléctricas inteligentes ZigBee es ideal para iluminación inteligente, monitoreo de energía, domótica y lectura automática de contadores, etc, debido a su simplicidad, movilidad, robustez, requisitos de bajo ancho de banda, bajo costo de implementación, su funcionamiento dentro de un espectro sin licencia, fácil implementación de red.

WiMax: La interoperabilidad mundial para acceso por microondas (WiMax) es una tecnología inalámbrica definida por el estándar IEEE 802.16. Proporciona conectividad fija y móvil utilizando una técnica llamada acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA).

(Janaka Ekanayake, 2012) Afirma que WiMax promete introducir un estándar inalámbrico de largo alcance que se extiende hasta 50 km y alto ancho de banda, velocidades máximas de datos de 75 Mbps para conexiones fijas y hasta 15 Mbps para conexiones móviles. WiMax trabaja bajo licencia, lo cual hace que sea una tecnología más segura y confiable. A través del estándar mejorado IEEE 802.16m-2011 se espera se aumente las velocidades de datos a 200 Mbps en carga y 300 Mbps en descarga. La principal desventaja de WiMax es que al utilizar una red con licencia es más costosa, aún no se ha implementado a escala, por lo que sigue siendo una tecnología no probada. La figura 8 indica la típica instalación de una red Wimax.

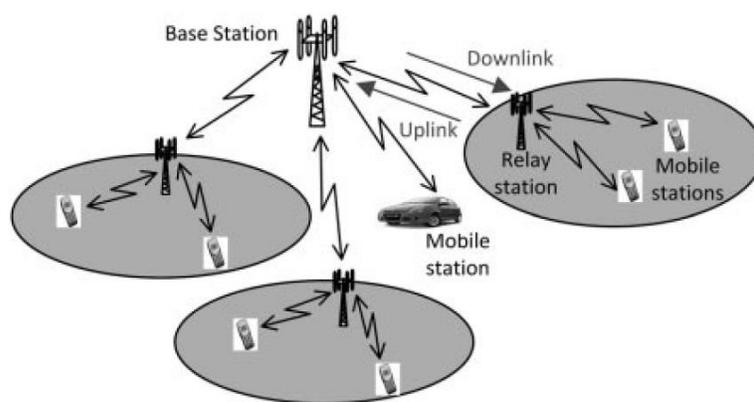


Figura 8. Red típica WiMax

Fuente: (Janaka Ekanayake, 2012)

### *Comunicaciones Móviles:*

El estándar que define a esta tecnología es GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles). GSM, se desarrolló el Servicio general de radio por paquetes (GPRS). GPRS utiliza la red GSM existente y agrega dos nuevos elementos de red de conmutación de paquetes. En

diciembre de 1998 se lanzó un proyecto llamado Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP). El objetivo del proyecto 3GPP era desarrollar sistemas móviles de tercera generación (3G) basados en GSM, GPRS y EDGE (velocidades de datos mejoradas para la evolución GSM). El proyecto se construyó sobre la comunicación de datos en lugar de la voz. Este proyecto evolucionó rápidamente para proporcionar muchas tecnologías diferentes, tales como GSM/EDGE, HSDPA, HSUPA, HSPA, LTE, LTE Advanced. Las velocidades de datos de las diferentes tecnologías que evolucionaron bajo 3GPP. La figura 9 muestra las especificaciones técnicas de velocidad de transmisión de cada una de las tecnologías móvil celular.

Technology	Peak data rates (Mbps)	
	Uplink	Downlink
GSM/EDGE	0.5	1.6
HSDPA and HSUPA	5.76	14.4
HSPA	22	56
LTE	75	300
LTE-Advanced	500	1000

*Figura 9.* Especificaciones técnicas de las tecnologías de la familia 3GPP

Fuente: (Janaka Ekanayake, 2012)

LTE: Es una tecnología que compite con WiMax y admite la movilidad del usuario hasta 350 km / h, cobertura de hasta 100 km, ancho de banda de canal hasta 100 MHz con eficiencia espectral del enlace descendente 30 bps / Hz y el enlace ascendente 15 bps / Hz. tiene la ventaja de que puede admitir una conexión perfecta a redes existentes, como GSM y UMTS.

(López, 2016) Afirma que las ventajas que provee LTE, es una baja latencia y alta capacidad. Totalmente integrado con 3GPP, (grupo de asociaciones de telecomunicaciones que asientan las especificaciones y estándares para un sistema de comunicación global 3G). Movilidad total para más y mejores servicios multimedia. Bajo consumo de energía. Las ventajas radican en que por

parte del proveedor de servicio, debe alquilar la infraestructura de una compañía. Difícilmente disponible en muchos mercados, alto coste de los equipos y falta de experiencia en el diseño de redes.

#### *2.3.4. Aplicación de Tecnologías en redes WAN, FAN, HAN*

##### *Comunicación WAN:*

La comunicación remota se realiza entre la herramienta y los medidores inteligentes es esencial para intercambiar información relevante, como señales de precios o información de tarifas con el cliente. Las redes celulares, WiMAX y las comunicaciones por cable se pueden contar como las mejores tecnologías candidatas para WAN. Es importante destacar que el sistema de distribución de backhaul actúa como un punto de agregación entre FAN y WAN, como una subestación, un concentrador de datos, un punto de acceso de RF o una torre de comunicaciones que recopila la información de medición total y la transfiere a la red de comunicación principal. Además, los puntos de agregación pueden servir como puntos de almacenamiento de energía para la energía de respaldo en el período de interrupciones críticas y otras necesidades específicas. Otra tecnología que se prefieren son las comunicaciones por fibra óptica y microondas para requisitos de gran ancho de banda y comunicación confiable, ya que este sistema es el punto de agregación donde se recopilan grandes cantidades de datos críticos para su transmisión a la parte de atrás. Las tecnologías inalámbricas autorizadas y sin licencia y las tecnologías fijas de comunicación por cable pueden utilizarse para transferir datos desde puntos de agregación a los centros de datos backhaul. Al final, la tecnología de comunicación dependerá principalmente de su rentabilidad y de su capacidad para proporcionar una cobertura adecuada.

### *Comunicación FAN:*

La elección de la tecnología de comunicación varía para FAN de acuerdo con diferentes aplicaciones de red inteligente. Algunas empresas eléctricas prefieren hacer uso de fibra óptica que tengan una baja latencia y un rendimiento de comunicación superior, otros prefieren WiMAX, donde las tecnologías de malla celular y RF no tienen cobertura en el área. Además, las tendencias actuales de comunicación en los sistemas de automatización de distribución y automatización de subestaciones de FAN se basan en el uso de IEC 61850 (Comisión Electrotécnica Internacional), que proporciona interoperabilidad entre dispositivos electrónicos inteligentes y una mejor comunicación de dispositivo a dispositivo, la latencia para los datos de misión crítica de FAN es entre 3-10 ms con la integración del protocolo IEC 61850. Comunicaciones inalámbricas tales como las tecnologías de malla Wi-Fi, WiMAX y de radiofrecuencia (RF) son adecuadas para las comunicaciones FAN.

### *Comunicación de HAN:*

La Asociación de Fabricantes de Electrodomésticos (AHAM) ha realizado investigaciones sobre las tecnologías de comunicación que mejor satisfacen los requisitos de los electrodomésticos inteligentes. Esta investigación ha demostrado que ZigBee, Wi-Fi, HomePlug, Z-wave y M-Bus son los candidatos para la categoría HAN. ZigBee tiene la capacidad de operar en una topología de red en malla, lo que ofrece algunas ventajas, es decir, algunos dispositivos en una malla ZigBee pueden permanecer en modo de suspensión cuando no están activos en la red, lo que resulta en la conservación de energía. Por otro lado, Z-wave es un estándar inalámbrico sin interferencias que fue específicamente diseñado para el control remoto de los dispositivos y ampliamente utilizado

para HAN. Pero las tecnologías Wi-Fi, ZigBee, HomePlug y Z-wave, aun no han sido estandarizados completamente para modelos de información de la capa aplicación.

La tabla 1 muestra las diferentes tecnologías de comunicación que son aplicables para las distintas subredes de comunicación WAN, FAN, HAN.

Tabla 1

*Aplicación de tecnologías de comunicación en subredes WAN, FAN, HAN.*

<b>Sub-Red</b>	<b>Tecnologías de comunicación</b>
WAN	MPLS, WiMAX, LTE, Frame Relay
FAN	PLC, BPL, DLS, EDGE, Metro Ethernet, HSPA, UMTS, LTE, WiMax, Frame Relay.
HAN	Ethernet, WLAN, PLC, ZigBee, Bluetooth, Z-Wave.

Nota: Tomada de (Janaka Ekanayake, 2012)

Un ejemplo de la aplicación de las tecnologías de comunicación alámbricas e inalámbricas en una red inteligente, en sus diferentes subredes WAN, FAN, HAN, se muestra en la figura 10, donde para el despliegue de la red del hogar los dispositivos electrónicos inteligentes se comunican con el medidor inteligente a través de tecnologías como WIFI, Zigbee o PLC. Para la red de campo los sistemas de medición inteligente de cada cliente se comunican a un concentrador o access point mediante una red de malla wireless mesh. Finalmente, para una red WAN, los hogares están conectadas a su servicio eléctrico a través de tecnologías por fibra óptica, de satélite, de microondas o celulares. Una subestación se comunica con una utilidad eléctrica sobre comunicación por la línea eléctrica.



agua, y otros dispositivos en el entorno de una vivienda o edificio para controlar la información al detalle sobre el uso de energía, permitiendo un mejor consumo y también ajustar el patrón de consumo de energía. El objetivo de esta subred es que sea transparente a las superiores, interactuando con ellas independientemente de las tecnologías utilizadas, (ya que no existe una estandarización en las tecnologías a nivel doméstico). Estas redes a su vez pueden estar conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento.

(Jokar, Nicanfar, & Leung, 2011) Afirma que la tecnología de comunicación para la HAN debe usar la menor potencia posible, ya que la eficiencia energética es el objetivo principal de la red inteligente en primer lugar. En América del Norte, Australia, Alemania y el Reino Unido, la tecnología inalámbrica es la dominante para HAN, mientras que, en muchos otros países, especialmente en Europa, el carrier de línea de potencia (PLC) es la tecnología HAN líder. Según un estudio de General Electric, entre WiFi (802.11n) y ZigBee (802.15.4), que son las dos tecnologías que mejor cumplen con los requisitos HAN, ZigBee es al menos dos veces más rentable y eficiente. De hecho, en Norteamérica, ZigBee se ha convertido en el estándar líder para la interfaz inalámbrica HAN.

Si las personas conocen cuánta energía consumen por dispositivo y cuánto les costará esta energía en un período de tiempo determinado, podrían cambiar su patrón de uso de buena gana. Las empresas de servicios también pueden tener derecho a apagar o reducir el consumo de energía de un dispositivo específico en HAN automáticamente durante un corto período de tiempo al transmitir señales de control a HAN a través de medidores inteligentes. Esto puede ser una gran

ayuda para las empresas eléctricas para hacer frente a la sobrecarga causada por las demandas pico de electricidad.

#### *2.4.1. Arquitectura y elementos que componen una HAN*

(Sarijari, et al., 2013) Afirma que, en una red de área del hogar de una Red Inteligente, los posibles tipos de dispositivos son: 1) dispositivos inteligentes, 2) un medidor inteligente, 3) una pantalla en el hogar, 4) almacenamiento y generación de energía distribuida, tal como se indica en la figura 11.

(INER, 2015) Afirma que todos estos dispositivos tendrán capacidades de comunicación bidireccional para realizar las funcionalidades SG HAN, que incluyen:

- Respuesta de demanda: esta función permite a las empresas de servicios públicos enviar un evento de control de carga a los dispositivos SG-HAN a través del medidor inteligente para solicitar el apagado o la demora de la operación cuando la fuente de alimentación está en riesgo. Esta función también permite que los dispositivos SG-HAN, como la lavadora, funcionen solo durante el bajo precio de la electricidad.
- Infraestructura de medición avanzada: esta función se utiliza para fines de medición. Además, las empresas de servicios públicos también lo utilizan para enviar información a los dispositivos SG-HAN, incluidos los precios de electricidad en tiempo real.
- Almacenamiento distribuido de energía y generación distribuida: además de generar y almacenar electricidad para el uso doméstico, esta función también permite que la electricidad se pueda vender nuevamente a los servicios públicos cuando hay un extra,

especialmente durante el alto precio de la electricidad. También es interesante mencionar que, el vehículo eléctrico es también un tipo de almacenamiento de energía en SG-HAN.

*Elementos de una Red de Área de Hogar (HAN):*

- 1) Dispositivos electrónicos inteligentes: Son todos los dispositivos de consumo eléctrico que pueden transmitir información en una red de comunicación. Entre estos dispositivos están los electrodomésticos, calefacción, dispositivos de aire acondicionado, iluminarias, entre otros.
- 2) Medidor Inteligente: (Naruchitparames, Güneş, & Evrenosoglu, 2011) Afirma que los medidores inteligentes son dispositivos programables de estado sólido que realizan muchas más funciones, incluyendo la mayoría o todos de los siguientes: precios basados en el tiempo, datos de consumo para el consumidor y utilidad, medición neta, notificación de pérdida de potencia (y restauración), encendido remoto / apagar las operaciones, limitar la carga para fines de "mal pago" o de respuesta a la demanda, prepago de energía, monitoreo de calidad de energía, detección de robos de energía, comunicaciones con otros dispositivos inteligentes en el hogar y actuar como puerta de enlace (Gateway) entre los dispositivos de hogares inteligentes y entidades externas, proteger la privacidad del usuario al ocultar componentes individuales de la empresa eléctrica.
- 3) Pantallas en el hogar: Para aplicaciones y sistemas de gestión eléctrica inteligente, es necesario del uso de pantallas, con el fin de visualizar la información a detalle del consumo de energía, dispositivos en uso, demanda, patrones de consumo, etc. Estas pantallas o monitores serán el medio el cual el usuario puede interactuar.

#### 4) Almacenamiento y generación de energía distribuida:

(López, 2016) Afirma que la generación de energía distribuida es una red donde los usuarios pueden pasar a ser también proveedores, gracias al desarrollo de las tecnologías de energía renovable, por ejemplo, mediante una instalación solar fotovoltaica en el hogar podría proveer energía para una red inteligente.

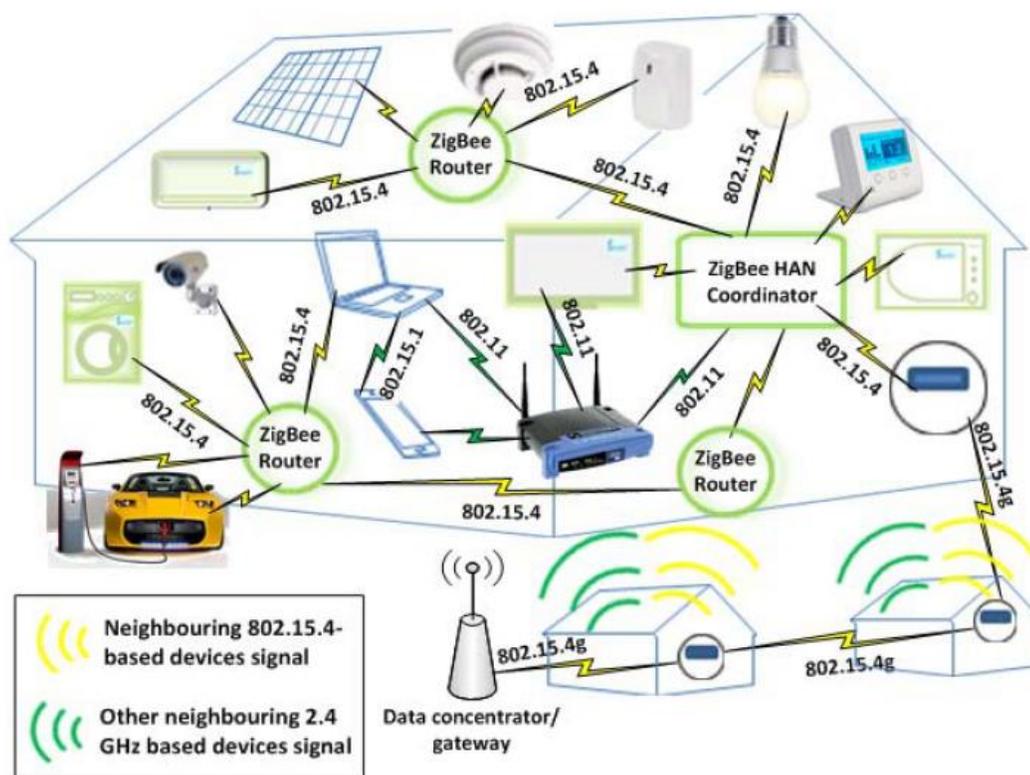


Figura 11. Arquitectura general de una HAN y sus elementos.

Fuente: (Sarijari, et al., 2013)

#### 2.4.2. Protocolos de Comunicación

Un protocolo de comunicación, es el conjunto de reglas que gobiernan la comunicación entre diferentes entidades o dispositivos y se encargan de definir: el qué, cómo y cuándo, se establece una comunicación, por medio de una serie de elementos que lo conforman:

- Sintaxis: Estructura de los datos.
- Semántica: Significado de la cadena de bits
- Temporización: Es la rapidez con la que se comunican los dispositivos.

Los protocolos de comunicación bien pueden ser desarrollados de forma abierta, donde cualquiera puede hacer uso del protocolo, o desarrollados de forma privada, donde determinados fabricantes establecen restricciones y condiciones de uso del protocolo privado, y existen los protocolos de comunicación abiertos con cierta restricción, en la cual múltiples fabricantes pueden utilizar el protocolo, pero antes se debe de adquirir una licencia.

En redes eléctricas inteligentes se han desarrollado una serie de protocolos de comunicación para ambientes de las HAN por diferentes entidades, y puestos en marcha en diferentes dispositivos electrónicos inteligentes del hogar, por ejemplo, en España y Europa, los protocolos de comunicación que más se utilizan son: Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave, RF, Insteon, UPB, Bluetooth Smart, Apple HomeKit, Samsung SmartThings, Thread.

Otros expertos indican que, dependiendo de los electrodomésticos, los fabricantes utilizan las siguientes tecnologías inalámbricas, como ZigBee, WiFi, Z-Wave y RFID, y menor escala tecnologías cableadas como PLC, I2C y SPI para el desarrollo de redes de área del hogar.

En el capítulo 3 se analiza en profundidad cada protocolo de comunicación para una red de área del hogar, la aplicación, características, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

### *2.4.3. Seguridad*

La red inteligente tiene el potencial de brindar eficiencia, flexibilidad, flexibilidad, robustez, participación del consumidor, etc. al agregar una capa cibernética a la red eléctrica y al

proporcionar flujo de energía bidireccional y comunicaciones de datos. Sin embargo, agregar una capa cibernética puede exponer la red inteligente a amenazas de seguridad cibernética.

Las redes de área doméstica (HAN) son subsistemas dentro de AMI, responsables de la transferencia de datos entre los medidores inteligentes y dispositivos eléctricos domésticos. El uso potencial de las comunicaciones inalámbricas y su ubicación en un entorno físicamente inseguro hace de HAN uno de los sistemas más vulnerables de la red inteligente.

#### *Amenazas de seguridad HAN*

(Shein, 2010) Afirma que los activos de infraestructura de AMI se dividen en dominios privados y públicos. El dominio privado incluye sistemas que son similares a los activos de tecnología de la información (TI) estándar, como el sistema de gestión de datos del medidor (MDMS) y la cabecera AMI. Estos sistemas contienen una gran cantidad de datos críticos; sin embargo, están ubicados en un centro de datos que es físicamente un entorno seguro. Al asegurar estos sistemas, se aplican varias soluciones de seguridad disponibles y mejores prácticas estándar para centros de datos. Los activos de dominio público, por otro lado, son en su mayoría diferentes de los sistemas de TI estándar. Los recopiladores de datos, los medidores inteligentes, los electrodomésticos, etc., emplean una variedad de tecnologías inalámbricas y se encuentran en un entorno inseguro. Estos sistemas están expuestos al público, lo que los hace más vulnerables a las amenazas de seguridad. Al mismo tiempo, las soluciones de seguridad existentes no son aplicables a estos sistemas.

Otro problema desafiante en la seguridad del futuro HAN es el hecho de que, a diferencia de las HAN tradicionales, donde el propietario es el único que se beneficia del buen comportamiento y la seguridad de la red, aquí participan dos partes. Muchas personas con motivaciones diferentes pueden comprometer los aspectos de integridad, confidencialidad y disponibilidad de la seguridad de HAN. Un cliente no ético, que quiere reducir su carga de electricidad, o para obtener el control

de un dispositivo especial, que de acuerdo con el acuerdo de utilidad del cliente está bajo el control de la utilidad, podría manipular los informes de uso o los mensajes de control. Un adversario puede enviar falsas señales de control a los dispositivos HAN o realizar un ataque de denegación de servicio (DoS) para interrumpir simplemente la disponibilidad del servicio de sus vecinos o para perpetrar intenciones maliciosas más. Un espía podría escuchar el tráfico de la red para obtener información valiosa sobre el uso de energía de un hogar. (Shein, 2010) Afirma que se transmitirán casi 9,000 puntos de datos por hogar anualmente, lo que demuestra por qué la privacidad es una gran preocupación en el contexto de la red inteligente y por qué empresas como Google han mostrado interés por esta tecnología.

### **2.5. Sistema de Medición inteligente:**

Los medidores inteligentes (Smart meter), en términos generales son dispositivos que permiten registrar diversas variables eléctricas, tanto para facturación horaria como para calidad de servicio. Además de transmitir alertas de pérdidas de suministro, reprogramación tarifaria a distancia, cambio de horario verano e invierno vía remota y efectuar cortes y reposiciones a distancia, entre otras acciones.

Aunque cada experto tiene su propia definición de AMI, existe un acuerdo general sobre características y funcionalidades mínimas de un sistema de medición inteligente. El consultor propone la siguiente definición de medidor inteligente que se compone del siguiente set de funcionalidades básicas:

1. Los Medidores registran consumo durante periodos de tiempo específico (máximo 15 minutos). Considera la posibilidad de tomar las muestras de energía y potencia cada un determinado lapso de tiempo.

2. Medición bidireccional, positivo aditivo. Hace referencia a la posibilidad de medir tanto los retiros de electricidad que el consumo efectúa de la red como eventuales inyecciones que el efectúe al sistema, donde esta condición se presenta en el caso que el genere e inyecte sus excedentes al sistema. De igual manera la componente reactiva deberá ser considerada en ambas direcciones, con lo cual se tiene que estos medidores deben ser capaces de medir en los cuatro cuadrantes.
3. Canal de comunicación que permite a la empresa, obtener lectura de la demanda y emitir órdenes al medidor para realizar tareas específicas. Este atributo da cuenta de la posibilidad que el sistema de administración de medidas de la empresa distribuidora pueda obtener la información de consumo de los clientes, y eventualmente en caso que la opción tarifaria del cliente lo permita, ella pueda tomar medida sobre determinado equipamiento.
4. El medidor está conectado a un sistema que permite informar al cliente en tiempo real sobre su uso actual u otra información diseñada para ayudar al cliente a gestionar el costo y uso de electricidad, Este atributo se relaciona con la capacidad de informar en línea sobre parámetros que le permitan definir a este sobre la conveniencia de aumentar o disminuir consumos.
5. Corte-reposición remoto. Se refiere a la posibilidad de efectuar el corte y reposición del suministro, asociado al no pago de la cuenta correspondiente, de manera remota sin la necesidad de enviar a personal a que efectúen dicha acción.
6. Limitación de potencia para gestión de planes de control de la demanda. Se refiere a la posibilidad de ajustar los consumos de los clientes a un determinado nivel de potencia, ya

sea porque la tarifa del cliente lo permite o porque si bien se ha efectuado el corte del suministro por razones de no pago, se proporciona un nivel de consumo básico al usuario.

7. Opciones multi-tarifas / Tiempo de Uso y precios flexibles. Este atributo se refiere a la posibilidad que el usuario pueda optar en línea por distintas opciones tarifarias.
8. Alerta de ausencia de tensión: Se refiere a la capacidad de los medidores e comunicar a la central que el equipo no tiene tensión lo que se puede asociar a la falla del sistema de distribución.

#### *Variables de medición Inteligente*

Las variables eléctricas que son consideradas en la medición inteligente son:

- Tensión RMS, media, Máximo y Mínimo. (V fase y V línea)
- Frecuencia, media, Máximo y Mínimo.
- Potencia Aparente y Factor de Potencia.
- Distorsión armónica THD. (hasta la armónica 31)

En el caso de considerar todas estas variables, ellas se pueden integrar en tiempos menores de hasta 1 minuto, pero se almacenan menos datos. No obstante, lo anterior, la capacidad de almacenamiento supera los dos meses.

Respecto de los parámetros de desempeño de los sistemas de comunicación asociados a los medidores inteligentes, para los cuales deberían establecerse exigencias mínimas de diseño y operación se tiene por ejemplo que para el sistema AMI, se define la confiabilidad como la cantidad de medidores que se comuniquen para ser leídos una vez al día. En este caso un 95% es

aceptable, pero entre 97% y 98% el sistema está operando en forma correcta, ya que habrá medidores que no pueden comunicarse.

Con respecto a la latencia, que se puede asociar al tiempo de respuesta de un medidor frente a una consulta del sistema central, se pueden considerar dos conceptos:

- Latencia de medidor por sí solo, que corresponde a una consulta tipo “sobre demanda” a un solo equipo. En este caso el tiempo de respuesta es sobre 10 segundos, pudiendo llegar a demorar 20 segundos. En el caso de PLC twacs y RF Mesh el tiempo de respuesta es alrededor de 20 segundos aproximadamente.
- Latencia para un conjunto de medidores, asociada a una consulta masiva de equipos. En este caso hay una mayor dependencia de la tecnología de comunicación y de la cantidad de equipos interrogados. En el caso de PLC twacs la consulta de 5.000 medidores se puede realizar en una hora.

### *2.5.1. Principales componentes de la Infraestructura de medición avanzada*

AMI considera el sistema de software y hardware que incluye los medidores en un lado y la aplicación de uso de datos en el otro. Las componentes principales son:

- Dispositivo de comunicación (AMCD). Este dispositivo es parte del medidor o como un componente externo, que se encarga de transmitir las lecturas desde el medidor directamente o indirectamente al computador de control.
- Computador de control o colector (AMCC) que se utiliza para recibir o enviar y temporalmente almacenar las lecturas de medidor antes de enviar a los servidores de la compañía.

- Red de comunicación de área amplia (WAN) que transmite entre AMCC y los servidores de la compañía.

Un sistema AMI se suele complementar con un sistema de gestión de datos de medidor (MDM) y un repositorio de datos de medición (MDR), que permiten una administración global de la información recopilada. A continuación, en la figura 12, se presenta un diagrama con la relación de las componentes principales de un sistema AMI:

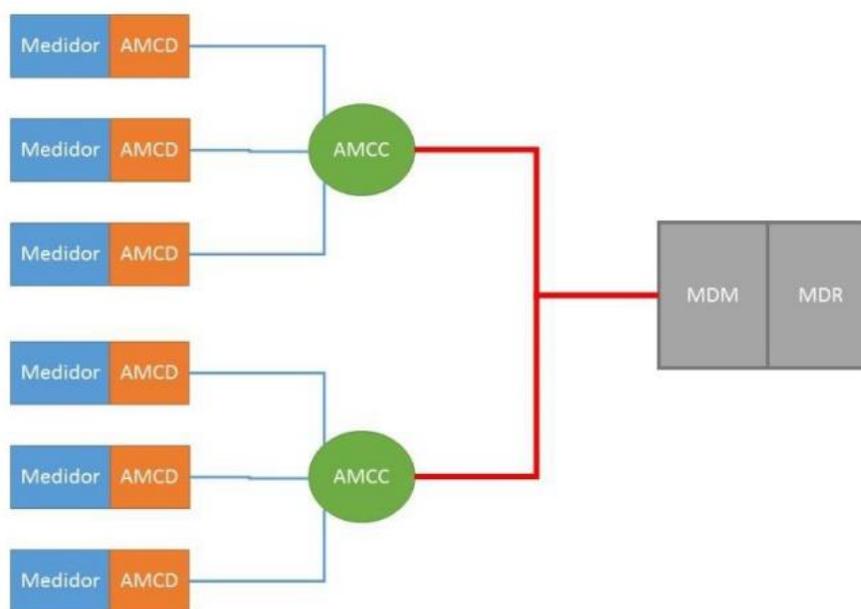


Figura 12. Componentes Sistemas AMI

Fuente: (Consultores:, 2016)

### 2.5.2. Variables de medición:

En un sistema de medición inteligente el flujo constante de información desde consumidores hacia distribuidora y viceversa es de gran importancia para ejecutar las siguientes acciones:

- Lectura de los medidores en forma remota y automática.
- Desconexión y conexión remota del suministro, mediante la existencia de un relé operado según reglas del negocio.
- Posibilidad de integrar los procesos de facturación existentes. A través de la comunicación fluida del sistema comercial y MDM.
- Limitación remota, de la potencia de suministro, produciendo una desconexión del consumo cuando cliente supere cierto nivel de potencia.
- Detección de robo de energía, con la existencia de sensores de intervención del medidor.
- Optimización de redes y detección de pérdidas técnicas, gracias a software de balances de energía.
- Disposición de mayor información para los consumidores sobre las unidades medidas y facturadas.
- Respuestas de los consumidores, ante estímulos de precio u otros incentivos.
- Incorporación de micro generación, por parte de los consumidores, al sistema eléctrico de la suministradora del servicio, por la existencia de una contabilización de la energía en forma bidireccional.

### *2.5.3. Tecnologías de Comunicación en sistemas AMI*

Son varios los dispositivos y equipos utilizados en sistemas AMI disponibles en el mercado, pero la gran diferencia radica en la tecnología usada para comunicación entre los medidores y los servidores de la compañía eléctrica. En la actualidad hay dos tecnologías de comunicación claramente predominantes en los sistemas AMI disponibles en el mercado:

- Portador de línea de potencia (PLC): La tecnología PLC aprovecha la red eléctrica para convertirla en una línea digital de transmisión de datos. Algunos sistemas pueden ser exclusivamente BT o MT, mientras que otros son capaces de transmitir señales a través de líneas en ambos niveles de tensión.
- Para el caso de PLC de baja frecuencia (PLC BF) incluye AMCD en cada medidor, un transformador en la cabecera del alimentador para inyectar la señal al alimentador, un amplificador de señal y la unidad procesadora. Este tipo de tecnología también se conoce como PLC Twacs.
- Para el caso de PLC de alta frecuencia (PLC AF), además del AMCD en cada medidor, se debe incluir en cada transformador de distribución un colector que se comunica con el MDM centralizado mediante una red WAN.

La figura 13 muestra la tecnología de comunicación PLC utilizada en sistemas AMI

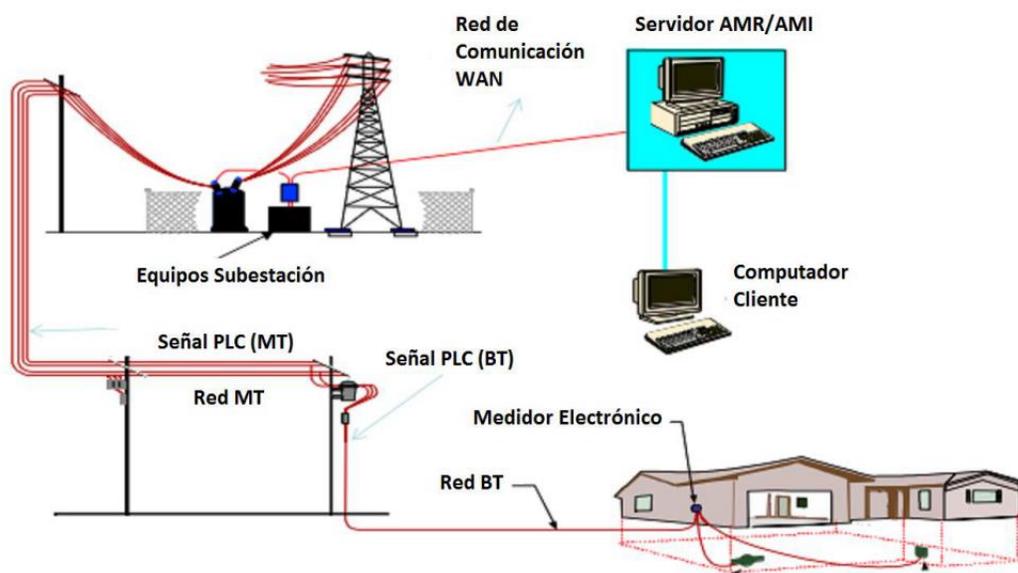


Figura 13. Diagrama Red PLC Simplificada

Fuente: (Consultores., 2016)

Radiofrecuencia (RF): La técnica RF hace uso del espacio aéreo para la transmisión de señales y consiste en nodos principales equipados con antenas sirviendo de repetidoras. Usualmente operan a UHF (frecuencia ultra alta). Se clasifican en dos grupos principales:

- Largo Alcance (RF de largo alcance)
- MESH (RF-Mesh)

Sistema RF de largo alcance, utiliza concentradores que reciben los datos desde el dispositivo de comunicación en los medidores (AMCD) y los envían a continuación a MDM mediante una red WAN. La figura 14 muestra la conformación el sistema de radio frecuencia de largo alcance.

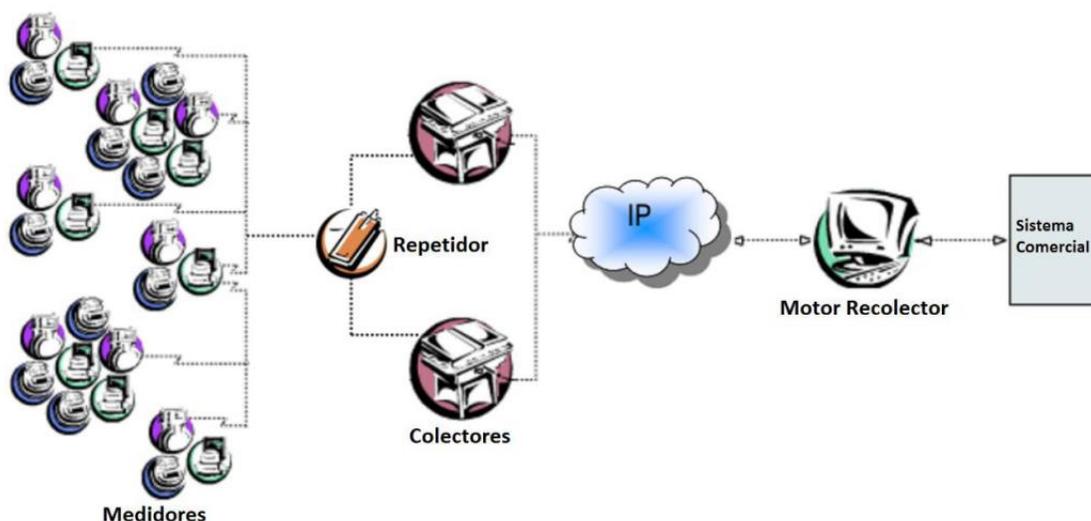


Figura 14. Sistema RF de Largo Alcance en SG

Fuente: (Consultores:, 2016)

Los sistemas RF de largo alcance pueden ser difícil de expandir con una buena calidad de señal en ciertas condiciones geográficas. Para enfrentar esta dificultad se desarrolla un nuevo tipo de red denomina RF-Mesh, donde cada nodo puede operar como receptor y trasmisor. Esto permite expandir el alcance geográfico de los sistemas RF y reducir errores o fallas de comunicación. La figura 15 muestra cómo opera una red RF Mesh en sistemas AMI.

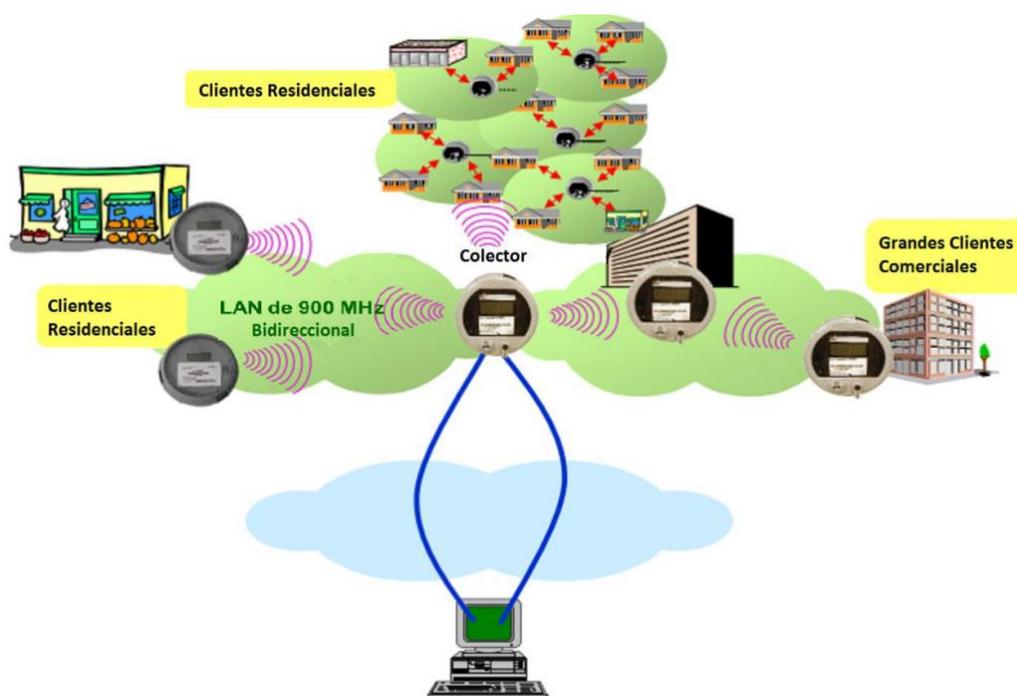


Figura 15. Sistema RF Mesh en una AMI

Fuente: (Consultores:, 2016)

## 2.6. Despliegue de Redes Inteligentes

### 2.6.1. América

#### Canadá:

El sistema eléctrico canadiense refleja altos estándares de confianza y capacidad, siendo el quinto productor a nivel mundial, con exportaciones de aproximadamente 51GWh anuales a los Estados Unidos en los últimos periodos. Esta gran estructura energética se basa en enormes plantas de generación eléctrica que aprovechan economías de escala derivadas de una concentración de recursos a nivel regional, fundamentalmente el recurso hidráulico en el norte del país, y en una desarrollada red de interconexión provincial integrada a los EEUU en conjunto con un eficaz sistema de intercambio eléctrico interestatal. A pesar que el sistema electrificación canadiense

tiene una estructura eléctrica desarrollada y brindar energía a un bajo costo, se está explorando nuevas tecnologías que permitan la modernización de su red eléctrica, con el propósito de incrementar los niveles de confianza, automatización, seguridad en la red y la búsqueda de un sistema que respete el medio ambiente. Es por ello que se estableció la asociación Smart Grid Canadá, la cual se compone de varias empresas, instituciones académicas, compañías tecnológicas especializadas en Smart Grids, y otras entidades. Generalmente esta asociación se centra en tareas de difusión de información y concientización en redes inteligentes, investigación tecnológica, estrategias para la integración de energías renovables, financiándose con aportes voluntarios de sus miembros.

Con respecto al despliegue de tecnología de medición inteligente, el Ministerio de electrificación de Canadá estableció objetivos de implementación de contadores inteligentes, el despliegue propuesto fue de 800,000 instalaciones de medidores inteligentes para el 2007 y una cobertura completa para todos los ambientes residenciales y de pequeñas empresas para el 2010. Entre las entidades involucradas en la medición inteligente incluyeron el Ministerio, Operador Independiente del Sistema Eléctrico (IESO), la Junta de Energía de Ontario (OEB) y otras 73 empresas locales de distribución de electricidad de Ontario, incluida Hydro One. Para mayo de 2014, ya había alrededor de 4.8 millones de medidores inteligentes instalados en Ontario, que cubrían la parte residencial y pequeñas empresas, y representaban el 45% de toda la electricidad consumida en la provincia. (Smart Metering Initiative, 2014)

#### *Brasil:*

En Brasil, pese a la modernización del sector eléctrico, todavía conserva características estructurales muy similares a las iniciales al momento de la implementación del mercado. Los

cambios en las redes de distribución, en los niveles de automatización, en las fuentes puntuales de generación distribuida y en la medición electrónica, han sido graduales y tienen un alcance limitado, sin lograr caracterizar completamente el concepto de Redes Energéticas Inteligentes.

El estado tiene un papel fundamental como promotor y creador del proceso, en un movimiento similar a lo que Estados Unidos y la Unión Europea han hecho, respetando las especificidades de la realidad brasileña. El estado además de proponer lineamientos de políticas públicas que inducen y ordenan a los distintos actores involucrados, deberá crear mecanismos de seguimiento, evaluación e incentivos que sean compatibles entre sí, lo que permitirá maximizar el beneficio social de esta evolución tecnológica. Además, la implementación de redes eléctricas inteligentes de forma sostenible, depende de la creación de una infraestructura adecuada y apropiada para las Telecomunicaciones y Gestión de la Información (IT).

#### *Estados Unidos:*

En este país se tiene como política energética, proporcionar un suministro de energía con un nivel de seguridad alto, mantener bajos costes de energía y proteger el medio ambiente reduciendo el uso de fuentes de generación de energía no renovables y altamente contaminantes, a través del desarrollo de nuevas fuentes de energía renovables, y la aplicación de nuevas tecnologías que permitan una eficiencia energética. A pesar de que EE.UU no forma parte del tratado de París, cuyo objetivo es la reducción de las emisiones de carbono, ha invertido en recursos energéticos, para modernización de su infraestructura energética y uso de energías renovables. (López, 2016)

Según (López, 2016) el Informe de la Federación Mundial de redes inteligentes (The Global Smart Grid Federation) de 2012, menciona que EE.UU se estableció reducir las emisión de CO<sub>2</sub> alrededor del 17 % al finalizar el 2020. Por lo que varias empresas de electricidad del país, han puesto en marcha el despliegue e instalación de 20.334.525 infraestructuras de medición

inteligente, por cuanto se tiene el 14% como tasa de penetración nacional de contadores inteligentes, lo cual es un gran aporte dentro del cambio del tradicional sistema energético hacia las redes eléctricas inteligentes.

### *2.6.2. Europa*

Según la Europa 2020, la unión europea se ha propuesto lograr un crecimiento inteligente, sostenible e integrador en un enfoque del cambio climático y energía, sus metas son:

1. Reducir antes de 2020 las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% con respecto a los niveles de 1990, y un 30% de reducción las emisiones si los demás países desarrollados asumen el mismo compromiso y contribuyen con el acuerdo general de alcance mundial.

2. Aumentar al 20% la cuota uso de energías renovables en el consumo final.

3. Aumentar un 20% la eficiencia energética.

La Plataforma Tecnológica Europea de Redes Eléctricas del Futuro, también conocida como Smart Grids ETP, comenzó a funcionar en el año 2005 y tiene como objetivo formular y promover una visión para el desarrollo de las redes eléctricas europeas hacia el año 2020 y más allá.

#### *Alemania:*

Alemania, es uno de los países económicamente exitosos y eficientes del mundo, se encuentra trabajando fuertemente en el desarrollo de energías renovables, reducción de la demanda energética para lograr la seguridad de suministro, uso continuo de energía proveniente de centrales nucleares o de carbón hasta que puedan ser reemplazados por una generación más limpia y segura.

La regulación del sector alemán, está a cargo del Ministerio Federal de Economía y en ciertos ámbitos del Ministerio Federal de Asuntos Ambientales. A su vez, la Agencia Federal de la Red, organismo dependiente del Ministerio Federal de Economía, posee un rol importante en la

implementación de las políticas regulatorias aplicables para el sector eléctrico. Adicionalmente la Comisión de Monopolios es considerada como el organismo más importante consultativo en políticas de competencia de SG y las autoridades estatales tienen impacto en las políticas regulatorias.

### *España:*

España se propuso a cambiar su modelo energético, según los lineamientos de Europa 2020, donde se hace énfasis en el uso de energías renovables, aprovechamiento y gestión de la demanda, integración generación distribuida, almacenamiento de energía y coordinación internacional de los mercados, entre otros. Con lo que corresponde al desarrollo de redes eléctricas inteligentes en España, está viene regulada por algunos decretos, partiendo de El Real Decreto 809/2016, donde se estableció que para 2007, se instalen equipos de medición con características de telegestión, luego se estableció el Decreto 1110, en el año 2007, donde se ejecuta el plan de sustitución de medidores, para el sector domiciliario, los medidores tenían la capacidad de discriminación horaria y telegestión, el despliegue fue del 30% de medidores en todo España, en su primera etapa y se consideró que para finales del 2018 alcanzar el 100% de despliegue de medidores inteligentes en el país, es decir alcanzar la cifra de 28 millones de medidores inteligentes sustituidos.

### *Tecnologías de Comunicación aplicadas en SG en Europa*

(Andreadou, Olariaga , & Fulli, 2017) Afirma que muchos son los proveedores de energía que han comenzado a reemplazar sus medidores tradicionales por otros inteligentes, por ende, muchos proyectos relevantes han sido desplegados y puestos en ejecución en varios países de Europa. Pero hay que destacar que la situación no es homogénea en toda Europa, ya que mientras algunos países han logrado avances significativos hacia las redes inteligentes mediante la implementación de su

medidor inteligente, otros se prevén realizar programas piloto en el futuro. También es digno de mención que algunos países aplican diferentes tecnologías de medición inteligente, mientras que en otros se elige una tecnología dominante.

Una de las tecnologías que desempeña un papel importante dentro de las redes del hogar y medición inteligente es Power Line Communications. Sin embargo, hay una variedad de estándares / especificaciones que se pueden seleccionar. La Tabla 4 resume la información con respecto a las principales tecnologías aplicadas para medidores inteligentes en varios países de Europa.

Las tecnologías de comunicación que se señalan representan, las principales tecnologías seleccionadas para un despliegue de medidores inteligentes a gran escala, como en el caso de Italia. No se excluye el hecho de que otras tecnologías también se pueden usar o que ya se han seleccionado para aplicaciones específicas. Además, en esta sección, también se brinda información sobre estimaciones aproximadas de inversiones y la cantidad de medidores inteligentes instalados, que se refieren a un proyecto específico / acciones tomadas por un proveedor de energía específico. Es probable que se hayan llevado a cabo otros proyectos que involucren otros escenarios de inversiones y medidores inteligentes. También en algunos casos, se hace hincapié en la comunicación entre el medidor inteligente y un dispositivo para fines de información del cliente, como la pantalla en el hogar.

En el Reino Unido, la tecnología especificada para este alcance es inalámbrica (segunda versión de las especificaciones técnicas del equipo de medición inteligente) y, en particular, la especificación de ZigBee debe soportarse dentro de la banda de 2400-2483.5 MHz. En Alemania, uno de los proveedores de energía ha habilitado la información del cliente sobre los consumos

eléctricos a través de Internet. La tabla 2 se resume el despliegue de tecnologías en varios países de Europa.

Tabla 2

*Tecnologías aplicadas para medidores inteligentes en varios países de Europa.*

<b>País</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Estándar / especificaciones</b>
España	NB-PLC	Meters & More, PRIME
Alemania	PLC - GPRS	IEC 62056-21, IEC 14908 (algunos casos)
Francia	NB-PLC	G3-PLC, IEC 61334-5-1
Italia	NB-PLC	Meters & More
Ucrania	NB-PLC, WAN	IEC 62056-21, Comunicación basada en estándares abiertos (algunos casos)
Grecia	NB-PLC, GSM, GPRS	IEC 62056-21, IEC 14908 (algunos casos)
Suecia	NB-PLC, GSM, GPRS	IEC 62056-21, IEC 14908 (algunos casos)

Fuente: (uribe, Angulo, de la Vega, & Arzuaga, 2017)

### 2.6.3. Asia

#### *China:*

China, considerado uno de los países más consumidor de energía eléctrica, tiene graves problemas de contaminación ambiental por el uso de combustibles fósiles como fuente principal para la generación de energía. Por lo que China está cambiando sus estrategias para usar la energía renovable, aumentar la eficiencia y cultivar el ahorro de energía. Las políticas energéticas de China priorizan la conservación de los recursos nacionales, la protección del medio ambiente, la promoción de la innovación científica y tecnológica, profundización de la reforma, la ampliación

de la cooperación internacional y en mejorar la vida de las personas. El desarrollo de las redes inteligentes en China es una de las prioridades energéticas. Estas incluyen la mejora de la eficiencia energética, aumento en la introducción de las energías renovables y la reducción de las emisiones de carbono. El gobierno chino ha encargado a organismos como La Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma (NDRC) la misión de supervisar los planes de desarrollo de redes inteligentes, el control de los precios de la electricidad y la revisión y aprobación de los proyectos de redes inteligentes.

China se estableció desde hace varios años en el mercado de las redes eléctricas inteligentes y ha traído inversiones extranjeras directas (IED), como las de General Electric, Siemens, ABB y otras. Se estima que China en la próxima década invertirá USD 75,0 mil millones en infraestructura de red inteligente. En 2016, el mercado de redes inteligentes de China representó 1/3 del mercado mundial de redes inteligentes. Según Goldstein Research pronostica que el tamaño del mercado de la red inteligente de China alcanzará los USD 23.800 millones para el 2024. La red de computadoras, el aumento de las inversiones en la infraestructura de contadores automáticos para avanzar en la comunicación bidireccional, el desarrollo de software, el gasto público y más son algunos de los factores que desencadenan el crecimiento del mercado de la red inteligente de China. Las ciudades de primer nivel tienen la mayor participación del 62.1% en 2016, gracias a la construcción de ciudades inteligentes impulsadas por el suministro de electricidad a través de redes inteligentes, como en Beijing. Las ciudades de segundo nivel están en el camino de convertirse en ciudades inteligentes, y así en la próxima década su presencia de suministro de energía de la red inteligente aumentará a una tasa de 7.2% anual.

### *Japón:*

El plan de energía estratégica de Japón 2010, se basa en la seguridad energética, la protección del medio ambiente, suministro eficiente, el crecimiento económico y la reforma de la estructura industrial de la red energética. Entre sus ambiciosos objetivos para el año 2030 están: elevar su independencia energética al 70 %, reducir a la mitad las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector residencial y el mantenimiento y la mejora de la eficiencia energética en el sector industrial colocándola en el nivel más alto del mundo. Tras el desastre nuclear de Fukushima el Gobierno japonés ha adoptado por la medición inteligente, como parte fundamental en la gestión de la demanda. Tokyo Electric Power Co. (TEPCO), la compañía eléctrica de Japón, en unión con el gobierno, desplegaron alrededor de 27 millones de contadores inteligentes para el sector residencial en el 2014, a través los medidores, permitirá el establecimiento de la medición remota y proporcionar a los usuarios datos detallados sobre la gestión de energía.

### *2.6.4. África:*

#### *Sudáfrica:*

El elemento clave para que Sudáfrica logre la eficiencia energética propuesta, es mediante la introducción de la red eléctrica inteligente. Sin redes inteligentes, la integración a gran escala es imposible. Es por ello que se implementó el Instituto Nacional de Desarrollo Energético de Sudáfrica (SANEDI), con la visión de tener un sistema de electricidad desarrollado y tecnológicamente avanzado, inteligente, interactivo, flexible y eficiente, para que el uso de energía de Sudáfrica sea sostenible, hasta el día de hoy, SANEDI ha supervisado diez proyectos piloto en todo el país de redes eléctricas. A través de un Memorando de Acuerdo firmado con el Departamento de Energía, el programa de redes inteligentes de SANEDI tiene la responsabilidad

de implementar el programa de redes inteligentes financiado por donantes de la Unión Europea con respecto a los componentes que abordan la introducción de conceptos de redes inteligentes dentro de la distribución eléctrica sudafricana.

(Kennedy , 2012) Afirma que el proyecto desplegado por la Comisión de Suministro de Electricidad (ESCOM o ESKOM) denominado AMI Pilot Project - Homeflex Project, se puso en marcha en el 2008 y con el objetivo de frenar los constantes cortes de energía, se estableció implementar sistemas de medición inteligente en este país, llevándose a cabo entre el 2009 y 2012 la primera fase de despliegue de 10000 contadores inteligentes en las ciudades más grandes del país, pero solamente se instalaron 3.232. Ya para la segunda fase se estableció implementar 110000 medidores. Actualmente el despliegue de sistemas de medición avanzado es alrededor 120000 contadores, que además de la medición inteligente cumplen con tareas de control de tarifas para consumidores que sobrepasen los 1000kWh. (eskom, 2016) Menciona que se encuentra en ejecución desde 1 de marzo de 2016 un programa de implementación de medidores prepagos inteligentes en las ciudades de Sandton y Midrand, donde se pretende desplegar la cantidad de 10000 medidores, los cuales se proporcionan sin ningún costo y especialmente son destinados para sus clientes residenciales. Además, que se ejecuta una serie de capacitaciones a sus clientes, sobre el uso adecuado, concientización y beneficios de la medición preparada, eficiencia energética y otra información útil a sus clientes.

#### *2.6.5. Oceanía:*

##### *Australia*

En este país las principales centrales de generación eléctrica están basadas en combustibles fósiles, como el carbón y otras tecnologías térmicas, que representan el 87% de la generación eléctrica de Australia, siendo uno de los países con mayor nivel de emisiones de gases de efecto

invernadero, por lo que debido a esta situación es necesario la utilización de energías renovables y eficiencia energética, se ha establecido la meta que para el 2020 se produzca el 20% de electricidad a través de energías renovables. Otros problemas que se encuentran en los sistemas de generación de energía eléctrica son los crecientes costos de electricidad, infraestructura obsoleta y la demanda creciente de energía del sector industrial y residencial. Dada la problemática que tiene el sector eléctrico, Australia se ha visto en la necesidad de implementar nuevas tecnologías innovadoras, siendo las Redes Eléctricas Inteligentes una solución adecuada para tales problemas y así mejorar las operaciones de las empresas de servicios públicos y proporcionarán confiabilidad de la red.

El gobierno australiano estableció ciertos programas de despliegue de medidores inteligentes en el año 2012, a través de la compañía de distribución de electricidad Jemena Electricity Networks (JEN), donde se desplegaron 310.000 contadores inteligentes a consumidores residenciales y pequeños comercios, culminándose el despliegue al 100% a finales del 2014.

Con respecto a las redes inteligentes del hogar en Australia, la automatización del uso final de la electricidad en el hogar es una parte clave de una red inteligente madura, permitiendo a las redes de rechazar o desconectar la energía de un hogar en función del cliente. Para ello es necesario la instalación de infraestructura más allá del medidor inteligente, incluyendo el uso de redes de área doméstica (HAN) habilitadas con tecnología ZigBee y Wi-Fi en los electrodomésticos inteligentes.

## CAPITULO III

En el presente capítulo, se analiza los protocolos más utilizados para establecer comunicación en una red de área del hogar, éste análisis se basa en la investigación bibliográfica exploratoria, donde se analizaran los resultados obtenidos en proyectos pilotos de redes eléctricas inteligentes, proyectos en ejecución, o artículos científicos donde se pone en discusión el uso eficiente de comunicación en los diversos dispositivos que intervienen en una red de área del hogar para una red eléctrica inteligente.

### **3.1. Requerimientos de una red HAN**

Para el adecuado estudio de protocolos de comunicación es necesario describir cuales son las características o requerimientos que debe tener una aplicación en un ambiente de la red del hogar. Los requisitos a nivel de las comunicaciones para las principales aplicaciones ejecutadas en una red de área del hogar son:

#### **3.1.1. Tecnología.**

Una HAN básicamente se caracteriza por la agregación de diversos dispositivos en una misma red en un hogar con el fin de gestionar el uso de energía, por lo que para la interconexión de múltiples equipos no es aplicable el uso de tecnología con un medio de transmisión cableado para un despliegue total de una red para el hogar, ya que si se podría usar dicha tecnología para la interconexión de sensores o nodos que requieran una transmisión más fiable o mayor ancho de banda, por lo que es recomendable para este tipo de ambiente HAN, el uso de medios inalámbricos, o debido a la aplicación que se requiera es necesario el uso de una red híbrida, comprendida en entre tecnología inalámbrica y cableada. Por otro lado el uso de tecnología inalámbrica en una red de área del hogar trae consigo grandes beneficios, siendo éstos, la facilidad en la instalación,

reducción de costos de implementación, tiempo empleado en su instalación, despliegue de una red escalable, pero hay que considerar que la seguridad puede ser afectada en redes inalámbricas, si no consideramos adecuadamente este parámetro.

### **3.1.2. Potencia.**

(Jokar, Nicanfar, & Leung, 2011) Afirma que la tecnología de comunicación para aplicaciones HAN debe usar la menor potencia posible, debido a que la eficiencia energética es el objetivo principal de la red eléctrica inteligente.

### **3.1.3. Distancia.**

La cobertura o distancia de un sistema HAN se establece en unos cuantos metros, por lo que (Cano, Ranalkar, & Amoo, 2016) afirma que la red de área del cuerpo (BAN), y la red de área personal (PAN), se establecen a una escala pequeña de cobertura que varía entre 12 y 50 metros, la cual es muy utilizada en aplicaciones del hogar, donde el usuario debe estar en movimiento y no necesita realmente mucha experiencia a tareas tales como agregar, eliminar componentes de la red.

### **3.1.4. Latencia.**

(Energy, 2010) Afirma que para un ambiente de red de área del hogar, como en administración de energía doméstica (HEM) o infraestructuras de medición avanzada (AMI), la latencia no es crítica. Según Verizon el tiempo de latencia razonable para las aplicaciones en el hogar debe ser de 2 a 15 segundos. (Power Systems Engineering Research Center, 2012) Afirma que la tecnología de comunicación empleada, deber ser capaz de proporcionar comunicaciones de baja latencia desde la generación de datos o el punto de recolección hasta el destino final. Para la aplicación AMI, una mayor latencia es tolerable para los datos recopilados de los medidores inteligentes al

centro de control, pero hay comandos de control en la otra dirección (desde el centro de control a los contadores inteligentes) para controlar las cargas y la conexión / desconexión remota que necesitan para comunicarse de inmediato.

(Murat, Manisa, & Saifur , 2014) Asegura que la lectura del medidor bajo demanda en un sistema AMI, permite que se tomen lecturas cuando sea necesario, por ejemplo, cuando una empresa de servicios públicos necesita responder las consultas de los clientes sobre su uso, o para rellenar la información faltante. Una carga útil típica es de 100 bytes para una transmisión de datos desde un medidor a una utilidad con un requisito de latencia inferior a 15 s.

Según el Departamento de Energía de EE. UU, nos detalla los requisitos necesarios de latencia para para aplicaciones Smart Grid, la tabla 3 resume las aplicaciones con sus respectivos requisitos de latencia recomendados.

Tabla 3  
*Requisitos de latencia para aplicaciones smart grid.*

<b>Aplicación Smart Grid</b>	<b>Latencia recomendada (ms)</b>
Medición en tiempo real	12 a 20
Monitorización en tiempo real	20 a 200
Respuesta de la demanda	500 a 2000
Aplicaciones para el hogar	2000 a 15000

Nota: Latencia para en aplicaciones en Smart grid.

Fuente: (Meiling, Schmidt, & Steinbach, 2015)

### **3.1.5. Frecuencia de Operación:**

(Kilbourne & Bender, 2010) Afirma que las aplicaciones SG pueden necesitar rangos de frecuencia más bajos, para proporcionar comunicación de alta calidad y rentable en toda el área de

servicio del hogar. Los rangos de frecuencia más bajos permiten que las señales de radio superen los problemas de visibilidad directa, por ejemplo, arbustos, el desvanecimiento de la lluvia y la penetración a través de las paredes. Además, que provee mayor cobertura debido a que la atenuación en el aire es menor para rangos de frecuencia altos.

(Murat, Manisa, & Saifur , 2014) Afirma que las aplicaciones HAN, que están relacionadas con el envío y recepción de datos de medición eléctrica desde un dispositivo a un controlador dentro de las instalaciones del cliente. Estas aplicaciones no requieren que los datos se transmitan a alta frecuencia, dado que las aplicaciones ocurren dentro de edificios residenciales. Por lo tanto, los requisitos de comunicación para las aplicaciones HAN son bajo de consumo de energía, bajo costo, simplicidad y comunicación segura.

Es importante considerar que la frecuencia de operación para redes HAN, son en general independientes de la tecnología, es decir que típicamente se pueden utilizar diferentes tecnologías dependiendo del fabricante usando la frecuencia.

### **3.1.6. Confiabilidad:**

Este requerimiento define cuán confiable el sistema de comunicación puede transferir datos de acuerdo con los requisitos específicos. Los nodos de comunicación en una HAN siempre deben ser confiables para la continuidad de las comunicaciones. Algunas de las aplicaciones SG, como la automatización distribuida, esperan una comunicación de datos altamente confiable, y algunas de ellas pueden tolerar pequeñas interrupciones en la transferencia de datos.

(Energy, 2010) Indica que debido a que las aplicaciones en el hogar están destinadas principalmente a informar a los consumidores sobre su uso de energía, no es probable que dichas aplicaciones se consideren como "de misión crítica", y el nivel requerido de confiabilidad puede caer dentro del rango del 99.9 al 99.99 por ciento.

### **3.1.7. Velocidad de datos:**

Los requisitos de velocidad de datos pueden ser diferentes para cada aplicación específica, por lo que la tasa de datos de comunicación para la automatización de distribución y AMI pueden ser bajas. Por lo tanto, la elección de la tecnología de comunicación debe determinarse de acuerdo con los requisitos de datos específicos para cada aplicación. (Murat, Manisa, & Saifur , 2014) Asegura que las tecnologías de comunicación que proporcionan una velocidad de datos de hasta 100 kbps con una corta distancia de cobertura son generalmente suficientes para aplicaciones en redes del hogar.

### **3.1.8. Seguridad:**

Es muy importante asegurar la información transmitida en un sistema HAN, ya que se debe de garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos hacia su nodo de control, por lo que un sistema robusto de seguridad puede combatir ataques de seguridad física y cibernética con el fin de proteger los datos críticos recopilados de diversos componentes que conforman una HAN. (Li, Lai, & Zhang, 2011) Afirma que proporcionar seguridad de extremo a extremo tiene la más alta prioridad para casi todas las aplicaciones SG, es decir que es importante establecer un mecanismo de seguridad que protejan los mensajes enviados, desde los nodos o terminales (electrodomésticos inteligentes) hasta su controlado central o medidor inteligente. (Kilbourne & Bender, 2010) Afirma que especialmente para aplicaciones de misión crítica, se debe proporcionar seguridad en una red de comunicación para evitar cualquier vulnerabilidad a los activos críticos de la red eléctrica.

Advanced Encryption Standard (AES), es el mecanismo recomendado para preservar la confidencialidad de la información transmitida de extremo a extremo en las HAN, con el fin de

contribuir al diseño de aplicaciones seguras basadas en la implementación de estándares probados de cifrado y descifrado.

La tabla 4 resume los requisitos más importantes y en resumen desde el punto de vista de las comunicaciones, como medio de transmisión, ancho de banda, velocidad de datos, latencia, frecuencia, etc., de acuerdo a los comentarios estimados por los expertos.

Tabla 4  
*Resumen de Requerimientos de una HAN.*

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>PARÁMETRO</b>
Potencia	Baja
Cobertura	50 metros
Velocidad de Datos	100 kbps / nodo
Latencia	~ 15 segundos
Frecuencia de Operación	(2.4 GHz o 5 GHz)
Confiabilidad	99.9 al 99.99 %
Seguridad	AES

Nota: Resumen de características generales de aplicaciones HAN.

Fuente: El autor

### **3.2. Protocolos de Comunicación para HAN**

Como se explicó en capítulo anterior, la comunicación entre dispositivos inteligentes en una red de área del hogar se establece mediante protocolos de comunicación, dichos protocolos permiten que los dispositivos del hogar puedan hablar el mismo idioma e intercambiar información o datos. La capacidad de una casa inteligente que funcione de forma interactiva e independiente,

es una capacidad muy valiosa para la gestión de energía del hogar. Por lo tanto, la necesidad del uso de protocolos de comunicación probados y certificados, es importante para un adecuado sistema de administración de energía del hogar, y demás aplicaciones HAN.

Actualmente son más las empresas de producción de electrodomésticos inteligentes, las cuales incorporan en sus equipos, módulos de comunicación para que puedan conectarse a la red y transmitan información. Además, que los usuarios finales por medio de servicios públicos y proveedores de servicios externos a través de tecnologías de comunicación inalámbrica y por cable logren monitorear, controlar y operar dichos electrodomésticos. Dentro del contexto de la red inteligente, ambas tecnologías pueden utilizarse para formar una red de comunicación que luego forma una red de área doméstica (HAN). Dependiendo de los electrodomésticos, los fabricantes utilizan las siguientes tecnologías inalámbricas, como ZigBee, WiFi, Z-Wave y Bluetooth, y tecnologías cableadas como RS485, PLC, I2C y SPI para desarrollar HAN. La figura 16 muestra las tecnologías de red de área doméstica más comunes.

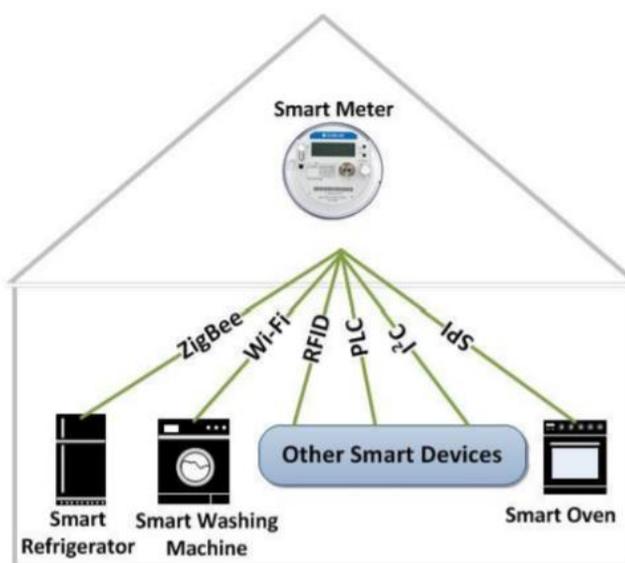


Figura 16. Protocolos de comunicación en ambiente HAN

Fuente: (Hafeez, Kandil, & Al-Omar, 2014)

### **3.3. Revisión de Protocolos**

(Hafeez, Kandil, & Al-Omar, 2014) Menciona que los protocolos inalámbricos se utilizan en HAN con el fin de proporcionar acceso remoto a los propietarios de viviendas, servicios públicos y proveedores de servicios de terceros, en este apartado se estudiarán los protocolos: ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth y Z-Wave, ya que son los protocolos de comunicación inalámbrica que mejor satisfacen los requisitos de los electrodomésticos inteligentes y los más utilizados en la categoría HAN.

#### **3.3.1. ZigBee.**

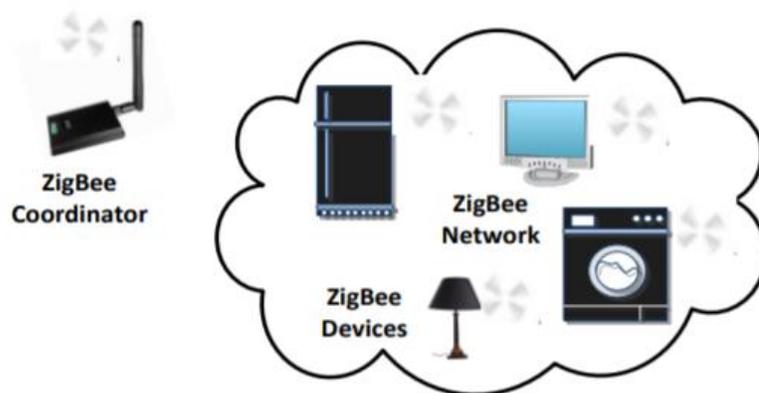
ZigBee es un protocolo de red inalámbrica bidireccional de radiofrecuencia (RF) que cumple con IEEE 802.15.4. Se caracteriza por tener velocidad de datos bajo, muy poco consumo de energía lo cual ayuda a alargar la duración de batería en los dispositivos conectados a la red, en términos más específicos ZigBee consume 30 ma transmitiendo 3 ma en reposo. Otra característica es que opera a frecuencia de 2.4 GHz para corto alcance, capacidades de implementación de bajo costo y ofrece un uso flexible. Parámetros que hacen que ZigBee sea el protocolo aplicable y más implementado actualmente en las redes de área del hogar (HAN). Muchos de los electrodomésticos inteligentes utilizan dicho protocolo, como los sistemas de iluminación, aire acondicionado y seguridad.

(Moreno & Fernández, 2017) Afirma que el mecanismo de seguridad que tiene es la encriptación AES de 128bits, que permite la autenticación y encriptación en las comunicaciones. Además, existe un elemento en la red denominado Trust Center (Centro de validación) que proporciona un mecanismo de seguridad en el que se utilizan dos tipos de claves de seguridad, la clave de enlace y la clave de red. (Berrío & Zuluaga ) Afirma que ZigBee cuenta con 16 canales en la banda de 2.4GHz, cada uno con un ancho de banda de 5MHz, que es un espectro libre. Con

modulación OQPSK y una potencia máxima de 100mW logra distancias de 66 metros, a una tasa de 250Kbps.

### *Modo de Trabajo*

ZigBee se construye basándose en un modelo maestro-esclavo donde los dispositivos actúan como esclavos y el coordinador actúa como el maestro. ZigBee opera en topología de red de malla, lo que ofrece algunas ventajas, ya que, algunos dispositivos en una malla de ZigBee pueden permanecer en modo de suspensión cuando no están activos en la red, lo que da como resultado un ahorro de energía. La figura 17 muestra la arquitectura típica de ZigBee en un ambiente de área del hogar, donde el master es el encargado de la coordinación y administración de la comunicación bidireccional entre el esclavo, además de comunicación directa con cada nodo esclavo es el responsable del manejo de la red.



*Figura 17.* Arquitectura típica de Zigbee master-esclavo

Fuente: (Hafeez, Kandil, & Al-Omar, 2014)

## Arquitectura

ZigBee presenta una pila de arquitectura que consta de las capas de control de acceso al medio, capa física, capa de red y aplicación. El modelo en capas de la arquitectura ZigBee se muestra en la figura 18.

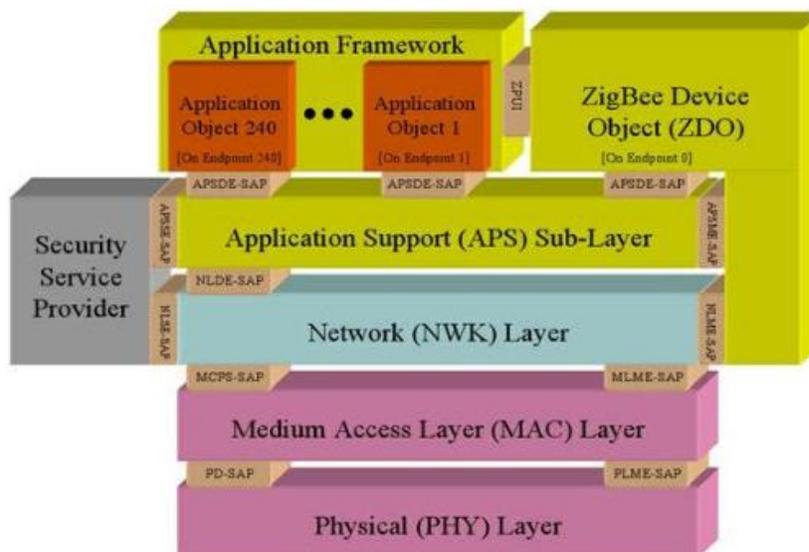


Figura 18. Arquitectura de protocolo ZigBee

Fuente: (Tarun , 2016)

- Capa de Aplicación: Esta capa habilita los servicios necesarios para que el objeto de dispositivo ZigBee y los objetos de aplicación se conecten con las capas de red para los servicios de administración de datos. Esta capa es responsable de emparejar dos dispositivos según sus servicios y necesidades.
- Capa de Red: Esta capa se encarga de todas las operaciones relacionadas con la red, como la configuración de la red, la conexión del dispositivo final y la desconexión a la red, el enrutamiento, las configuraciones del dispositivo, etc.

- Capa de MAC: Esta capa es responsable de la transmisión confiable de datos al acceder a diferentes redes con la evitación de colisión de acceso múltiple (CSMA) con detección de operador. Esto también transmite las tramas de baliza para sincronizar la comunicación.
- Capa de Física: Esta capa realiza operaciones de modulación y demodulación sobre las señales de transmisión y recepción respectivamente. La frecuencia, la tasa de fechas y el número de canales de esta capa se indican en la figura 19.

BAND	COVERAGE	DATA RATE	CHANNEL NUMBERS	
2.4 GHz	ISM	Worldwide	250 kbps	11-26
868 MHz		Europe	20 kbps	0
915 MHz	ISM	Americas	40 kbps	1-10

Figura 19. Capa Física Protocolo ZigBee

Fuente: (Tarun , 2016)

### *Ventajas y Desventajas*

En este apartado se analizan las principales ventajas y desventajas que presenta el uso del protocolo ZigBee en aplicaciones HAN.

#### Ventajas:

- Protocolo seguro, se establece una conexión altamente segura que utiliza cifrado AES de 128 bits.
- Bajo consumo de energía, permitiendo que las baterías duren más (100-1000 días) y reduzca el consumo de energía.
- Confiable ya que evita la colisión, el conflicto y la competencia entre nodos de la red.
- Latencia de retardo de 15 ms a 30 ms.
- La capacidad permite controlar una red grande desde un ‘coordinador’ específico.

- Tiene capacidades de red auto-organizadas. Esto implica que el proceso de formación de la topología de red es autónomo por lo que no es necesario realizar ningún tipo de configuración. Dependiendo del tipo de topología elegida se establece una estrategia de creación de enlaces entre los nodos.
- Opera en las bandas libres de 2.4Ghz, 858Mhz para Europa y 915Mhz para Estados Unidos.

#### Desventajas:

- La configuración de una red requiere de dispositivos adicionales, lo cual aumenta el costo de implementación de la red.
- En cuanto a compatibilidad, los dispositivos no pueden establecer comunicación con otros protocolos de red, como Wi-Fi.
- Carece de soporte para el Protocolo de Internet.
- No escalable a redes más grandes.
- Poca capacidad de procesamiento y tamaño de memoria.
- Presenta interferencia con dispositivos inalámbricos que están en la misma banda de frecuencias, como las WLAN dadas por la IEEE 802.11 (WiFi), IEEE 802.15 (Bluetooth) y las Microondas.

### **3.3.2. WIFI**

Wi-Fi es un protocolo de red inalámbrica de radiofrecuencia bidireccional (RF) que cumple con el estándar IEEE 802.11. WIFI se utiliza en ambientes HAN para interconexión de dispositivos inteligentes que requieran de alta velocidad transmisión de datos, como computadoras, impresoras,

máquinas de fax, TV, cámaras digitales, cámaras de vigilancia fuera de los hogares, reproducción de video y terminales inteligentes, así como descarga de datos.

### Arquitectura

Para el protocolo WIFI la arquitectura de capas viene definida por la IEEE (Istitute for Electrical and Electronics Engineers), bajo el nombre de IEEE 802. El modelo de referencia a capas de este proyecto IEEE 802, la figura 20 muestras el modelo en capas para wifi.

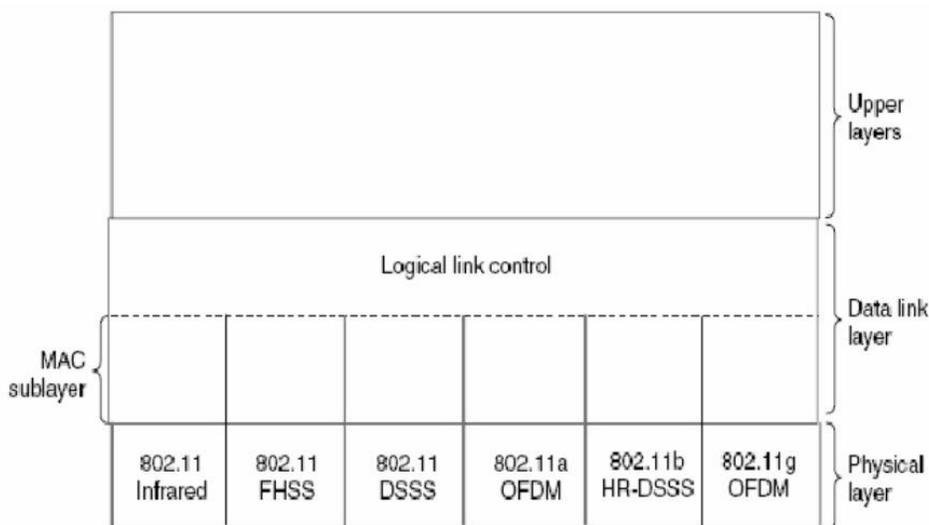


Figura 20. Arquitectura Wi-Fi - pila de protocolo

Fuente: (Hung-Yu )

**Capa física:** Esta capa es la encargada de determinar el estado del canal (Carrier Sense), la transmisión de los datos sobre el canal y la recepción de los datos del canal.

**Capa de enlace:** La capa de enlace de datos, se divide en dos o más subcapas, para 802.11 la subcapa de control de acceso al medio (MAC), determina como se encuentran asignados los canales, y quien continúa con la transmisión. Y la subcapa de Control de Enlace lógico (LLC) es la que define y gestiona los enlaces lógicos de capa 2 y proporciona una interfaz común para el nivel de red, ocultando las diferencias relativas a la topología y a las técnicas de acceso al canal;

### *Ventajas y Desventajas*

Los beneficios y desventajas de usar WiFi en HANs se detallan a continuación:

#### Ventajas:

- En cuanto a seguridad se tiene una conexión altamente segura que utiliza cifrado AES de 128 bits.
- Es compatible con redes a través de líneas eléctricas, cables coaxiales y líneas telefónicas, sin que existan interferencias y pérdidas de información.
- No se requiere una puerta de enlace especial porque hereda la capacidad y características de soporte del protocolo de Internet.
- Latencia de retardo corta que es inferior a 3 ms.
- Despliegues de red de bajo costo (espectro sin licencia).
- Equipamiento barato.
- Alta flexibilidad, adecuado para diferentes casos de uso.
- Trabaja a una frecuencia de operación de 2.4 y 5 GHz.

#### Desventajas:

- Consumo de energía relativamente alto en comparación con ZigBee. Según Wi-Fi alcanzó 352.8 mW de consumo de energía cuando se aplican las funciones de navegación.
- La vida útil de la batería es de 0.5-5 días sin cargar.
- Es afectado por la radiación electromagnética emitida por los electrodomésticos, que a su vez afecta la velocidad de transmisión.
- Propenso a la interferencia con ciertos protocolos de red HAN como ZigBee y Bluetooth, ya que estos protocolos operan en el mismo rango de frecuencia.
- Alta interferencia debido al uso de la banda libre de licencia.

### 3.3.3. Z-wave.

Z-Wave es un protocolo de comunicación inalámbrico desarrollado por Zensys y confirmado por Z-Wave Alliance, especialmente el protocolo se diseñó para la conexión de dispositivos de automatización para el hogar y entornos comerciales, con el objetivo de proporcionar una forma fácil de controlar inalámbricamente los dispositivos del hogar. Con el protocolo Z-wave es posible la ejecución de dispositivos eléctricos principales de la casa, como luces de encendido / apagado, aire acondicionado (HVAC), cocina, televisiones y seguridad para el hogar. Actualmente son muchos los aparatos domésticos que están en el mercado bajo varias marcas que utilizan Z-wave, por lo que se ha convertido en un protocolo aplicable para las HAN.

#### *Características:*

Z-Wave como protocolo de comunicación se distingue por permitir una transmisión confiable de mensajes cortos, desde la unidad de control a uno o más dispositivos en la red con mínimo ruido. Es un protocolo libre de interferencias que fue diseñado específicamente para el control remoto de los dispositivos del hogar. Z-wave, debido a que es escalable, interoperable, presenta bajo porcentaje de caducidad tecnológica, permitiendo que los costes sean bajos, la disponibilidad en el mercado local está garantizada, el soporte frente a eventuales problemas está disponible y es fácil de implementar. En términos de funcionabilidad, ayuda en: ahorro y eficiencia energética, ya que en aplicaciones como termostatos, control de persianas que permiten mejor iluminación del hogar, se puede lograr un ahorro muy significativo.

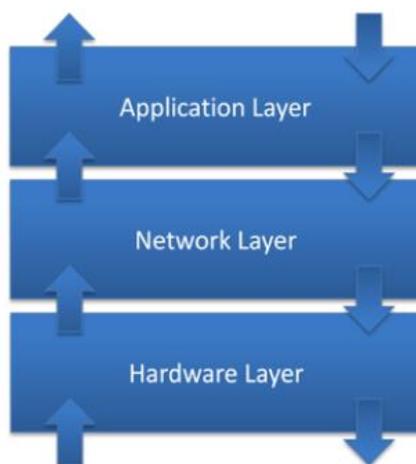
El sistema es escalable, interoperable y presenta baja obsolescencia tecnológica. Z-wave ha seguido expandiéndose a nuevos mercados, es compatible en más de 30 países y en 2012 alcanzó los 600 productos homologados tan sólo seis meses después de alcanzar los 500.

### *Modo de Trabajo*

Con Z-wave cada dispositivo se identifica como un nodo y debe distinguirse mediante la ID de red (ID de inicio) para distinguir estos nodos de los nodos de redes vecinas de Z-Wave y la ID de nodo para distinguir cada nodo de la misma red. Dado que Z-Wave utiliza una configuración de red Mesh, cada dispositivo en la red envía y recibe comandos de control a través de paredes o pisos, por lo que hace que la onda z cubra todas las áreas de la casa, la red Mesh utiliza nodos intermedios para encontrar un camino en los obstáculos de la casa y haga que los nodos se conecten entre sí para establecer una ruta para llegar a su destino; además, permite que este protocolo cruce más que el alcance de la radio de una sola unidad, enchufes, interruptores y controles remotos.

### *Arquitectura*

La tecnología de domótica Z-Wave se compone de tres capas. La capa de radio, la capa de red y la capa de aplicación trabajan juntas para crear una red robusta y confiable que permita que numerosos nodos y dispositivos se comuniquen entre sí simultáneamente. La figura 21 muestra el modelo en capas del protocolo Z-Wave.



*Figura 21.* Arquitectura de Z-Wave

Fuente: (Maestre, 2015)

#### Capa de radio:

La capa de radio Z-Wave se encarga de definir la forma en que se intercambia una señal entre la red y el hardware de radio físico. Esto incluye frecuencia, codificación, acceso al hardware, etc. La figura 22 muestra el flujo de datos de la capa de radio, que es una secuencia de dígitos codificados (codificados en Manchester o PE), señales coherentes (paquetes de datos) y consiste en un preámbulo.

#### Capa de red:

La capa de red Z-Wave define cómo se intercambian los datos de control entre dos dispositivos o nodos. Esto incluye direccionamiento, organización de la red, enrutamiento, etc. Además, es responsable de analizar la estructura de la red doméstica inteligente para recopilar la información de todos los nodos y mantener una tabla de enrutamiento en el controlador primario.

#### Capa de aplicación:

La capa de aplicación Z-Wave define qué mensajes deben ser manejados por aplicaciones específicas para realizar tareas particulares, como cambiar una luz o cambiar la temperatura de un dispositivo de calefacción, etc. La capa de aplicación es responsable de distribuir la carga útil de trama, decodificar y ejecutar comandos y parámetros suministrados en la red Z-Wave. La figura 22 muestra el formato de la trama de la aplicación Z-Wave.

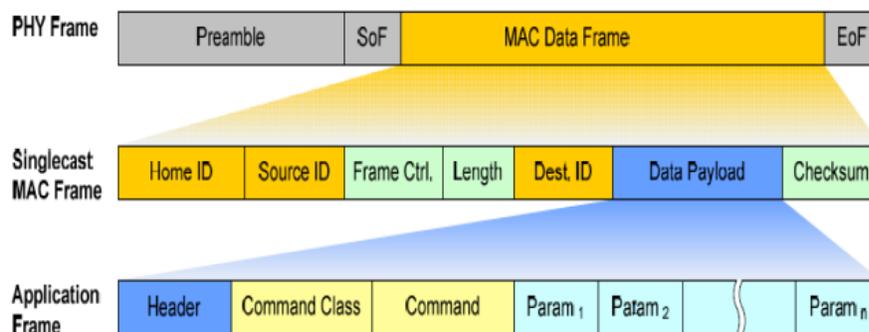


Figura 22. Tramas de datos Z-Wave en las 3 Capas

Fuente: (Muneer, Wail , & Ashwaq , 2016)

### *Ventajas y Desventajas*

#### Ventajas:

- La seguridad del protocolo es a través de encriptación AES 128.
- Presenta un bajo costo de implementación.
- Trabaja a baja frecuencia, usa la banda de 800-900 MHz, por lo que reduce problemas de interferencias con otras tecnologías inalámbricas usadas en el hogar.
- Es un sistema fiable, permite una topología en malla o mesh que admite hasta de 232 dispositivos y 30 metros entre dispositivos al aire libre o 20 m en espacios cerrados.
- Mejor alcance de la señal y mayor duración de las baterías de los dispositivos.

#### Desventajas:

- Trabaja a una frecuencia que no es libre.
- Tiene una velocidad de datos baja de tan solo 9.6 kbps en relación a otros protocolos que trabajan en HAN.
- Presenta una latencia mayores 10 segundos.

### 3.3.4. Bluetooth.

Bluetooth es un protocolo de comunicación inalámbrico usado para intercambiar datos en distancias cortas. Sus características principales son el bajo consumo de energía y el intercambio rápido de datos, así como la amplia disponibilidad de datos. El estándar IEEE para Bluetooth es IEEE 802.15.1. Bluetooth se puede utilizar para comunicaciones entre electrodomésticos inteligentes, EMS y el medidor inteligente. Su frecuencia de operación es de 2.4–2.48 GHz y tiene una velocidad de datos máxima de 1 Mbps, rango nominal de 10 metros, 79 canales de RF, ancho de banda de canal de 1 MHz y máximo de 8 nodos. Además, bluetooth tiene un alcance muy corto, lo que puede ser un problema cuando se utiliza esta tecnología en HAN inteligentes, ya que pueden implicar distancias más largas. Además, admite un número limitado de nodos que pueden ser una restricción seria en HAN. Bluetooth, al igual que muchas otras tecnologías, funciona a baja potencia, lo que significa que un ruido fuerte puede causar la pérdida o daño de las señales. (Mahmood, Javaid, & Razzaq, 2014) Menciona que el protocolo Bluetooth opera a una frecuencia de 2.4 GHz, lo que causa problemas relacionados con la interferencia, puesto que otras tecnologías inalámbricas como WiFi, ZigBee, hacen uso del mismo espectro de frecuencias. Por otro lado, la versión más reciente de Bluetooth v4.0 ha introducido la tecnología de bajo consumo, en términos más específicos bluetooth consume 400 ma transmitiendo 20 ma en reposo.

#### *Arquitectura*

Bluetooth presenta una pila constituida por dos clases de protocolos, la primera consta de protocolos específicos propios de bluetooth y la segunda de protocolos adoptados por otras especificaciones, dichas clases ofrecen ventajas de interacción con tecnologías que utilizan otros protocolos comerciales existentes. La pila se divide en 4 capas lógicas:

- Núcleo de Bluetooth: Radio, Banda Base, LMP, L2CAP, SDP

- Sustitución de cable: RFCOMM
- Protocolos adoptados: PPP, UDP, TCP, IP, OBEX, WAP, IRMC, WAE
- Control de telefonía: TCS-binary, AT-Commands

La figura 23 muestra la arquitectura de bluetooth con sus 4 capas lógicas.



*Figura 23.* Arquitectura de capas de Bluetooth

Fuente: El Autor

Capa de radio: Esta capa se encarga de definir la forma en que se intercambia una señal entre la red y el hardware de radio físico. Además, la capa define la banda de frecuencia (2.4 GHz), el tipo de modulación (Gaussian Frequency Shift Keying - GFSK) y el nivel de sensibilidad dispositivo receptor.

Capa de Banda Base: Define el tipo de topología bluetooth, técnica de multiplicación, establecimiento de conexión, determinación de direcciones de dispositivos para su conocer su zona de cobertura.

LMP (Link Manager Protocol): El siguiente protocolo específico se encarga de la gestión del enlace entre dispositivos Bluetooth, de la seguridad, del control de paquetes, potencia, calidad del servicio y control de la piconet (conmutación maestro esclavo).

HCI (Host Controller Interface): Proporciona una interface de comandos al controlador de banda base y al manejador de enlace para acceder a los parámetros de configuración. Esta interface proporciona un uniforme método de acceso a las capacidades de banda base Bluetooth.

L2CAP (Logical Link Control and Adaption Protocolo): Protocolo que se encuentra por encima del anterior protocolo (LMP), se encarga de adaptar los protocolos superiores al protocolo de banda base. Sus tres principales funciones son: la multiplexación de protocolos de alto nivel, la segmentación y reensamblado de paquetes largos (hasta 64 kbytes) y descubrimiento de dispositivos y calidad de servicio.

SDP (Service Discovery Protocol): Proporciona un mecanismo que permite a las aplicaciones descubrir cuáles son los servicios disponibles en su entorno y determinar las propiedades específicas de éstos. Los servicios disponibles cambian continuamente debido al dinamismo existente en el entorno, por lo que la búsqueda de servicios en Bluetooth difiere de la búsqueda de servicios en una red fija tradicional.

RFCOMM: Permite emular el funcionamiento de los puertos serie sobre el protocolo L2CAP. Se basa en el estándar ETSI TS 07.10, tomando de éste un subconjunto con las partes más relevantes y realizando algunas adaptaciones. RFCOMM permite emular los nueve circuitos de la norma RS-232(ETIATIA232.E). Soporta hasta 60 conexiones simultáneas entre dos dispositivos Bluetooth.

### *Ventajas y Desventajas*

#### Ventajas

- Trabaja a una frecuencia 2.4 GHz.
- Bajo consumo de energía.
- Velocidad de datos máxima de 1 Mbps.
- Latencia de 18 a 21us.

#### Desventajas

- Presenta problemas relacionados a interferencia con otro tipo de tecnologías inalámbricas del hogar.
- Se puede implementar pocos nodos en la red.
- Al utilizar poca potencia, la señal puede ser afectada a presencia de ruido eléctrico.
- El alcance de este protocolo es tan solo de 10 metros lo cual es una gran deficiencia comparado otros como Wi-Fi.

### **3.4. Comparación de Protocolos**

En este apartado se realiza una comparativa de los protocolos de comunicación, tomando en cuenta los parámetros analizados en la sección 3.3 de éste capítulo, con el fin de tener un despliegue de información más detallada de las características que proveen los protocolos en un ambiente del hogar. Según el estudio comparativo de protocolos inalámbricos: ZigBee, Wi-Fi, Z-Wave y Bluetooth, se puede identificar que los sistemas del hogar aplicados con el protocolo WiFi tiene grandes ventajas sobre ZigBee, ya que presenta un gran ancho de banda, mayor cobertura y provee alta disponibilidad, pero solo es posible tener un máximo de 32 nodos en la red, siendo una

falencia considerable ya que el número de nodos interconectados en la red es importante, por cuanto en aplicaciones del hogar, son muchos los sensores que pueden ser interconectados a la red. Otra desventaja muy considerable del protocolo WIFI es el alto consumo de energía, lo cual conlleva a un mayor costo y aumento de la demanda de energía eléctrica del hogar, cosa que no pasa en ZigBee, ya que sus nodos desplegados en toda la red tienen la habilidad de entrar en modo descanso, con el fin de lograr un menor uso de energía y lograr así, un ahorro considerable en baterías. Según (Berrío & Zuluaga ) un nodo sensor con una batería AA puede durar hasta 10 años.

Por otro lado, el protocolo Bluetooth es de fácil acceso y proporciona comunicaciones seguras en ambientes donde se requiere corto alcance, la frecuencia de operación 2.4 GHz en cierto modo trae beneficios sobre el ahorro de los costos de implementación por hacer uso de una frecuencia no licenciada, pero trae consigo problemas relacionados a la interferencia con los protocolos que se manejan en la misma banda como Wifi y ZigBee, además que su alcance es menor que sus competidores con solo 10 metros de cobertura pero se lograría alcanzar mayor distancia pero si se tiene alta potencia, y tan solo es posible tener pocos nodos simultáneos interconectados a la red.

Mientras ZigBee en comparación de los otros protocolos tiene la gran ventaja de operar una red con muchos nodos, como se mencionó anteriormente dicho parámetro es adecuado para la gestión de energía del hogar cuando se tienen gran cantidad de dispositivos terminales, trabaja a baja potencia y requiere bajo costo de implementación. En el mundo real el protocolo ZigBee es considerado en las HAN, en aplicaciones como para la medición inteligente si se usa en una estructura de malla. También puede proporcionar monitoreo remoto del medidor inteligente y otros dispositivos. ZigBee tiene seguridad confiable y emplea poderosas técnicas de encriptación como AES para asegurar la información de extremo a extremo. Por otro lado Z-Wave se caracteriza por

la transmisión confiable de mensajes cortos desde el controlador a uno o más nodos, en comparación con ZigBee, éste protocolo es mucho más simple, al utilizar una frecuencia baja se logra disminuir la interferencia con otras señales inalámbricas, además que brinda interoperabilidad ya que son muchos los fabricantes que optan por dicho protocolo, pero presenta falencias en la frecuencia de operación ya que hace uso de una frecuencia no es libre, en comparación con ZigBee, su velocidad de datos es baja con solo 9.6 kbps y presenta una latencia mayor 10 segundos.

Los principales atributos de los protocolos de comunicación para las redes de área del hogar se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5  
Cuadro comparativo de protocolos de comunicación inalámbrica

Características	Protocolo			
	ZigBee	Wifi	Z-Wave	Bluetooth
Velocidad de datos	250 kbps	1–150 Mbps	9.6 kbps	1Mbps
Frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz 5 GHz	908 MHz (USA)	2.4 GHz
Alcance	10-100m	1-100 m	30 a 50 m	10m
Latencia	30 ms	0.3us	< 10 s	18 a 21us
Nodos	65540	32	232	7
Uso de energía	Hasta 10 años	horas	días	días
Seguridad	Cifrado AES 128 bits	AES	WEP, WPS	AES 128
Estándar	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11	Propietario	IEEE 802.15.1

Nota: Datos recolectados de exploración bibliográfica.

Fuente: EL Autor

### 3.5. Elección de protocolo para HAN

Según los requisitos analizados en el apartado en la sección 3.1 que corresponde a los parámetros requeridos para las HAN, se establecerá un protocolo de comunicación, el cual será el que más se adapte a las necesidades requeridas para una HAN de una red eléctrica inteligente. En la tabla 5 se muestra la validación o no de cada protocolo de comunicación con los requisitos para las HAN.

Tabla 6  
*Validación de protocolo de comunicación*

CARACTERÍSTICA	PARÁMETRO	ZigBee	Wi-Fi	Z-Wave	Bluetooth
Potencia	Reducida	soporta	no soporta	soporta	soporta
Cobertura	50 metros	soporta	soporta	soporta	no soporta
Velocidad de Datos	100 kbps / nodo	soporta	soporta	no soporta	soporta
Latencia	~ 15 segundos	soporta	soporta	soporta	soporta
Frecuencia de Operación	(2.4 GHz o 5 GHz)	soporta	soporta	no soporta	soporta
Confiabilidad	99 al 99.99 %	soporta	soporta	soporta	soporta
Seguridad	AES 128 bits (Encriptación)	soporta	soporta	soporta	soporta

Nota: Cuadro comparativo para elección de protocolo de comunicación para HAN.

Fuente: El Autor

Según los resultados de la tabla 5, se determina que el protocolo de comunicación que más se adaptan a las redes de área del hogar es ZigBee, en base a los requerimientos de las HAN y otras características que hace que sobresalga de los demás protocolos, como: el bajo consumo de energía, topología de red en malla y la fácil integración de múltiples nodos a la red. Además, que según el análisis del capítulo 2, ZigBee es uno de los protocolos de comunicación inalámbrico que tiene mayor despliegue en el mundo, en aplicaciones de la infraestructura de medición avanzada y gestión del hogar. (Liu, 2018) Afirma que en países como EEUU, China, Japón y Corea del Sur están experimentando un tremendo crecimiento en la automatización del hogar y aplicaciones de gestión del hogar a través del protocolo ZigBee. En países como India, Países Bajos y Reino Unido, el mercado también está creciendo rápidamente debido a la tendencia de la digitalización. Además, el protocolo ZigBee está siendo adoptado por varios fabricantes (Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Philips, Motorola, etc.) de dispositivos y electrodomésticos inteligentes, ya que un chip de comunicación con el protocolo ZigBee tiene un costo relativamente bajo. (Liu, 2018).

## CAPITULO IV

El presente capítulo, establece los parámetros para la creación de un protocolo de comunicación para aplicaciones en redes de área del hogar, dichos parámetros se establecerán en base al mensaje que manejan los electrodomésticos inteligentes y como línea base se utilizará el protocolo ZigBee, debido a que dicho protocolo, según el análisis teórico del capítulo 3, es el que mejor se ajusta a las necesidades y requerimientos de las HAN, además que cubre los niveles del modelo OSI, como la capa física o de radio, enlace de datos, red y aplicación. La propuesta de un nuevo protocolo tiene el objetivo, obtener un protocolo de comunicación que permita la interconexión de los diferentes nodos sensores, aparatos electrónicos inteligentes y demás dispositivos del hogar, para mantener una comunicación adecuada y permitir la ejecución de aplicaciones relacionadas a la infraestructura de medición avanzada, gestión de energía y demanda de las redes de área del hogar, siguiendo los lineamientos del protocolo propuesto, además el presente apartado en su sección final, propone ciertos escenarios de simulación para que un futuro se pueda analizar a profundidad los respectivos parámetros propuestos y desempeño del protocolo de comunicación propuesto para una red de área del hogar en un ambiente simulado.

### **4.1. Formato Mensaje HAN**

En éste apartado se analiza que tipos de datos son manejados en las redes de área del hogar, especialmente los datos de medición de energía de electrodomésticos inteligentes, con el propósito de conocer qué tipo de información se necesita transmitir, y definir los datos que deberán ser encapsulados en la trama del protocolo de comunicación.

Es importante conocer que un electrodoméstico electrónico inteligente, es aquel que implementa ciertos artificios que le permiten establecer comunicación con otros dispositivos del hogar y pertenecer a una red de datos. Actualmente son muchas las empresas (Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Philips, Motorola, etc.) que están desarrollando equipos electrónicos para el hogar, los cuales permiten el control, la automatización y la gestión de energía en los electrodomésticos o dispositivos convencionales y a través de la implementación de medidores de potencia, interruptores y tomas corrientes inteligentes, etc. En general un electrodoméstico, o un dispositivo sensor inteligente, brindan la siguiente información:

#### **4.1.1. Dato de Identificador de dispositivo.**

Dado que son muchos los electrodomésticos que se conectaran a la red del hogar, es necesario que se definan un espacio de asignación de bytes para el mensaje HAN, con el propósito de poder conocer qué tipo de dispositivo es el que se está gestionando en toda la red. Por lo que se estima que para representar un dispositivo inteligente en la red sea necesario definir una nomenclatura.

Por lo tanto, la nomenclatura para cada electrodoméstico inteligente, se considera que se estructure mediante los cuatro primeros caracteres de cada palabra en minúscula, seguido del número definido en dos cifras para tener un máximo de 99 dispositivos del mismo tipo, lo cual es suficiente para representar todos los electrodomésticos interconectados en la red. La tabla 7 muestra la nomenclatura de identificación para algunos dispositivos electrónicos inteligentes del hogar.

Tabla 7  
*Nomenclatura para datos de identificador de dispositivos*

<b>Cantidad</b>	<b>Electrodoméstico Inteligente</b>		<b>Nomenclatura</b>
1	Televisor		tele01
1	Plancha		plan01
1	Secador de Pelo		seca01
1	Refrigerador		refr01
1	Lavadora		lava01
1	Licuada		licu01
1	Microondas		micr01

Fuente: El autor

En resumen, la nomenclatura de identificación de electrodomésticos inteligentes propuesta tiene la siguiente estructura:

4 caracteres (nombre) + 2 dígitos (cantidad)

Para transmitir dicha información es necesario que se defina un tamaño en bytes, por lo que se tomara como ejemplo la identificación de un televisor, cuya nomenclatura es tele01 y se procede a la conversión al sistema binario, tal como indica la figura 24.

<b>t</b>	<b>e</b>	<b>l</b>	<b>e</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>Cadena de Texto</b>
116	101	108	101	48	49	ASCII
01110100	01100101	01101100	01100101	00110000	00110001	BINARIO

Figura 24. Representación de nomenclatura de ID dispositivo a binario

Fuente: El autor

La transformación al sistema binario de la id de identificación del televisor uno es:

tele01= 01110100 01100101 01101100 01100101 00110000 00110001

Donde los primeros 32 bits representan al electrodoméstico y los 16 bits restantes representan a la numeración del dispositivo en la red, por lo tanto, para éste campo de identificación, según la nomenclatura propuesta, se tiene para el campo de identificación un tamaño total de 48 bits, es decir 6 bytes.

#### 4.1.2. Datos de control de encendido y apagado.

Para dicho campo de mensaje, comprende un comando para poder controlar remotamente los electrodomésticos inteligentes, a través de una señal de encendido y apagado, dicho campo se considera que tendrá un tamaño de 1 byte, dado que para dicha señal se representaría con un 1 para encendido y un 0 para apagado, tal como se muestra en la figura 25.

0	Cadena de Texto
48	ASCII
00110000	Binario

1	Cadena de Texto
49	ASCII
00110001	Binario

Figura 25. Datos de control

Fuente: El autor

### 4.1.3. Lectura de la potencia y corriente.

El sensor calcula la potencia y corriente consumida del electrodoméstico y estos datos son transmitidos al nodo central. Según (Irmak, Kose, & Gocmen, 2016) en promedio una televisión consume 496.5 w de potencia y consume 2.15 amperios de corriente. Un refrigerador consume 1094 w de potencia y 4.75 amperios de corriente. Se toma como referencia dichos electrodomésticos dado que son los que más consumen potencia dentro del hogar. Por lo que la cantidad de bits de datos de la potencia para representar dichas cifras sería:

- Potencia calculada en 8 cifras = 8 bytes (64 bits)
- Corriente calculada en 5 cifra = 5 byte (40 bits)

Para ejemplificar la conversión a sistema binario con el que trabajaban las tramas, se tomará como referencia los datos de lectura del refrigerador que se mencionó anteriormente dado que es el electrodoméstico más común y el que más potencia consumen en el hogar, dichos datos serán representados en formato binario.

$$\text{Potencia} = 1094.00\text{w}$$

El valor de potencia contiene en total 8 caracteres ASCII que transformado a decimal y luego procede a transformar a binario, para calcular el número de bits que tendrá el mensaje de lectura de potencia. La figura 26 muestra la conversión de la lectura correspondiente a la potencia y su transformación a sistema binario.

<b>1</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>.(punto)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>W</b>	<b>Cadena de Texto</b>
49	48	57	52	46	48	48	119	ASCII
00110001	00110000	00111001	00110101	00101110	00110000	00110000	01110111	Binario

*Figura 26.* Datos de potencia en binario

Fuente: El autor

En total del mensaje de caracteres transformado a binario se tiene la cantidad de 8 octetos (8 bytes), es decir 64 bits para representar los datos de potencia.

Ahora se realiza la conversión del mensaje de lectura de corriente, que para éste caso es de 4.75 amperios. La figura 27 muestra la conversión a sistema binario de la lectura de corriente.

<b>4</b>	<b>.(punto)</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>a</b>	<b>Cadena de texto</b>
52	46	55	53	97	ASCII
00110100	00101110	00110111	00110101	01100001	Binario

*Figura 27.* Datos de corriente en binario

Fuente: El autor

En total del mensaje de caracteres transformado a binario se tiene la cantidad de 5 octetos (5 bytes), es decir 40 bits para representar los datos de corriente.

En resumen, se tiene que el formato del mensaje estará conformado con los datos de identificador, datos de control, datos de potencia y corriente. Por lo tanto, se necesita que la trama sea de un tamaño de 20 bytes (160 bits), la figura 28 muestra la distribución de datos en la trama.

MENSAJE HAN			
ID DISPOSITIVO	DATOS DE CONTROL	POTENCIA	CORRIENTE
6 bytes	1 bytes	8 bytes	5 bytes
20 bytes			

Figura 28. Mensaje de aplicaciones en HAN

Fuente: El autor

## 4.2. El protocolo ZigBee

En ésta sección se analiza aspectos técnicos más profundos como las tramas del protocolo ZigBee, con el fin de comprender cómo se encapsulan y se manejan los datos, ya que es parte de la línea base para la propuesta del protocolo de comunicación para una HAN. Las especificaciones de ZigBee vienen dadas por el estándar IEEE 802.15.4, que define la estructura del modelo de capas del protocolo de comunicación.

### 4.2.1. Trama de la Capa Física:

La trama de la capa física se conforma del preámbulo, delimitador de paquetes, encabezado de trama física y PSDU, consiste de 133 bytes incluido sincronización y longitud de trama, con una carga útil de 127 bytes como máximo, a continuación, se describe en profundidad cada uno de ellos. La figura 30 muestra la distribución de la trama física.

El encabezamiento de sincronización (SHR): contiene al Preámbulo (4 bytes) y Delimitador de inicio de trama (SFD) (1 byte), los cuales son utilizados para la sincronización entre los dispositivos emisores y receptores. Es decir que los primeros 5 bytes de la unidad de datos del protocolo físico (PPDU), se utilizan para captar la atención de los nodos receptores, indicando al receptor que una trama nueva viene en camino y por lo que debe prepararse.

- El preámbulo: Permite la sincronización de símbolo y chip con el mensaje entrante, consta de 32 bits (4 bytes), para tener una sincronización se debe obtener una cadena de 32 ceros, para el caso de una frecuencia de 2.4 GHz, en modulación O-QPSK se tiene 8 símbolos (4 bytes) en cero, con una duración de 120 nanosegundos.
- Inicio de delimitador de paquetes (SFD): Permite la sincronización de la trama, indica el final del SHR y el inicio del paquete de datos, su longitud está definida por 1 byte con la secuencia 1110 0101. Si la espera de SFD superase la duración del preámbulo, se reinicia el proceso de sincronización.

El encabezado de la trama física (PHR): Contiene la información de la longitud de la trama, donde se especifica el número total de octetos contenidos en el PSDU, su longitud es de 1 bytes, distribuidos entre el tamaño de la trama (7 bits) y una reservación (1 bit). La figura 29 muestra la estructura del encabezado de la trama física ZigBee. Y la Tabla 8 se despliega la distribución de valores del campo tamaño de trama.

Encabezado de la Trama Física PHR (1 byte)	
Tamaño de trama	Reservado
7 bits	1 bit

*Figura 29.* Encabezado de la trama física

Fuente: Adaptado por el Autor

Tabla 8  
Valores de tamaño de trama

Valor de tamaño de trama	Payload
0 – 4	Reservado
5	MPDU (Acknowledgment)
6 – 7	Reservado
8 to aMaxPHYPacketSize	MPDU

Fuente: El autor

Unidad de datos del servicio de la capa física (PSDU): es la longitud de payload variable que acarrea la trama de la subcapa MAC.

PPDU – UNIDAD DE DATOS DEL PROTOCOLO FISICO			
Preámbulo	Inicio de delimitador de paquetes (SDF)	Encabezado de Trama (PHR)	Unidad de Datos del Servicio Físico (PSDU)
4 bytes	1 bytes	1 bytes	0-127 bytes
SDR (Synchronization Header)			

Figura 30. Trama de la Capa Física

Fuente: El autor

Como se puede observar, la trama más larga en éste protocolo es de aproximadamente 133 bytes divididos en Preámbulo (4 bytes), delimitador (1 bytes), longitud (1 bytes) y carga útil (0-127 bytes). Dando un total de 133 bytes, los cuales son 1064 bits, por lo tanto, si la velocidad de transmisión de datos es de 250 kbps, la trama de 133 bytes en el canal se puede en transmitir a 4.256 ms, lo cual es relativamente rápido y está comprendida entre el rango de latencia que se tiene

como requisito para sistemas inteligentes del hogar. Además, el canal se ocuparía en un 0.4% del total de su capacidad.

#### 4.2.2. Trama de la Capa MAC:

##### *Subcapas*

Para la capa MAC, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: Datos, ACK (acuse de recibo), subcapa MAC (Control de Acceso al Medio) y baliza. En la figura 26 muestra los campos de los cuatro tipos de paquetes básicos, pero para mayor comprensión se describe cada uno.

- El paquete de datos: tiene una carga de datos de hasta 102 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos los paquetes lleguen a su destino. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.
- Los paquetes ACK, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.
- El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia.
- El paquete baliza: se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no se reciben nada más. Estos paquetes son importantes para

mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

### Estructura

La trama de la capa MAC se estructura como se muestra en la figura 31, y contiene los campos control de trama, número de secuencia, dirección, payload e identificador de errores, a continuación, se detalla cada parámetro.

Control de Trama	Numero de Secuencia	Dirección	Payload	FCS
2 bytes	1 bytes	4 - 20 bytes	0 - 104 bytes	2 bytes

Figura 31. Trama de la capa MAC

Fuente: El autor

- Control de trama: Cada una de los 4 tipos de trama tienen control de trama, su longitud es de 2 bytes, distribuidos como se indica la figura 32:

- 

Trama de Control								
Bits: 0 - 2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	AR	Pan ID Compression	Reserved	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode
2 bytes								

Figura 32. Control de trama

Fuente: El autor

Security Enable: Campo de Seguridad.

- 1-Habilitado, la subcapa MAC, habilitara algún algoritmo de seguridad.
- 0-Lo contrario

Frame Pending: Define si existen más tramas a enviarse.

- 1-Existen más datos para el Destinatario.
- 0-Lo Contrario

AR: Solicitud de Reconocimiento

- 1-Solicita una trama de confirmación
- 0-El receptor no enviara al transmisor confirmación.

PAN ID Compression: Especifica si la trama MAC contiene campos de identificación de la Red de Área Personal.

- 1-Las direcciones origen y destino están presentes.
- 0-Lo contrario

Frame Version Field: Especifica la versión y el estándar de la trama.

- 0x01-IEEE802.15.4

Source Addressing Mode Field: Especifica el tipo de trama, específicamente si es trama de reconocimiento.

- 1 - Otra trama.
- 0 - Trama de reconocimiento.
- Data Sequence Number: Secuencia numérica, para saber que numero de trama se ha enviado.
- Address Information: Brinda la Dirección del transmisor.
- Data Payload: Comprende los datos que se transmiten, es decir el mensaje y cuyo tamaño no debe superar los 102 bytes.
- FCS: Frame Check Sequence, se utiliza para verificar la integridad de la información recibida mediante una "secuencia" de verificación de trama incorrecta, también llamado CRC, polinomio de grado 16.

### 4.3. Parámetros para protocolo de comunicación de una HAN

Éste apartado define ciertos parámetros para el establecimiento del formato de la trama HAN, para el protocolo de comunicación propuesto, según la capa física y la capa de enlace de datos, ya que en dichas capas se establece la comunicación de dispositivos inalámbricos, la capa física establece la frecuencia de operación, velocidad de dato, modulación, etc y en la capa de enlace se establecen parámetros relacionados al direccionamiento físico de dispositivos. Por lo que básicamente se sugiere que el nuevo protocolo conste de los siguientes campos:

- **Preámbulo:** Permite la sincronización de la red adecuada, a través de pausas que se presentan antes de que la señal inalámbrica acceda a un dispositivo de red, un preámbulo corto permite una mayor transferencia de datos, para las HAN es importante que cada nodo se encuentre coordinados para una adecuada transmisión de datos. El tamaño de éste campo será de 4 bits, en base al protocolo bluetooth, el cual maneja un preámbulo corto de cuatro símbolos en relación a ZigBee, ofreciendo así para sistemas HAN una transmisión ordenada de tramas, evitar la pérdida de paquetes por sobrecarga y mejoras en latencia.
- **Inicio de delimitador de tramas (SFD):** Permite verificar el adecuado proceso de sincronización, básicamente, este campo indica al receptor que se prepare para recibir una trama nueva. El tamaño de SFD es de 1 byte en base al protocolo ZigBee.
- **Encabezado de la trama física (PHR):** Permite evitar tramas que no corresponde al tamaño asignado, si se tiene un tamaño de trama mínimo o máximo del permitido, el nodo receptor descarta la trama. En sistemas HAN el encabezado de la trama se establece para evitar procesamiento innecesario en el nodo master o controlador de red, y evitar

las colisiones o señales no deseadas. El tamaño definido para el campo de encabezado de trama es de 1 byte.

- **Campo Dirección de destino:** Contiene la información del nodo destino, hacia donde la trama debe de ser enviada. Tamaño del campo de dirección es de 8 bytes, dado que según ZigBee es definida por el fabricante de dispositivos XBee que hacen uso del protocolo ZigBee y tiene una dirección única de 64 bits, dicho valor se compone de parámetros Serial Number High (SH) y Serial Number Low (SL). Para las HAN es importante establecer la dirección de destino, ya que permite definir hacia donde se debe de enviar el mensaje y donde el receptor pueda hacer uso de la información.
- **Campo Dirección de origen:** Contiene la información del nodo origen, es decir que se define el origen desde donde la trama fue enviada, su tamaño es de 8 bytes. Para las HAN es importante establecer dicho campo, ya que permite definir al nodo transmisor y conocer cuál es la procedencia del mensaje.
- **ACK:** El acuse de recibo permite la confirmación de los datos, a través de un mensaje que parte del destino hacia el origen, y así confirmar la recepción del mensaje. Para ambientes HAN, es necesario que se tenga la confirmación del mensaje para mantener evitar las pérdidas de las lecturas de los dispositivos electrónicos inteligentes en la red y garantizar un envío de tramas sin perdidas ni duplicación. El tamaño de asignación de ack es de 1 bit, puesto que, si la recepción fue exitosa se regresa un ACK = 1, de lo contrario se regresa un NAK (ack = 0).

- **Campo de Seguridad:** Permite habilitar o no habilitar un algoritmo de seguridad, para aplicaciones HAN, es recomendable que se habilite dicho campo para mantener la información segura y evitar posibles ataques a la integridad del mensaje, por lo que se recomienda como mecanismo la encriptación AES, su tamaño es de 1 bit, dado que habilita al mecanismo de seguridad AES el cual se implementara en capas superiores.
- **Baliza:** Es un mecanismo que permite el control del consumo de potencia, con el fin de evitar el alto consumo de batería en la red, mediante el balizamiento, el nodo controlador dirige a los transmisores, si existe mensaje el nodo transmisor se comunica con el nodo controlador y se procede a la transmisión de los datos pero si no existe ninguna información cada nodo transmisor vuelve a estar en modo reposo, dicho parámetro se toma como referencia del protocolo ZigBee, , el cual permite un ahorro considerable de energía en sus nodos. Es campo es muy importante dentro de los sistemas de redes de área del hogar, ya que permitirá que la red sea tan eficiente en el consumo de energía, manteniendo la red en su mayoría de tiempo en modo de espera o descanso, permitiendo al usuario final un ahorro sobre el consumo de energía al implementar un aplicativo en una HAN. Para balizado se utilizan 16 bits (2 bytes).
- **Datos:** Es la carga útil que contiene la información o formato del mensaje de los dispositivos de las HAN. Su tamaño es variable dependiendo del tamaño del mensaje. La carga útil toma gran importancia dado que en los sistemas HAN, el mensaje permitirá definir procesos relacionados a las lecturas de medición y comandos de control, para procesar y brindar al usuario final, la información adecuada respecto al consumo eléctrico, la demanda, historial de consumo, etc, según la aplicación que se implemente.

- Secuencia de chequeo de trama: Permite verificar la integridad de la información recibida, mediante una "secuencia" de verificación de trama errónea e iniciando la retransmisión de la trama, esta técnica es conocida como CRC (Código de redundancia cíclico), su tamaño es de 16 bits (2 bytes). Para un ambiente HAN, este campo permite la verificación de tramas dañadas, muy importante para evitar que el mensaje llegue al su destinatario con algún error o falla, que se pueda provocar durante la transmisión de tramas.

La figura 33 muestra la trama del nuevo protocolo de comunicación para redes de área del hogar, dicha trama tiene un tamaño de 352 bits (44 bytes), distribuidos según los campos mostrados en la figura.

Preámbulo	1 byte
Delimitador de inicio de trama	1 byte
Encabezado de la trama física	1 byte
Dirección de destino	8 bytes
Dirección de origen	8 bytes
ACK	1 byte
Campo de seguridad	
Baliza	2 bytes
Datos	20 bytes
Secuencia de chequeo de trama	2 bytes

Figura 33. Trama de datos del protocolo de comunicación propuesto

Fuente: El Autor

En resumen, en este apartado se pudo definir los parámetros en cuanto al formato de la trama del nuevo protocolo para la infraestructura de medición avanzada y aplicaciones de redes de área del hogar. Para dicho protocolo de comunicación se estableció los campos de la trama más adecuados para la transmisión de información, permitiendo una comunicación fluida entre los nodos transmisores y el nodo controlador o master, dichos campos establecen que la información ser enviada y recibida con mecanismos de sincronización, campos de control de integridad de datos, como los ACK, secuencia de chequeo de trama, además de campos de control de direcciones de destino y origen, carga útil, campo de habilitación de algoritmo de seguridad y control de potencia mediante el campo de baliza. Dando como resultado un total de trama del nuevo protocolo es de 44 bytes o 352 bits para la transmisión y recepción de información a través de los dispositivos o nodos que usen dicho protocolo.

#### **4.3.1. Protocolo propuesto vs ZigBee:**

Mediante este capítulo se pudo establecer un nuevo protocolo de comunicación, según las necesidades de mensaje a ser transmitido y la definición de los campos de la trama de la estructura de dicho protocolo, para adecuarlo a un ambiente de las redes de área del hogar y así tener un mejor desempeño, y comunicación fluida de mensajes en la red, si analizamos los 352 bits que contiene la trama, para una velocidad de transmisión de datos de 100 kbps que corresponde a un requerimiento de las HAN, se lograría que el protocolo propuesto tenga un tiempo de trama de 3.5 milisegundos, menor a la que ofrece ZigBee, lo cual es un aporte significativo para aplicaciones de gestión y control de energía para las HAN y ocuparía un 0.35% del total de la capacidad del canal, pero considerando que no está desarrollado en su totalidad, presenta algunas desventajas relacionadas a costo de implementación de dicho protocolo HAN para un ambiente real, ya que se necesitaría de un análisis más profundo del protocolo mediante simulación de cada campo que

conforma la trama de datos, por lo tanto para proyectos relacionados con redes de área del hogar, al momento como una opción alternativa se sugiere utilizar el protocolo de comunicación ZigBee, ya que actualmente es el protocolo que presenta más beneficios en relación a otros protocolos inalámbricos que se usan en el mercado de las HAN en el mundo, la trama de éste protocolo ya se encuentra establecida, además que la carga útil soporta el mensaje HAN de los dispositivos inteligentes, aporta un gran ahorro considerable en costos de implementación, en cuanto al mercado tecnológico son más los fabricantes que desarrollan terminales que hacen uso de dicho protocolo y el despliegue está tomando cada vez más fuerza en varios países utilizando ZigBee, por su fácil aplicabilidad, ahorro de consumo de baterías, y demás beneficios que ofrece ZigBee, por lo tanto actualmente se convierte en el protocolo de comunicación idóneo para establecer comunicación en sistemas de redes del hogar.

#### **4.4. Escenarios de Simulación.**

En éste apartado se propone los escenarios de simulación para la aplicación del protocolo HAN propuesto en el presente estudio, en un ambiente HAN simulado, con el propósito de probar los parámetros establecidos del protocolo, mediante el establecimiento de comunicación entre nodos o dispositivos, además que se determinará qué ocurre si a los escenarios se le implementa seguridad. Se puede hacer uso del software de simulación; OMNeT++, OPNET, NS2, entre otros, considerando que deben de tener la capacidad de ejecutar los parámetros propuestos en los escenarios, según la tabla 9, se recomienda hacer utilizar OMNeT++, dado que, en comparación con otros simuladores, OMNeT++ es un simulador de red robusto, de código abierto, muy utilizado en la academia e investigación, proporcionando un entorno visual y con un nivel de complejidad bajo.

Tabla 9  
Cuadro comparativo de Simuladores de Red

Simulador	OPNET	OMNeT++	Ns2 - NS3
Sistema Operativo	Unix, Windows	Linux y Windows	Linux, FreeBSD, MAC OS X, Solaris y Windows.
Lenguaje de programación	C++	C++	C++, OTcl
Licencia	Comercial	Open Source - GNU	Open Source
GUI (entorno visual)	Si	Disponible	NS2 - Disponible NS3 - No disponible
Redes Inalámbricas	Soporta	Soporta	Soporta
Protocolos de Red	Soporta	Soporta	Soporta
Estándar 802.15.4	Soporta	Soporta	Soporta
Librería y módulos	Múltiples (versión pago)	Múltiples	Algunas
Topologías de red	Disponible ( flujo de mensajes de datos, paquetes perdidos, mensajes de flujo de control, etc)	Disponible (retardo en la propagación, el índice de error de bits y la tasa de transferencia de datos.)	Soporta mediante TCL
Modelado de transmisión de paquetes			Disponible
Complejidad	Alta	Baja	Media

Fuente: El autor

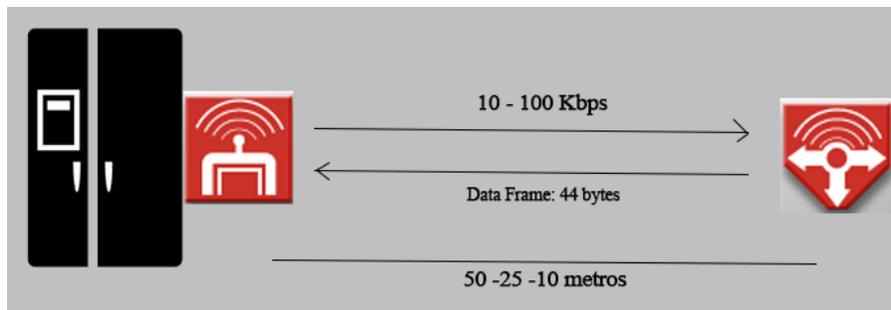
#### 4.4.1. Escenario 1.

Para el despliegue de este escenario se propone un enlace inalámbrico punto a punto, entre el nodo 1 y un concentrador, tal como lo muestra la figura 34, donde se establecerá comunicación mediante el protocolo de comunicación propuesto en éste estudio. El nodo terminal representa al

electrodoméstico inteligente en un ambiente HAN simulado, el cual transmitirá un flujo de datos hacia el concentrador (trama de 44 bytes), considerando como periodo de transmisión cada 1 segundo, para una tasa de transferencia de 10 Kbps, para un alcance de 50, 25 y 10 metros, con el propósito de analizar y obtener los tiempos de propagación, tiempo de transmisión, analizar el BER para cada distancia, tasa de paquetes perdidos en la transmisión.

#### Parámetros de simulación.

- Trama: 44 bytes.
- Velocidad de Propagación: 10 Kbps
- Distancia del nodo 1: 50, 25 y 10 metros
- Tiempo de simulación de escenario: 5 min.
- Periodo de envío de datos: 10 segundos



*Figura 34.* Referencia de escenario propuesto (OPNET)

Fuente: OPNET (Riverbed Modeler Academic Edition)

Se propone ejecutar el mismo escenario 1 e identificar que ocurre si se le incrementa la velocidad de propagación a 50 y 100 Kbps, para cada una de las distancias propuestas (50, 25 y 10 metros), analizar y obtener los tiempos de propagación, tiempo de transmisión, analizar el BER para cada distancia, tasa de paquetes perdidos en la transmisión.

Parámetros propuestos para Escenario 1:

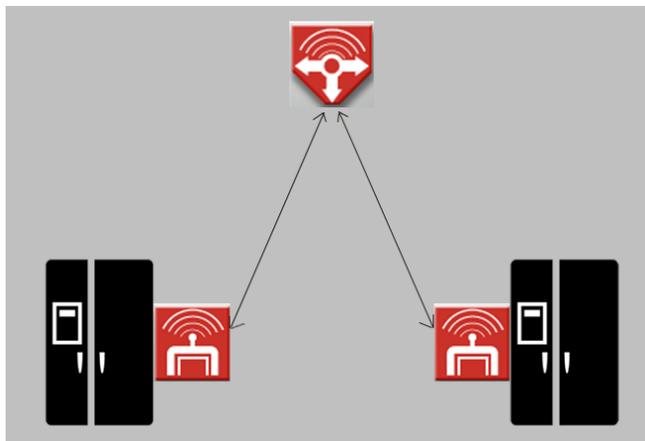
- Trama: 44 bytes.
- Velocidad de Propagación: 50 y 100 Kbps
- Distancia del nodo 1: 50, 25 y 10 metros
- Tiempo de simulación de escenario: 5 min.
- Periodo de envío de datos: 10 segundos

#### **4.4.2. Escenario 2.**

El presente escenario se establece comunicación entre dos nodos terminales y un concentrador, tal como muestra la figura 35, donde el nodo 1 y nodo 2 envían simultáneamente paquetes al concentrador (trama de 44 bytes), con una tasa de transferencia de 10 kbps, para un rango de distancia de 50, 25 y 10 metros (separación de cada nodo). Analizar cuál es el que transmite primero, cálculo del BER con respecto a cada distancia, tiempos de transmisión de datos, tiempo de transmisión y tasa de paquetes errados.

Parámetros de propuestos para Escenario 2.

- Trama: 44 bytes.
- Velocidad de Propagación: 10 Kbps
- Distancia entre nodo 1 y nodo 2: 50, 25 y 10 metros
- Tiempo de simulación de escenario: 5 min.
- Periodo de envío de datos: 10 segundos



*Figura 35.* Referencia de escenario propuesto (OPNET)

Fuente: OPNET (Riverbed Modeler Academic Edition)

Se propone ejecutar el escenario 2 e identificar que ocurre si se le incrementa la velocidad de propagación a 50 y 100 Kbps, para cada una de las distancias propuestas (50, 25 y 10 metros) y obtener que nodo es el que transmite primero, tiempos de propagación, tiempos de transmisión, BER sobre distancia y tasa de paquetes errados.

#### **4.4.3. Escenario 3.**

El presente escenario propone replicar los mismos conceptos y parámetros de simulación de los escenarios 1 y 2, considerando aplicarlo mediante la simulación del protocolo de comunicación ZigBee, con el fin de establecer una comparativa entre los resultados obtenidos con el protocolo de comunicación propuesto y los resultados del protocolo ZigBee, con respecto a tiempos de propagación, tiempos de transmisión, BER, tasa de paquetes errados, para los diferentes rangos de distancia.

#### **4.4.4. Escenario 4.**

Luego de analizar el primero y segundo escenario, éstos servirán para que se le implemente como mecanismo de seguridad la encriptación AES 128 bits, para mantener seguro el mensaje transmitido hacia el concentrador, para lo cual en la trama transmitida se habilitara el campo de seguridad respectivo, con el fin de analizar las variaciones o aumento en tiempos de retardo. Es decir, poder comprender como el mecanismo de seguridad por un lado permite mantener la información segura, pero por otro lado surgen cambios en cuanto a los tiempos de propagación y transmisión para una transmisión segura de datos, entre los nodos involucrados en un ambiente HAN simulado.

## Conclusiones.

- Son varios los países en el mundo, que se encuentran creando políticas para satisfacer las necesidades de la creciente demanda de energía eléctrica, las emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de fuentes no renovables, a través de las redes eléctricas inteligentes, que son altamente administradas desde el hogar hasta la generación eléctrica. Los programas gubernamentales y proyectos piloto invierten grandes sumas de dinero con el fin de apoyar el desarrollo y despliegue de las redes eléctricas inteligentes a través de la implementación de dispositivos de medición avanzada, permitiendo que se desarrollen varias aplicaciones para ambientes del hogar, con el fin concientizar el uso eficiente de energía, patrones de consumo, ahorro de energía, gestión de la demanda, etc.
- Según el análisis de protocolos de comunicación más usados en sistemas y aplicaciones de redes de área del hogar, permitió definir las fortalezas y debilidades de cada uno de los protocolos (Wifi, ZigBee, Z-Wave y Bluetooth), concluyéndose que el protocolo de comunicación ZigBee, dado que es uno de los que más se ajusta a sistemas HAN y mejores características presenta en cuanto a su velocidad de datos considerable para aplicaciones HAN, trabaja a frecuencia no licenciada, gran cantidad de nodos pueden ser incorporados a la red, baja potencia de trabajo permitiendo el ahorro de energía, factor importante que se destaca de los demás protocolos de comunicación.
- Luego del análisis pertinente se determinó que se podría definir parámetros que debe tener un protocolo de comunicación para un ambiente HAN, con características de sincronización de los datos, mecanismos de integridad de la información, acuse de recibo, balizado para minimizar el uso de energía, trama de datos del mensaje HAN, y comprobación de errores,

dando así un tamaño de trama de 44 bytes como máximo, y teóricamente con una transferencia de datos de 100kbps se tiene un tiempo de transmisión de trama de 3,5 milisegundos, permitiendo una transmisión de datos adecuada para sistemas HAN, pero en cuanto a implementación de dicho protocolo, se requerirá alto costos para el despliegue del mismo y será necesario la simulación del protocolo para definir sus parámetros en un ambiente real. Por lo que considerando que en varios países se está utilizando para el despliegue de redes de área del hogar el protocolo ZigBee, se sugiere utilizar dicho protocolo, ya que permite un ahorro de costos de implementación en electrodomésticos inteligentes, por cuanto ya se encuentra definido, brinda grandes ventajas de cobertura, frecuencia de operación, velocidad de datos, capacidad de operar a poca potencia, ayudando al ahorro de energía y consumo considerable de baterías.

**Recomendaciones.**

- Para proyectos futuros se recomienda que se ejecute una simulación del protocolo propuesto en el presente estudio, a través de la herramienta OMNeT++, para una ambiente simulado de una red de área del hogar, con el propósito de analizar cada uno de los campos de la trama y así comprobar su desempeño en la comunicación de dispositivos inteligentes en un ambiente de área del hogar para las redes eléctricas inteligentes, además de ello se podría establecer una comparativa entre el protocolo simulado y el protocolo ZigBee, para definir las características de dichos protocolos, los beneficios y desventajas que presentan para el desarrollo de sistemas para HAN.
- Tomando como antecedente el presente estudio de protocolo de comunicación para una red de área del hogar, se recomienda que, para un proyecto en un futuro, implementar el protocolo de comunicación en un ambiente real, mediante el desarrollo de un prototipo de censado y adquisición de datos de un electrodoméstico convencional, y por medio del protocolo de comunicación propuesto, poder establecer comunicación para un sistema de gestión de energía, patrones de consumo, demanda de energía, etc.
- El estudio y propuesta de este nuevo protocolo, abre puertas a que se siga investigando y desarrollando proyectos destinados a la administración y gestión de la energía eléctrica en los electrodomésticos, dado que un protocolo de comunicación es la parte fundamental para poder establecer una correcta comunicación entre los dispositivos del hogar, y muy aplicable para redes de área del hogar en un ambiente de Smart Grid.
- Se recomienda que en nuestro país se desarrollen políticas que permitan el despliegue de redes eléctricas inteligentes, con el fin de alcanzar una eficiencia de energía e implementar

aplicaciones de gestión de la demanda del hogar y patrones de consumo, que permitan al usuario final, alcanzar un ahorro energético y administración adecuada de sus dispositivos electrónicos inteligentes del hogar. Además de incentivar al desarrollo de proyectos pilotos para fomentar capacitaciones de redes eléctricas inteligentes y consumo adecuado de la energía eléctrica.

## Glosario de Términos y Acrónimos

- AMI: Infraestructura de Medición Avanzada
- BEP: Barril equivalente de petróleo.
- BER: Tasa de error binario.
- CO: Monóxido de carbono.
- CONELEC: Consejo Nacional de Electricidad.
- DEI: Dispositivos Electrónicos Inteligentes
- DER: Recursos de Energía Distribuidos.
- DG: Generación Distribuida.
- FACTS: Sistemas de transmisión de corriente alterna flexible.
- FAN: Field Area Network (Redes de Área de Campo).
- GUI: Interfaz gráfica de usuario.
- HAN: Home Area Network (Red de Área del Hogar).
- HEM: Administración de energía doméstica.
- Home Plug: Familia de especificaciones de comunicación por línea eléctrica.
- HVDC: Sistema de Corriente Continua de alta tensión.
- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos).
- MEER: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable.
- NIST: Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.
- OMNet++: Simulador modular de eventos discretos de redes orientado a objetos.

OPNET: Simulador de red se utiliza para simular el comportamiento y el rendimiento de cualquier tipo de red. Se diferencia de otros simuladores en su potencia y versatilidad.

O-QPSK: Desplazamiento de fase de cuadratura compensada.

PCC: Punto de acoplamiento común.

PDU: Unidades de medición fasorial.

PHR: Encabezado de la trama física.

PLC: Comunicación de línea de alimentación

PSDU: Unidad de datos del servicio de la capa física.

REDIE: Redes Inteligentes Ecuador.

ROCOF: Tasa de cambio de frecuencia.

SCADA: Control de supervisión y adquisición de datos.

SFD: Delimitador de paquetes.

SG: Smart Grid (Red eléctrica inteligente).

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación.

VPN: redes privadas virtuales

WAN: Wide Area Network (Red de área Amplia).

## Bibliografía

- Andreadou, N., Olariaga, M., & Fulli, G. (2017). *Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications*. Neville Watson.
- Bell, K. (02 de 08 de 2017). *Sudáfrica - Tecnología de la información*. Obtenido de export.gov: [www.export.gov](http://www.export.gov)
- Berrío, L., & Zuluaga, C. (s.f.). *Concepts, Standards and Communication Technologies in Smart Grid*.
- Cambridge. (2012). *Smart Grid Communications and Networking*. Cambridge University Press.  
doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781139013468>
- Cano, F., Ranalkar, S., & Amoo, A. (2016). Home energy management system.
- CENACE. (2015). *Planificación estratégica 2015 - 2017*.
- Consultores:, I. (2016). *ESTUDIO DE MEDIDORES INTELIGENTES Y SU IMPACTO EN TARIFAS*.
- Energy, D. (2010). *Communications Requirements of Smart Grid Technologies*. Utilities Telecom Council.
- eskom. (2016). *eskom.co.za*. Obtenido de <http://www.eskom.co.za>
- Gungor, C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., & Hancke, G. (2013). A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements. 15.
- Hafeez, A., Kandil, N., & Al-Omar, B. (2014). Smart Home Area Networks Protocols within the Smart Grid Context.
- Hung-Yu, W. (s.f.). IEEE 802.11. *National Taiwan University*.
- INER. (2015). *Energía limpia. Revista Científica del desarrollo energetico., 2.*

- Irmak, E., Kose, A., & Gocmen, G. (2016). Simulación y monitoreo inalámbrico basado en ZigBee de la cantidad de energía consumida en hogares inteligentes. *Irmak, E., Kose, A., y Gocmen, G. (2016). Simulación y monitoreo inalámbrico basado en ZigBee de la cantidad de energía consumida en hogares inteligentes. Conferencia Internacional IEEE 2016 sobre Investigación y Aplicaciones de Energía Renovable (ICRERA). doi:10.1109 / icrera.2016.7884488*
- Janaka Ekanayake, K. L. (2012). *Smart Grid: Technology and applications*. 279: Wiley.
- Jokar, P., Nicanfar, H., & Leung, V. (2011). *Specification-based Intrusion Detection for Home Area Networks in Smart Grids*. IEEE SmartGridComm.
- Kennedy, S. (2012). Advance Metering Infrastructure (AMI) in South Africa. Eskom. Obtenido de [https://www.engerati.com/sites/default/files/Session%209\\_Kennedy%20P.%20Subramoney.pdf](https://www.engerati.com/sites/default/files/Session%209_Kennedy%20P.%20Subramoney.pdf)
- Kilbourne, B., & Bender, K. (2010). *Policy Recommendations Enabling Current and Future Applications*.
- Li, H., Lai, L., & Zhang, W. (2011). *Communication requirement for reliable and secure state estimation and control in smart grid* (Vol. 2). (I. T. Grid, Ed.) doi:10.1109/TSG.2011.2159817
- Liu, J. (08 de agosto de 2018). La adopción de Zigbee crece en todo el mundo para reducir el uso de energía. Obtenido de <https://mysmahome.com/news/48264/zigbee-adoption-grows-to-cut-down-power-consumption/>
- López, J. C. (2016). *Estudio de la situación actual de las Smart Grids*. Cantabria, España. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/9143/386883.pdf>

- Maestre, J. (2015). *Domótica para ingenieros*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Mahmood, A., Javaid, N., & Razzaq, S. (2014). A review of wireless communications for smart grid. 13.
- Meiling, S., Schmidt, T., & Steinbach, T. (2015). On performance and robustness of internet-based smart grid communication: A case study for Germany. doi:10.1109/SmartGridComm.2015.7436316
- Moreno, J., & Fernández, D. (2017). Informe Técnico: Protocolo ZigBee. 36.
- Muneer, Y., Wail , M., & Ashwaq , K. (2016). Smart Homes Automation using Z-wave Protocol.
- Murat, K., Manisa, P., & Saifur , R. (2014). Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN.
- Naruchitparames, J., Güneş, M., & Evrenosoglu, C. Y. (2011). *Secure communications in the smart grid*. doi:10.1109/CCNC.2011.5766362
- NIST, U. (2012). *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0*. U.S. Dept. of Commerce.
- Power Systems Engineering Research Center. (2012). *Communication Needs and Integration Options for AMI in the Smart Grid*.
- Richard Peter Lewis, D. P. (2009). Assessment of Communication Methods for Smart Electricity Metering in the U.K. *IEEE*, 4.
- Sarijari, M., Lo, A., Abdullah, M. S., Heemstra , S., Niemegeers, I., & Rashid, R. (2013). *Coexistence of Heterogeneous and Homogeneous Wireless Technologies in Smart Grid-Home Area Network*. IEEE computer society. doi:10.1109/ICPADS.2013.103
- Shein, R. (2010). *Security Measures for Advanced Metering Infrastructure Components*. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). doi:10.1109/APPEEC.2010.5448261

- Smart Metering Initiative. (2014). *Ministry of Energy*. Obtenido de <http://www.auditor.on.ca/en/content/annualreports/arreports/en14/311en14.pdf>
- smart, e. (2014). *Smart meters Africa: Kenya Power*.
- Tarun , A. (2016). ZigBee Wireless Technology Architecture and Applications. Obtenido de <https://www.elprocus.com/what-is-zigbee-technology-architecture-and-its-applications/>
- uribe, N., Angulo, I., de la Vega, D., & Arzuaga, T. (2017). *Estudio de la viabilidad de Ip sobre PLC para aplicaciones en SG mas alla de la medida avanzada*. IV Congreso Smart Grids Madrid .
- Vehbi C Güngör, D. S. (2011). Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, 11.
- Xi Fang, S. M. (2012). *The New and Improved Power Grid: A Survey*. IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. 14.
- Y. Peizhong, A. I. (2011). *Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications*. IEEE Trans. Smart Grid.