

REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS APLICADAS EN SMART GRIDS

HUGO FERNANDO SÁNCHEZ MARTÍNEZ
ANDRÉS MAURICIO OVIEDO PINZÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES (E3T)
BUCARAMANGA, COLOMBIA
2012

REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN REDES DE SENSORES
INALÁMBRICOS APLICADAS EN SMART GRIDS

HUGO FERNANDO SÁNCHEZ MARTÍNEZ
ANDRÉS MAURICIO OVIEDO PINZÓN

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Telecomunicaciones

Director:
Mg. Pedro Javier Trujillo Tarazona

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES (E3T)
BUCARAMANGA, COLOMBIA
2012

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS EN SMART GRIDS	15
1.1 DESCRIPCIÓN DE UNA SMART GRID	15
1.1.1 Concepto: “Que es una Smart Grid”	15
1.1.2 Un Modelo conceptual de Smart Grid	15
1.1.3 Dominios del modelo conceptual de Smart Grid	18
1.1.3.1 Clientes	18
1.1.3.2 Mercados	19
1.1.3.3 Proveedores de servicios	19
1.1.3.4 Operaciones	21
1.1.3.5 Grandes generadores	22
1.1.3.6 Transmisión	23
1.1.3.7 Distribución	24
1.2 ARQUITECTURA DE UNA WSN APLICADA EN UNA SMART GRID	25
1.2.1 Concepto: “Que es WSN?”	25
1.2.2 Elementos de una WSN	25
1.2.2.1 Nodos sensores	25
1.2.2.2 Puerta de enlace o Gateway	25
1.2.2.3 Estación base	26
1.2.3 Topologías comunes en WSN	26

1.2.4	WSN aplicado en Smart Grid	27
1.2.5	Despliegue de una WSN en Smart Grid	28
1.2.5.1	Despliegues en el dominio del cliente	28
1.2.5.2	Despliegues en los dominios de distribución	29
1.2.6	Estructura de la red de comunicaciones de una WSN en una Smart Grid	29
2.	TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS	33
2.1	WIFI	33
2.1.1	Características de WiFi	33
2.1.2	WiFi para aplicaciones de Smart Grid	36
2.1.3	Limitaciones de la tecnología WiFi	36
2.2	TECNOLOGÍA CELULAR	37
2.2.1	Características de la tecnología celular	37
2.2.2	La tecnología móvil para aplicaciones de Smart Grid	40
2.2.2.1	Interfaz SCADA para la subestación de distribución a distancia	40
2.2.2.2	Seguimiento y medición de DERs remotos	40
2.2.3	Limitaciones de la tecnología celular	41
2.3	WIMAX	43
2.3.1	Características de la tecnología WiMAX	43
2.3.2	WiMAX para aplicaciones de Smart Grids	45
2.3.2.1	Wireless Automatic Meter Reading (WMAR)	45
2.3.2.2	Precios en tiempo real	46
2.3.2.3	Detección de corte y Restauración	46
2.3.3	Limitaciones de la tecnología WiMAX	47
2.4	BLUETOOTH	48

2.4.1	Características de la tecnología Bluetooth	49
2.4.2	Limitaciones de la tecnología Bluetooth	50
2.5	ZIGBEE	52
2.5.1	Tecnología ZigBee en Smart Grid HAN	53
2.5.1.1	Características de ZigBee para Smart Grid	55
2.5.2	Limitaciones de la tecnología ZigBee	56
3.	CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS PARA UNA WSN EN UNA SMART GRID	58
3.1	METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS	58
3.2	DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE UTILIDAD	58
3.2.1	Topología	58
3.2.2	Escalabilidad	59
3.2.3	Requerimientos de hardware	60
3.2.4	Conectividad	61
3.2.5	Seguridad	62
3.2.6	Función de utilidad principal	62
3.3	CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO	62
3.3.1	Aplicaciones al interior de los predios del cliente	63
3.3.2	Estructura AMI	63
3.3.3	Estructura DA	68
4.	COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS	72
4.1	RESUMEN DE EVALUACIONES	72
4.2	ÁNÁLISIS DE RESULTADOS	72

CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	83
BIBLIOGRAFÍA	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Interacción de actores en diferentes dominios de Smart Grid a través de comunicación segura.	16
Figura 2.	Dominio del cliente	18
Figura 3.	Dominio de mercados	20
Figura 4.	Dominio del proveedor de servicios	20
Figura 5.	Dominio de operaciones	21
Figura 6.	Dominio de grandes generadores	22
Figura 7.	Dominio de transmisión	23
Figura 8.	Dominio de distribución	24
Figura 9.	Topologías comunes en WSN	26
Figura 10.	Estructura de un despliegue AMI	29
Figura 11.	Estructura de red de comunicaciones de una WSN en Smart Grid	31
Figura 12.	Monitoreo remoto vía red celular	39
Figura 13.	Tecnología celular para SCADA y monitoreo de la red de energía	41
Figura 14.	Comunicación WiMAX para WARM.	46
Figura 15.	Modelo del protocolo Bluetooth	48
Figura 16.	Arquitectura ZigBee	52
Figura 17.	HAN basado en la tecnología ZigBee	54
Figura 18.	Comunicación inalámbrica multi-salto	57
Figura 19.	Despliegue propuesto AMI	64
Figura 20.	Despliegue propuesto para DA	68

RESUMEN

TITULO:

REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADAS EN SMART GRIDS*

AUTORES:

ANDRÉS MAURICIO OVIEDO PINZÓN y HUGO FERNANDO SÁNCHEZ MARTÍNEZ**

PALABRAS CLAVES:

Smart Grid, WSN, WiFi, WiMAX, Tecnología celular, Bluetooth, ZigBee.

DESCRIPCIÓN

Con el desarrollo continuo de tecnologías de comunicación inalámbrica cada vez más eficientes y la naturaleza de bajo costo de las redes de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Networks), la aplicación de las WSN en el sistema eléctrico inteligente (Smart Grid) se vuelve un campo de análisis en el medio actual, apareciendo variedad de grupos de trabajo e investigaciones en esta rama del conocimiento. En este documento, después de dar una breve descripción del concepto de Smart Grid y WSN, así como de sus estructuras, se propone un despliegue para la red de comunicaciones de la infraestructura AMI (Advanced Metering Infrastructure) de energía y el control remoto automatizado o DA (Distributed Automation) de los sistemas de distribución primario y secundario de la red eléctrica por medio de redes de sensores inalámbricos, identificando los dominios o entornos que comprende este despliegue. Posteriormente se realiza una comparación de las tecnologías WiFi, Celular, WiMAX, Bluetooth y ZigBee en cada uno de los entornos identificados anteriormente, utilizando una metodología multiatributo propuesta. Todo esto en miras de dar un indicio de cual tecnología inalámbrica se acomoda mejor a cada entorno dentro del despliegue propuesto para quienes en algún momento dado, decidan implementar una solución para AMI o DA en un entorno de Smart Grid.

* Trabajo de grado

** Facultad Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, director Pedro Javier Trujillo Tarazona

ABSTRACT

TITLE:

REVIEW OF COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN WIRELESS SENSOR NETWORKS APPLIED IN SMART GRIDS

AUTHORS:

ANDRÉS MAURICIO OVIEDO PINZÓN & HUGO FERNANDO SÁNCHEZ MARTÍNEZ**

KEY WORDS:

Smart Grid, WSN, WiFi, WiMAX, Cellular technology, Bluetooth, ZigBee.

DESCRIPTION

With the continuous development of more efficient wireless communications technologies and the low cost nature of the Wireless Sensor Networks (WSN), the appliance of Wireless Sensor Networks on the smart electrical system (Smart Grid) became an analysis field in the current environment, appearing variety of working groups and research in this branch of knowledge. This paper, after giving a brief description of the concept of Smart Grid and Wireless Sensor Networks, as well as their conceptual structures, proposes a deployment for the energy Advanced Metering Infrastructure (AMI) communications network, and the remote automated control or Distributed Automation (DA) of the primary and secondary distribution systems of the electrical delivery system using Wireless Sensor Networks, identifying the domains or environments covered in this proposed deployment. Later it's made a comparison of the WiFi, Cellular, WiMAX, Bluetooth and ZigBee technologies, on each of the environments that have been previously identified by proposing and using a multi-attribute methodology. All this work is done in order to give a first indication of which wireless technology is better settled on each environment within the proposed deployment, for those that at some point, decide to implement a solution for AMI or DA in a Smart Grid environment.

* Grade Work

** Faculty of Physical Mechanical, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications, directed By Pedro Javier Trujillo Tarazona

INTRODUCCIÓN

Desde que la humanidad empezó a hacer uso de la energía eléctrica como uno de los principales motores para mover el mundo se han realizado numerosos avances para mantener el suministro de energía de una forma confiable, instantánea, permanente y económica para el consumidor, minimizando la complejidad de la red. Hoy en día se cuentan con una serie de tecnologías que facilitan la monitorización y control de diversas variables del sistema a un costo razonable, por lo que los esfuerzos actuales van encaminados a concebir un sistema eléctrico que sea más eficiente, dinámico e interactivo, al cual se le ha denominado Smart Grid.

El término Smart Grid (o red inteligente), se refiere a una red física que opera y se comunica de forma más eficaz, eficiente y fiable que la red eléctrica convencional. Y en un marco más integral, implica la generación, transmisión, distribución y consumo de energía como elementos activos del sistema [36]. Incluso el término comprende la integración de la arquitectura de las tecnologías de la información como elemento esencial en conjunto con la arquitectura de los sistemas de potencia y la arquitectura de comunicaciones [37].

Con el objetivo de lograr la implementación de estas redes inteligentes se han identificado diversas tecnologías de comunicación tanto cableadas como inalámbricas. Los sistemas inalámbricos avanzados ofrecen ventajas como son productos económicos, instalaciones de bajo costo, acceso generalizado y comunicaciones móviles, que las tecnologías de cable e incluso las tecnologías inalámbricas antiguas a menudo no pueden proporcionar [38], lo que hace atractivo el uso de estas tecnologías en Smart Grid. Sin embargo la decisión de utilizar tecnologías inalámbricas se debe tomar teniendo en cuenta los requisitos de la aplicación Smart Grid que se va a implementar, estos requisitos deben estar

bien definidos y contar con especificaciones para establecer aspectos como niveles de tráfico, rendimiento y calidad del servicio.

Dado que existen numerosas opciones en cuanto a tecnologías inalámbricas de comunicación, la selección de una de ellas para una determinada aplicación es una tarea que requiere tiempo y puede resultar compleja. Es por esto que en este trabajo se realiza una revisión de diferentes opciones de tecnologías inalámbricas que pretende proporcionar una ayuda a los diseñadores y desarrolladores de redes inteligentes en su evaluación y escogencia de la tecnología más apropiada para su propósito particular. En este documento se estudian 5 opciones de tecnologías inalámbricas las cuales son WiFi, Celular, WiMAX, Bluetooth y ZigBee, dentro de un entorno limitado a las posibles aplicaciones que tengan las redes de sensores inalámbricos (WSN) dentro de una Smart Grid.

El documento inicia con un primer capítulo donde se presenta el concepto y descripción de una Smart Grid, así mismo se muestra el concepto de una Red de Sensores Inalámbricos o WSN, los elementos que la componen y algunas topologías comunes, para después proponer una posible estructura de aplicación de las WSN en una Smart Grid y analizar la estructura de la red de comunicaciones de la misma. Finalmente se realiza un análisis y comparación de las diferentes tecnologías inalámbricas para la estructura de red propuesta.

1. REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS EN SMART GRIDS

1.1 DESCRIPCIÓN DE UNA SMART GRID

1.1.1 Concepto: “Que es una Smart Grid”

“Smart Grid” es una red planeada de rango nacional que usa las tecnologías de información para entregar electricidad de una forma eficiente, confiable y segura. Esta “Smart Grid” representa un salto desde un sistema análogo de proveedores de energía desconectados, o sistema de una vía, a una red nacional interoperable, digital y de dos vías. Es una forma más eficiente de distribuir y diversificar las fuentes de energía (incluyendo las amigables con el medio ambiente como la eólica y solar), así como un sistema de comunicaciones de tamaño nacional. [1] Una Smart Grid emplea productos y servicios innovadores junto con monitoreo, control y comunicación inteligente, y tecnologías de auto reparación para:

- Facilitar la conexión y operación de generadores de todos los tamaños y tecnologías.
- Permitir a los consumidores formar parte en la optimización de la operación del sistema.
- Proveer a los consumidores mayor información y variedad de suministros.
- Reducir significativamente el impacto ambiental de todo el sistema de suministro eléctrico.
- Entregar mayores niveles de confiabilidad y seguridad en el suministro.[2]

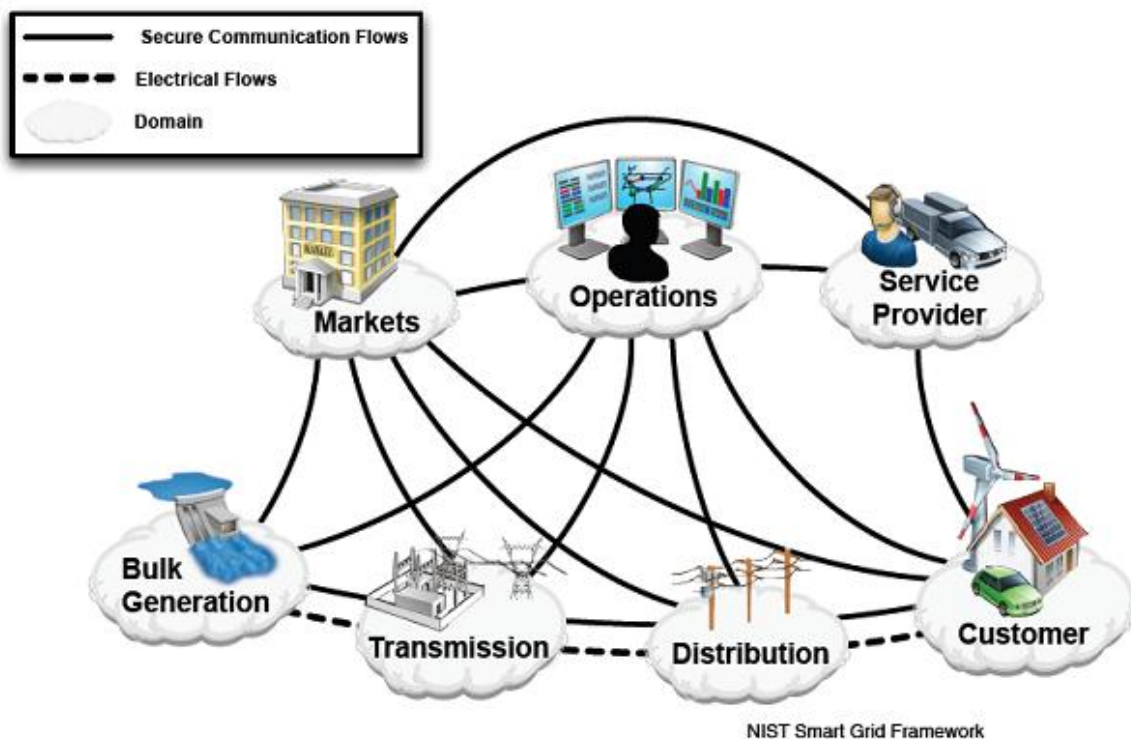
1.1.2 Un Modelo conceptual de Smart Grid

De acuerdo con NIST [3] (National Institute of Standards and Technology), se tiene un modelo conceptual que parte de la figura 1.

Según esta figura, aparecen siete dominios, en los cuales se identifican ciertos actores, aplicaciones y características que se resumen en la tabla 1. Los actores incluyen dispositivos, sistemas, programas y partes interesadas que, toman decisiones e intercambian información necesaria para desarrollar aplicaciones. “Smart meters”, generadores solares y sistemas de control son ejemplos de dispositivos y sistemas. Aplicaciones son tareas desarrolladas por uno o más actores dentro de un dominio. [3]

También de la figura se pueden apreciar ciertas necesidades de comunicación y flujos de datos seguros, además de hacerse notoria que esta comunicación se debe dar bajo una figura de dos vías. Se profundizará más adelante cada uno de los dominios para ver las particularidades que puedan presentarse.

Figura 1. Interacción de actores en diferentes dominios de Smart Grid a través de comunicación segura.



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3].

Tabla 1. Dominios y actores en el modelo conceptual de Smart Grid

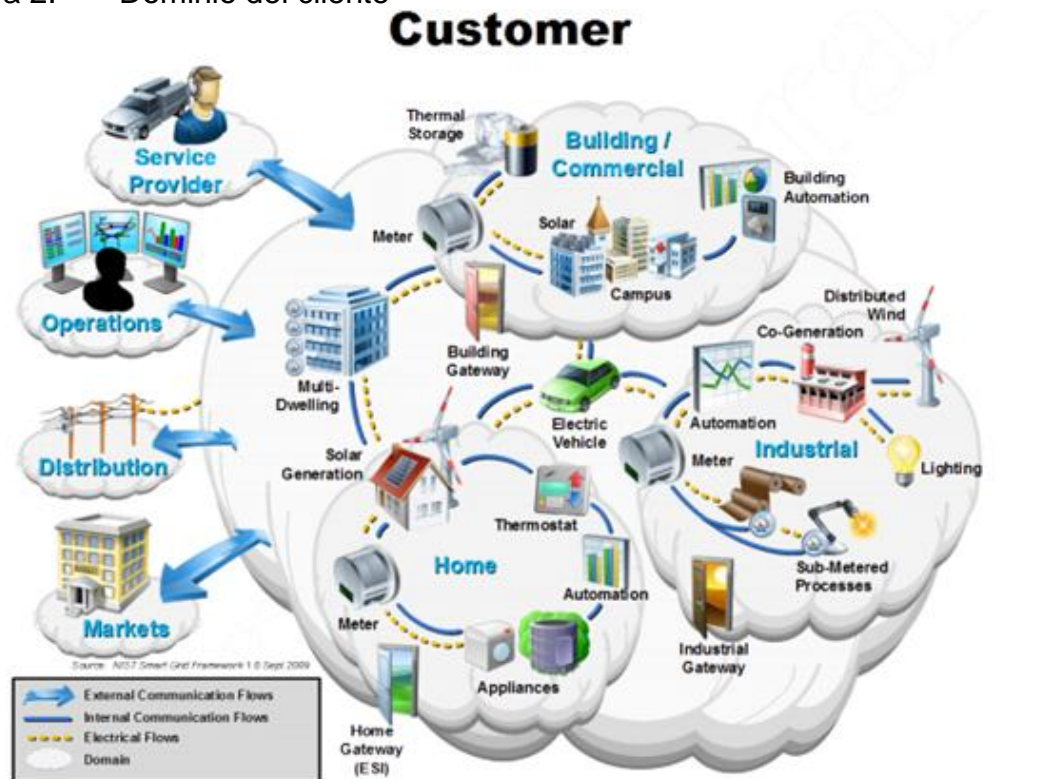
	Dominio	Actores en el dominio
1	Clientes (Customer)	Los usuarios finales de electricidad. Pueden también generar, almacenar y administrar el uso de energía. Tradicionalmente, tres tipos de clientes se discuten, cada uno en su propio dominio: residencial, comercial e industrial.
2	Mercados (Markets)	Los operadores y participantes del mercado de energía eléctrica.
3	Proveedor de servicios (Service Provider)	Las organizaciones proveedoras de servicios a clientes y utilidades.
4	Operaciones (operations)	Los administradores del movimiento de electricidad
5	Grandes generadores (Bulk generation)	Los generadores de electricidad en grandes cantidades. Puede también almacenar energía para posterior distribución.
6	Transmisión (Transmission)	Los transportadores de electricidad cuantiosa sobre grandes distancias. Pueden también almacenar y generar electricidad.
7	Distribución (Distribution)	Los distribuidores de electricidad desde y hacia los clientes. Pueden también almacenar y generar electricidad.

Adaptado de NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3], página 41.

1.1.3 Dominios del modelo conceptual de Smart Grid

1.1.3.1 Clientes

Figura 2. Dominio del cliente



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

El cliente es la parte interesada por la cual la red fue creada, es el dominio donde la energía es mayormente consumida. Los actores en este dominio le permiten al consumidor administrar el consumo y generación de energía, y en algunos casos, permiten controlar el flujo de información entre el cliente y otros dominios de la Smart Grid.

Su frontera se considera en la utilidad de medición y la “interfaz de servicios de energía” (ESI- Energy Services Interface), la cual también puede actuar como puente a los sistemas de infraestructura como el control de automatización de una

edificación, además de comunicarse con otros dominios a través del AMI (Advanced Metering Infrastructure) u otros medios como el internet.

Como se puede observar en la figura 2, en este dominio encontramos los subdominios Hogar, Comercial/Edificios e industrial, donde cada uno de estos tiene su propio actor de medida y ESI. [3]

Redes Identificadas para este dominio: HAN (Home Area Network), LAN (Local Area Network), IAN (Industrial Area Network), BAN (Building Area Network)

1.1.3.2 Mercados

Los actores del dominio de mercados, intercambian precios, balancean el suministro y la demanda dentro del sistema de potencia (Véase figura 3).

Este dominio se comunica con todos los demás dominios, actuando como centro general en donde se define el despacho de energía y se determinan las condiciones de mercado.

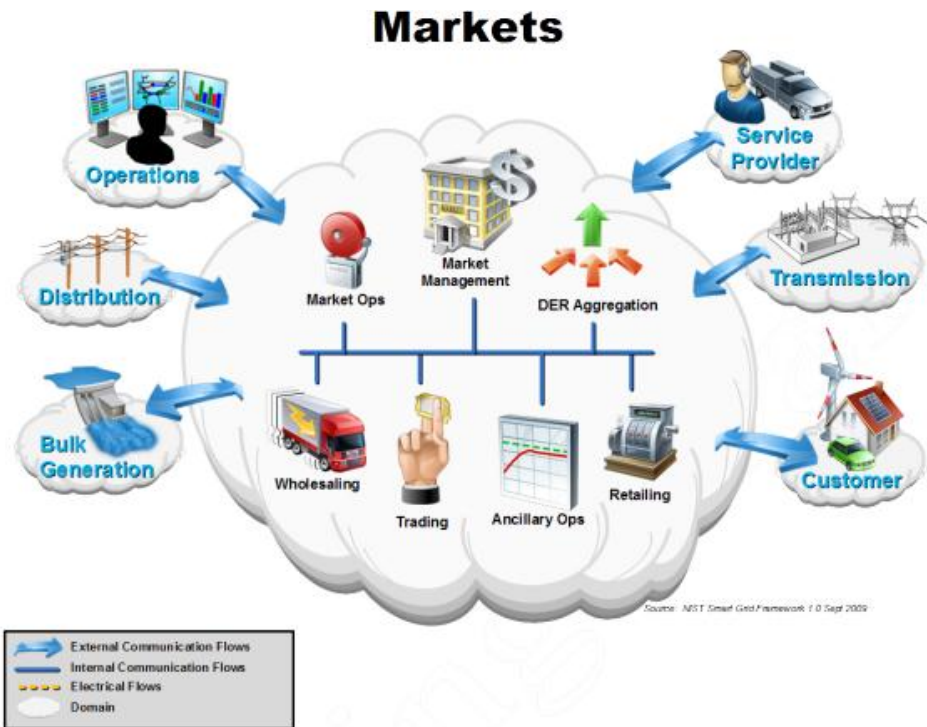
Para el dominio de mercados, mantener las comunicaciones de forma confiable, trazable y auditable es un aspecto importante para su funcionamiento. [3]

1.1.3.3 Proveedores de servicios

Los proveedores de servicio crearán e innovarán productos y servicios para satisfacer los requerimientos y oportunidades encontrados por la evolución de la Smart Grid (Véase figura 4).

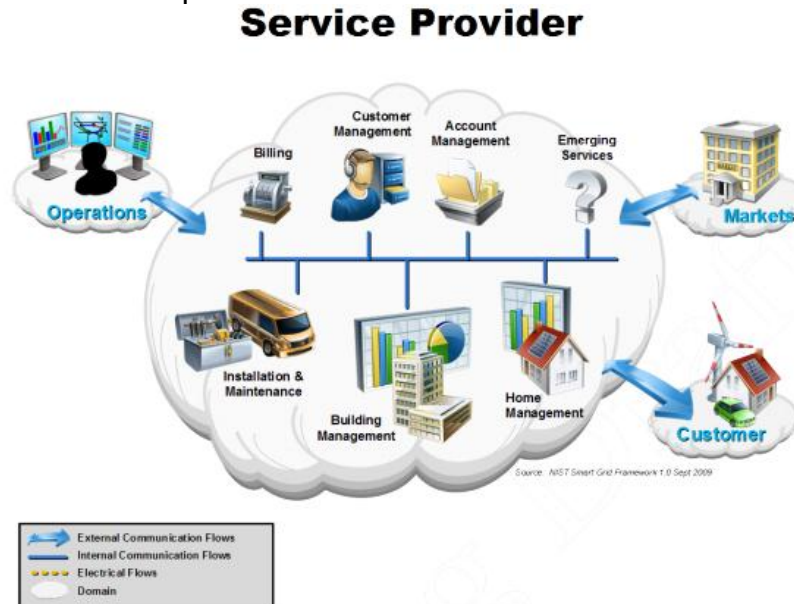
El reto prioritario en este dominio se encuentra en desarrollar interfaces y estándares que permitirán un mercado ecológico y dinámico mientras se protege la infraestructura eléctrica. [3]

Figura 3. Dominio de mercados



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

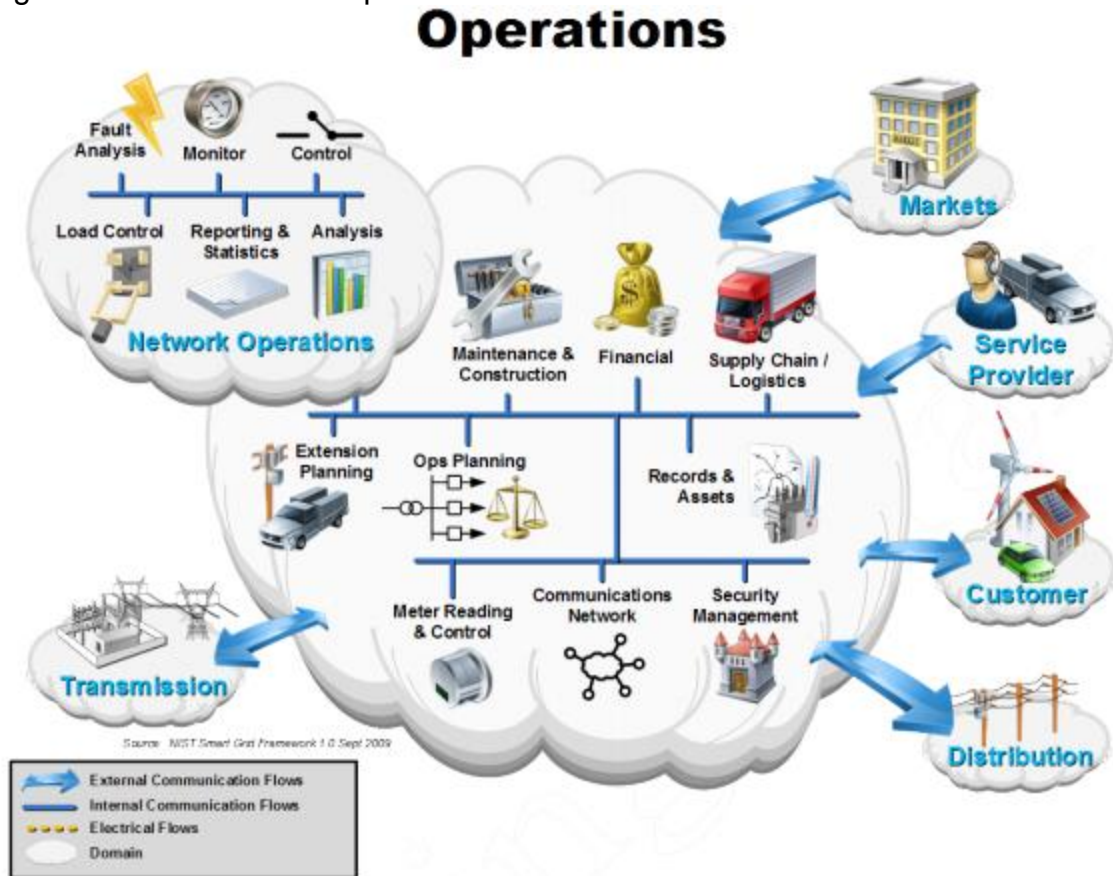
Figura 4. Dominio del proveedor de servicios



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

1.1.3.4 Operaciones

Figura 5. Dominio de operaciones



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

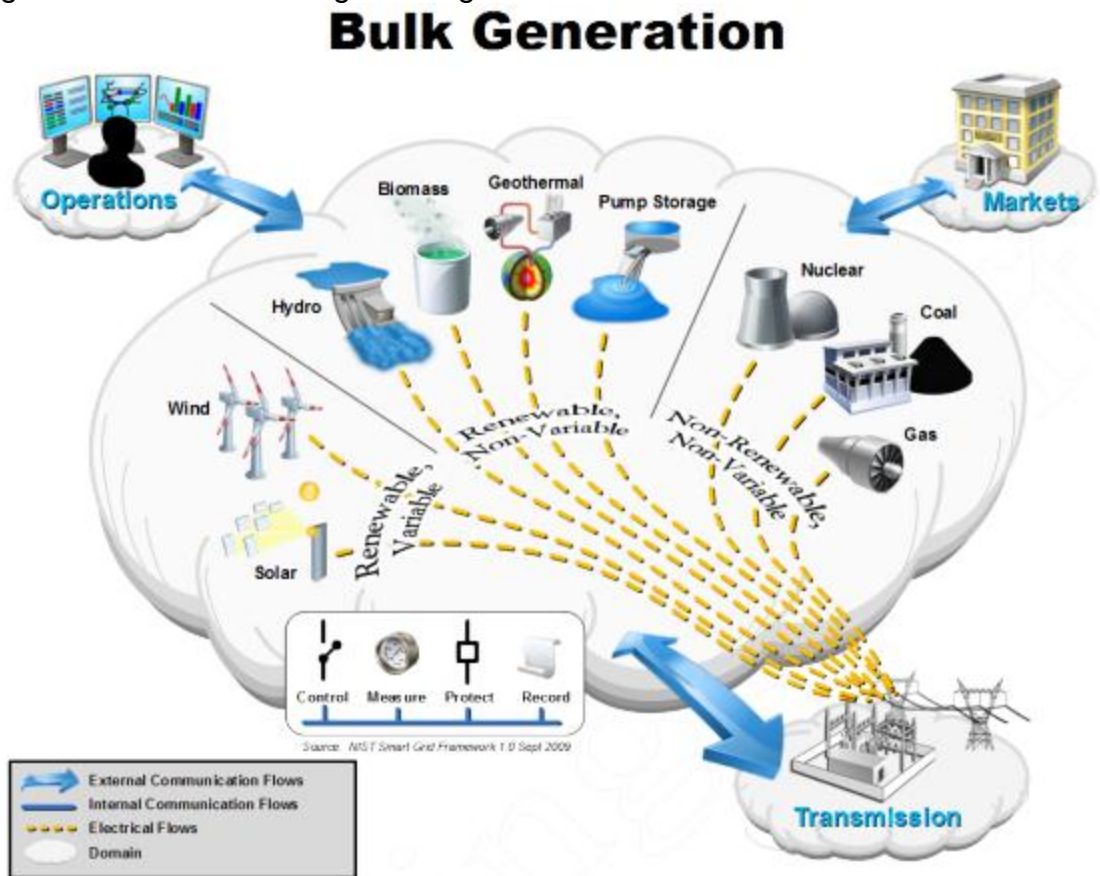
Los actores en este dominio son responsables de la fácil operación del sistema de potencia, y del manejo de la red incluyendo lo que esto implica (mantenimiento, planeación, monitoreo, control, atención al cliente, entre otras responsabilidades).

En operaciones de transmisión, los EMSs (Energy Management Systems) se usan para operar la transmisión de forma confiable y eficiente; en operaciones de distribución se usan DMSs (Distribution Management Systems) de forma similar. [3]

Redes Identificadas para este dominio: WAN (Wide Area Network), LAN, MAN (Metropolitan Area Network)

1.1.3.5 Grandes generadores

Figura 6. Dominio de grandes generadores



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

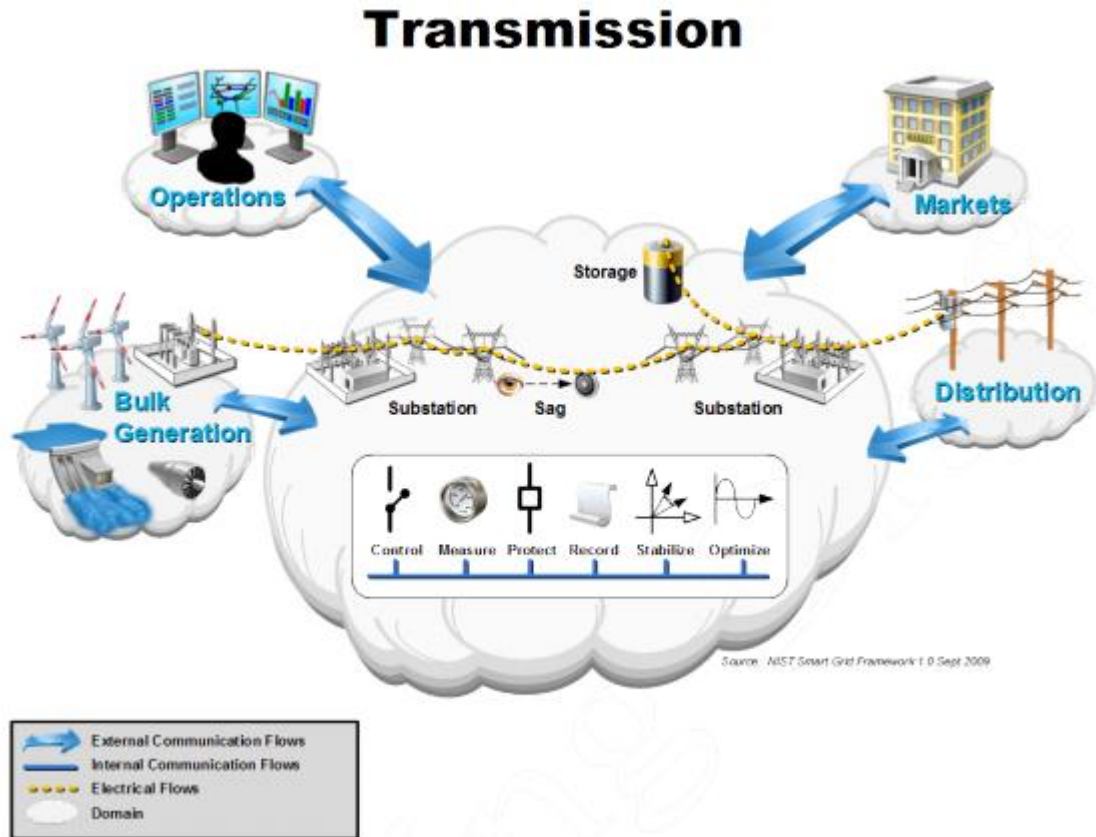
Siendo los generadores los primeros actores en el proceso de la entrega de energía a los consumidores, este dominio se encuentra eléctricamente conectado al sistema de transmisión, así como al dominio de transmisión. Esta conexión directa hace que la comunicación entre el dominio de generación y de transmisión sea de vital importancia para el buen funcionamiento del sistema en general.

Este dominio intercambia información también con los dominios de operación y mercados. [3]

Redes Identificadas para este dominio: LAN, IAN

1.1.3.6 Transmisión

Figura 7. Dominio de transmisión



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

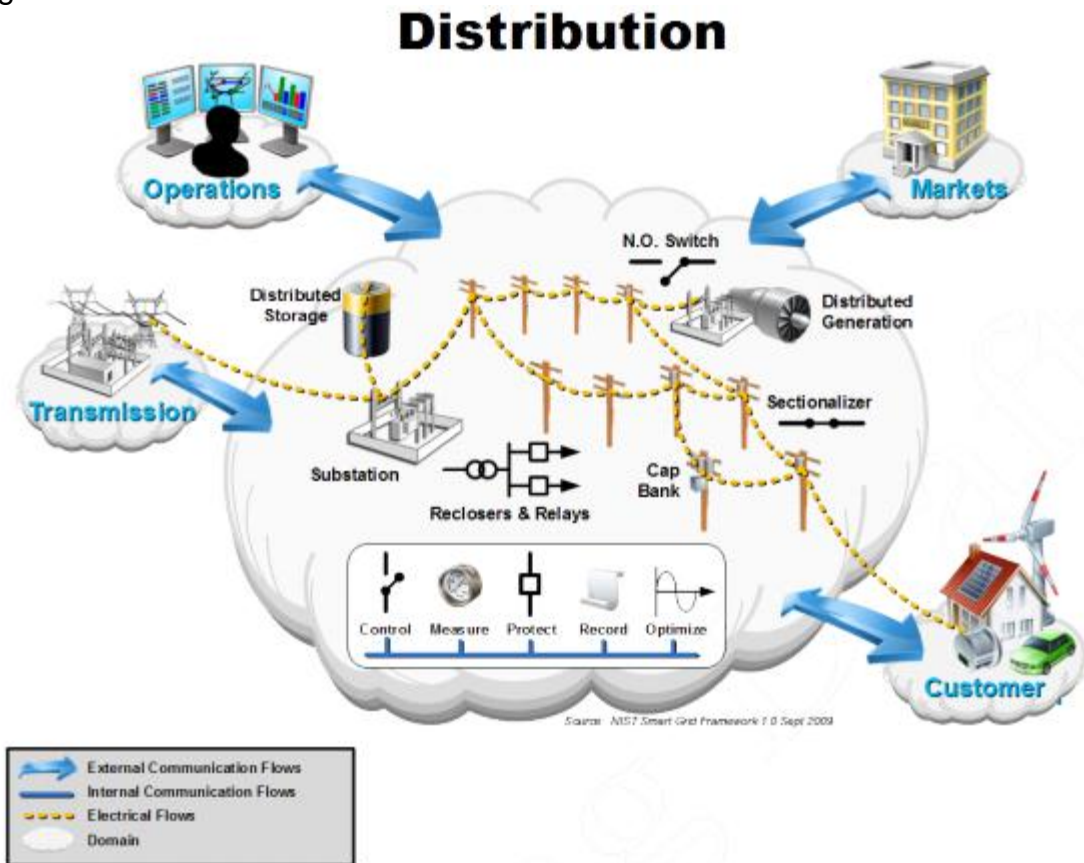
En este dominio se transmite la energía desde los generadores hacia el dominio de distribución a través de múltiples subestaciones.

Los actores en este dominio típicamente realizan las funciones descritas en la figura 7 y deben contener recursos de energía distribuida. Estas funciones se realizan mayormente dentro de las subestaciones, las cuales contienen equipos de control, protección y corte. Estas subestaciones se interconectan a través de líneas de transmisión generalmente monitoreadas por un sistema SCADA. [3]

Redes Identificadas para este dominio: MAN, WAN.

1.1.3.7 Distribución

Figura 8. Dominio de distribución



Fuente: NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, Feb. 2012[3]

Este dominio de distribución es la conexión eléctrica entre el dominio de transmisión, el dominio del cliente, puntos de medida de consumo, almacenamiento y generación distribuidos (Véase figura 8).

La confiabilidad de la distribución varía de acuerdo a su infraestructura, los tipos de actores que sean desplegados, y el nivel de comunicación que se tenga entre ellos y con los actores en otros dominios.

En la Smart Grid, este dominio se comunicara más cercanamente con el dominio de operación en tiempo real para administrar los flujos de potencia en un dominio de mercados más dinámico. [3]

Redes Identificadas para este dominio: MAN, WAN, LAN, IAN

1.2 ARQUITECTURA DE UNA WSN APLICADA EN UNA SMART GRID

1.2.1 Concepto: “Que es WSN?”

Wireless Sensor Networks (WSN) es el nombre genérico dado a una colección de dispositivos equipados con un procesador, que también tienen capacidades de medición y comunicación, además de organizarse en red. Brindando así, capacidades de monitoreo que han cambiado la forma en la que se recoge información de diferentes sistemas.

Una red de sensores es una red compuesta por un gran número de nodos sensores (o “motes”), los cuales son dispositivos de tamaño reducido que generalmente tienen un dispositivo inalámbrico de corto alcance, un pequeño procesador, y varios sensores incorporados. Son energizados por baterías y su función principal es recolectar datos de cierto fenómeno, colaborar con sus vecinos, y enviar sus observaciones (versión procesada de los datos recolectados y en algunos casos, decisiones tomadas) a un punto común cuando sea necesario. [4]

1.2.2 Elementos de una WSN

1.2.2.1 Nodos sensores

Como ya se ha mencionado anteriormente, estos contienen un “Mote” (dispositivo inalámbrico y procesador o controlador) y varios sensores. Estos nodos se intercomunican entre sí para transmitir la información y hacerla llegar al Gateway.

1.2.2.2 Puerta de enlace o Gateway

Este dispositivo se encarga de recopilar la información para re empaquetarla y enviarla hacia las estaciones base, una LAN, otras Gateway, o directamente a internet. También hace las funciones de coordinador y programador de los nodos sensores.

1.2.2.3 Estación base

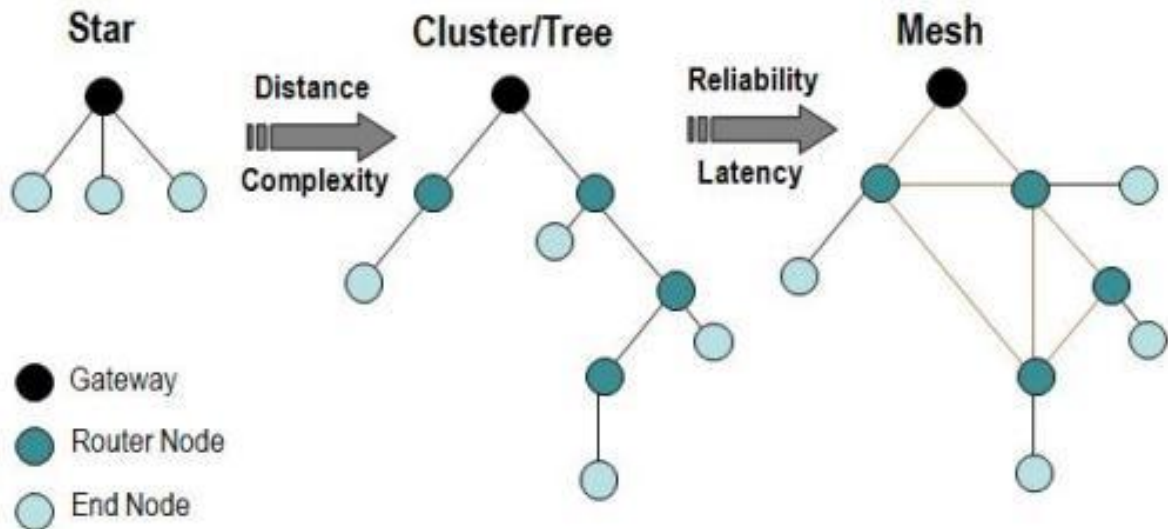
Es un dispositivo de mayor capacidad que se encarga del almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos recopilados por medio de los nodos. Estos dispositivos generalmente son computadores o máquinas de capacidad similar. [5]

1.2.3 Topologías comunes en WSN

Generalmente la topología de una WSN se ve dada por el objetivo de la misma, así como de su despliegue (el cual según [5], puede ser aleatorio, Regular o de Nodos sensores Móviles).

Pero se destacan tres tipos principales de topologías, que a su vez son similares a las topologías generales de red de datos conocidas, y estas son las tipo estrella, árbol, y malla (véase figura 9).

Figura 9. Topologías comunes en WSN



Fuente: National Instruments Website [6]

1.2.4 WSN aplicado en Smart Grid

Las Redes de Sensores inalámbricos al ser una herramienta de medida y más allá, una herramienta integral de control, pueden ser aplicadas en los diferentes dominios de la Smart Grid vistos en la primera sección de este capítulo.

Desde el punto de vista del sistema de potencia eléctrico, se pueden identificar tres subsistemas mayores, generación, entrega y utilización de la potencia eléctrica [4] y dentro de estos se pueden identificar dos grandes oportunidades para aplicar WSN en la Smart Grid:

- *WAMR (Wireless Automatic Meter Reading)*: con la tecnología WSN se puede aplicar esta “Lectura automática inalámbrica de medidores” y así, ofrecer ventajas tales como la medida y control en tiempo real del consumo y diversas variables de estado del sistema en general.
- *Monitorización y diagnóstico de fallas remoto*: esta aplicación es una de las más críticas pues de estas dependería la confiabilidad y estabilidad del sistema, y con esto la continuidad del suministro y todas las implicaciones económicas que tiene este. La aplicación de WSN en este campo puede proveer información completa de la condición de los componentes el sistema, y en caso de falla o contingencia, permitiría aislarla y así evitar el efecto cascada que podría causar un apagón. [7]

Actualmente como una respuesta a estas oportunidades aparece lo que se conoce como *AMI (Advanced Metering Infrastructure)* la cual provee monitoreo en tiempo real del uso de la potencia eléctrica. Estas “Advanced Metering Networks” son de variados diseños y pueden ser también utilizadas para implementar la respuesta de demanda residencial, incluyendo facturación dinámica. AMI se compone del hardware y software de comunicaciones, y los sistemas asociados y software de

administración de datos, que juntos crean una red de dos vías entre los medidores avanzados y los sistemas de negocios, habilitando la recolección y distribución de información hacia los clientes y otras partes interesadas. [3]

Otra respuesta que puede aparecer es lo que se conoce como “*Distribution automation (DA)*” usando las tecnologías Wireless. Al aplicar soluciones en este sector habilita el monitoreo en tiempo real de un amplio arreglo de tecnologías de automatización dispersas en donde la comunicación física sería costosa de implementar. Las redes inalámbricas se comunican con los activos de la distribución tales como reclosers, controladores de interruptores, reguladores de voltaje y otra infraestructura de monitoreo del sistema. [8]

1.2.5 Despliegue de una WSN en Smart Grid

Para efectos de este trabajo, se tendrá en cuenta un posible despliegue que tendría un sistema AMI interactuando con un sistema DA como herramienta de WSN en Smart Grid en los dominios del cliente y distribución vistos en la sección uno de este capítulo.

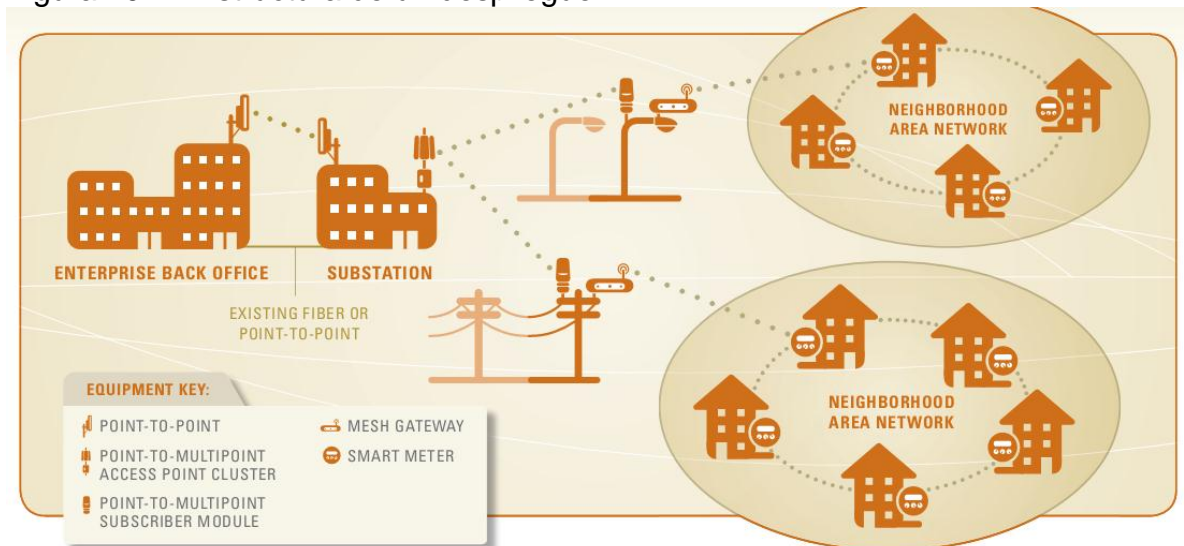
1.2.5.1 Despliegues en el dominio del cliente

Este despliegue de sensores inalámbrico se hace generalmente al interior de una edificación, ya sea un hogar, un centro comercial y hasta en el sector industrial en donde las distancias no son muy extensas. Generalmente se usa para medir variables del entorno tales como temperatura y luminosidad, y utilizar la información recolectada con fines de uso racional de energía y mejor experiencia de las personas que habitan estas edificaciones. Los sensores se dispersan a lo largo de toda la edificación en puntos definidos de acuerdo a la medida que se toma. En este tipo de despliegues generalmente se maneja conceptos de redes LAN, IAN, BAN y HAN.

1.2.5.2 Despliegues en los dominios de distribución

Los despliegues en este dominio estarán más sujetos a la disposición física de la red eléctrica en donde por una parte los dispositivos de la estructura AMI se despliegan desde la frontera comercial con el cliente (equipo de acometida y medición, véase figura 10) y por medio de infraestructura inalámbrica se comunican con la central comercial y por la otra parte se encuentran desplegados los dispositivos de medida y control del sistema DA. En este tipo de despliegues se manejan conceptos de redes MAN, WAN, FAN (Field Area Network) e IAN.

Figura 10. Estructura de un despliegue AMI



Fuente: Solution Brief, Motorola Inc [9]

1.2.6 Estructura de la red de comunicaciones de una WSN en una Smart Grid

En la figura 11 se muestra la estructura propuesta para la red de comunicaciones de una WSN en una Smart Grid, en la cual se identifican cinco zonas principales para la estructura principal, las cuales son Distribución primaria, distribución secundaria, Wireless WAN – MAN pública o privada (nube), frontera comercial y clientes.

En la *zona de clientes* es en donde se efectúa el consumo de la energía y esta contiene los clientes domésticos, comerciales e industriales, los cuales podrán

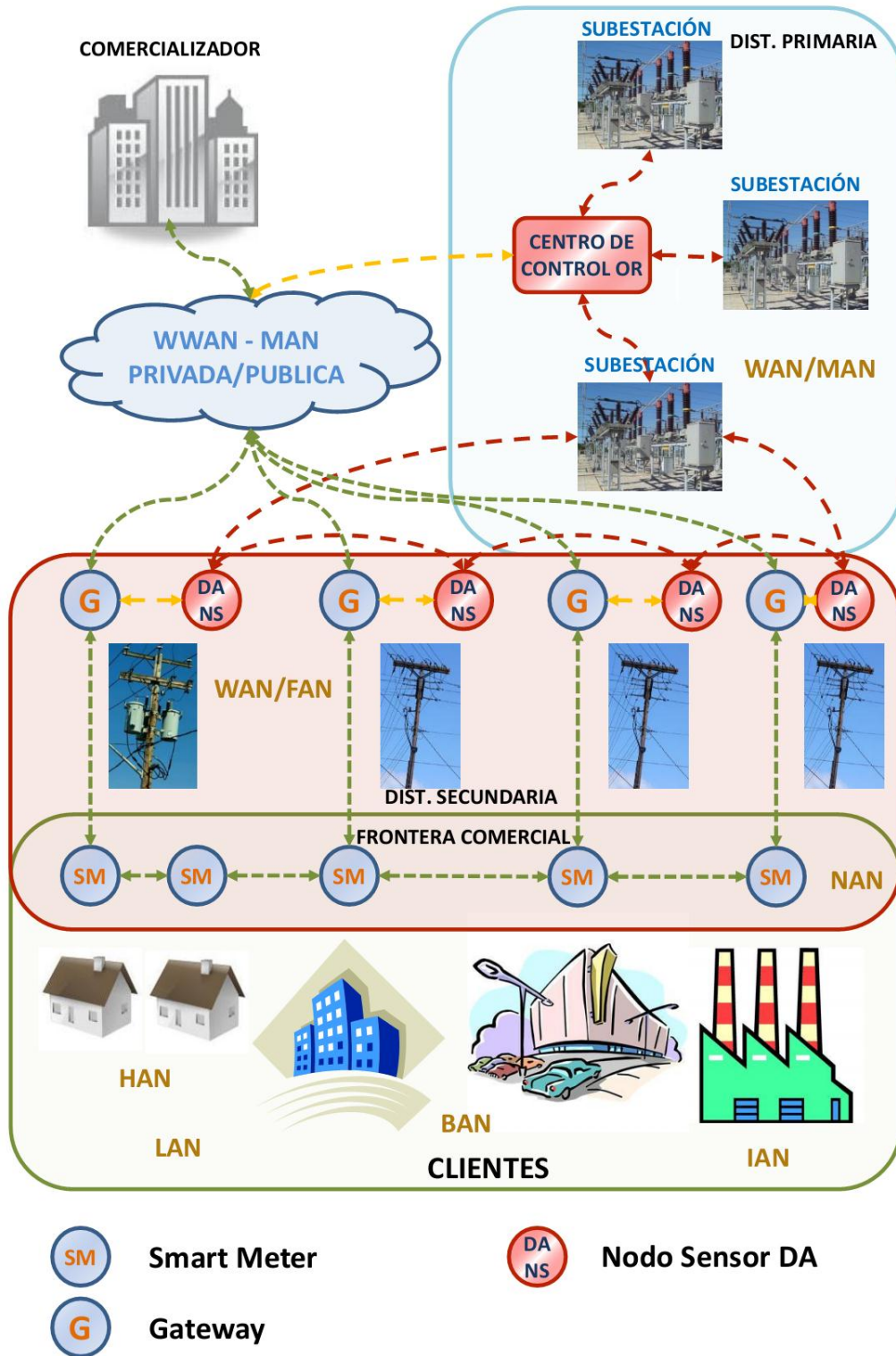
participar de forma interactiva con la Smart Grid cuando lo deseen comunicándose con el resto de la red por medio del respectivo Smart Meter ubicado en su *frontera comercial*. Al interior de las instalaciones de esta zona se pueden aplicar diversas tecnologías de gestión y uso racional de energía por medio de despliegues de WSN especializados para cada aplicación.

Las aplicaciones en la zona de clientes podrán tomar decisiones basándose en la información que le sea suministrada por la red, tales como precios dinámicos y posibles contingencias de la misma red, esto gracias a la comunicación de dos vías que ofrece el concepto de Smart Grid.

Por otra parte la *frontera comercial* contiene una red compuesta por Smart Meter dentro de una zona definida, ya sea un centro comercial, un edificio de oficinas, o un vecindario como tal; todo esto bajo el esquema de un despliegue WSN en el cual todos los Smart Meter se intercomunican entre sí, para llevar la información al dispositivo Gateway asignado, el cual estaría ubicado en la estructura de media tensión más cercana que alimente esta zona definida, y que se encontraría en la zona de *distribución secundaria*.

Se encontrarán en esta misma zona de distribución secundaria los nodos sensores del sistema DA, con los que se monitoriza y controla el mismo sistema de distribución secundario. Estos dispositivos del sistema DA formaran su propia WSN privada e independiente de la estructura AMI compuesta por los Smart Meter y Gateway, y por medio de esta WSN se establece la comunicación con la infraestructura de monitorización y control encontrada en la zona de *distribución primaria*. Esta infraestructura también contará con sus nodos Gateway que generalmente serán ubicados en las subestaciones de distribución y que se comunicaran con el centro de control principal del operador de red.

Figura 11. Estructura de red de comunicaciones de una WSN en Smart Grid



Fuente: Autores

Aunque se dijo que el sistema DA tendrá su propia red privada, no se descarta la posibilidad de usar la infraestructura del sistema AMI como sistema de comunicación de respaldo para transportar la información de las variables del sistema, por lo que los Gateway de la infraestructura AMI deberán estar en capacidad de transportar la información provenientes de los nodos DA cercanos y de la información recopilada por los Smart Meter referentes a la información comercial de la energía consumida.

Finalmente la información recolectada por los Gateway se enviara a la central del comercializador de energía y al centro de control (cuando sea necesario) por medio de una *nube*, que en nuestro caso estará compuesta de dispositivos inalámbricos, y para efectos de este trabajo se supondrá que se usa una infraestructura de nube compuesta por una red WWAN (Wireless Wide Area Network).

2. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS

2.1 WIFI

WiFi es una marca originalmente licenciada por la alianza WiFi para describir la tecnología subyacente de redes inalámbricas de área local (WLAN) basadas en las especificaciones IEEE 802.11. Fue desarrollada para ser utilizada en dispositivos portátiles como ordenadores portátiles y en redes de área local, pero ahora se utiliza cada vez en más servicios, incluyendo acceso a Internet y telefonía VOIP. La tecnología WiFi se encuentra más comúnmente en los ordenadores portátiles y dispositivos de acceso a Internet, tales como routers y módems de cable o DSL. La frecuencia cada vez mayor de WiFi ha ayudado a extender la tecnología más allá de la PC llegando a aplicaciones de electrónica de consumo, como la telefonía por Internet, juegos, e incluso la visualización de fotos y transmisión de vídeo en el hogar. [10]

Una LAN inalámbrica (WiFi) es un sistema de transmisión de datos diseñado para proporcionar el acceso a la red independientemente de la ubicación entre los dispositivos de computación, mediante el uso de ondas de radio en lugar de un medio guiado. Esta tecnología está pensada para ser utilizada en cualquier tipo de red 802.11, ya sea 802.11b, 802.11a, 802.11g, etc.

A continuación se indican las principales características de esta tecnología.

2.1.1 Características de WiFi

Basada en el estándar IEEE 802.11, WiFi ofrece una comunicación robusta y de alta velocidad ya sea punto-a-punto o punto a multipunto [11]. La tecnología de espectro ensanchado se adoptó en el estándar IEEE 802.11 ya que ha permitido que varios usuarios puedan ocupar la misma banda de frecuencia con una interferencia mínima entre sí [12].

El estándar IEEE 802.11 propone lineamientos para redes inalámbricas de área local (LANs) y se encuentra dividido en 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n las cuales se diferencian por sus velocidades de trabajo y frecuencias de operación, siendo 802.11n el de mayor velocidad llegando a 144Mbps, opera en las bandas de frecuencia 2.4 y 5GHz y usa modulación OFDM. [13]

Una persona con un dispositivo WiFi habilitado, como un ordenador, teléfono móvil o PDA puede conectarse a Internet cuando esté próximo a un punto de acceso. La región cubierta por uno o varios puntos de acceso se llama Hotspot. Los Hotspots pueden ir desde una habitación individual hasta muchos kilómetros cuadrados con Hotspots superpuestos. WiFi también puede utilizarse para crear una red de malla. Ambas arquitecturas se utilizan en las redes comunitarias. Esta tecnología también permite conectividad en el modo peer-to-peer lo que permite que los dispositivos se conecten directamente entre sí. [10]

En comparación con otras tecnologías de red de sensores inalámbricos, las redes WiFi tienen las siguientes ventajas importantes [14]:

- *Alto Ancho de Banda:* Con la tecnología WiFi, la más reciente 802.11n puede llegar a 300 Mbps de tasa de transferencia de datos y unos 100M a 150 Mbps de rendimiento. Así, la transmisión WiFi es más eficiente en comparación con otras tecnologías como ZigBee, tiene menos retardo, es mejor en tiempo real, y puede resolver el problema de la congestión sin un algoritmo de programación compleja.
- *Transmisión sin línea de vista (Non-line-of-sight Transmission):* WiFi tiene una cierta capacidad de transmisión sin línea de visión directa (NLOS). Se puede comunicar a través de un muro de carga.

- *Área de cobertura:* Las ondas de radio WiFi tienen una cobertura amplia. El rango de transmisión de WiFi puede llegar a 300m al aire libre y casi 100 metros en interiores con barreras. No sólo puede ser utilizado en el hogar, sino también en edificios de gran altura.

- *Costo-beneficio:* En la actualidad, la red WiFi se ha implementado en muchos edificios inteligentes en las ciudades grandes y medianas. Una cantidad significativa en el costo del hardware se puede ahorrar si la red de sensores inalámbricos se construye sobre la base de los recursos de la red WiFi existentes. Con la mejora continua de la tecnología SoC y una aplicación a gran escala, los nodos de sensor WiFi tendrán una mayor disminución en el precio.

- *Fácil expansión:* Cada nodo sensor WiFi (puede ser un medidor inteligente con capacidades WiFi) puede soportar alrededor de 100 conexiones inalámbricas. Desde la perspectiva del desarrollo de hogares digitales en el futuro, los nodos sensores WiFi, tales como contadores inteligentes (o terminal de lectura de contadores) pueden comunicarse con los aparatos del hogar sin modificar el cableado. Además de la lectura automática de medidores (Automatic Meter Reading), también se puede llevar a cabo televisión por IP, control de seguridad, telemedicina y dispositivos de información, lo que beneficiará el desarrollo de hogares digitales.

- *Robustez:* Dado que una red de sensores basada en WiFi usa topología de malla inalámbrica, por lo general hay más de una ruta disponible entre los nodos, lo que mejora significativamente la confiabilidad de la red. La tecnología WiFi también tiene la ventaja tanto de soporte de arquitectura como de instalación rápida.

2.1.2 WiFi para aplicaciones de Smart Grid

WiFi puede ser considerada para varias aplicaciones de redes inteligentes, como la automatización de la subestación de distribución y protección, y el monitoreo y control de los recursos de distribución de energía, especialmente para una subestación localizada a distancia, DERs, donde los requerimientos de velocidad de datos y las interferencias de radio son comparativamente menores. La tecnología WiFi también es conocida como Ethernet inalámbrico, y por lo tanto, puede ser considerado para estas aplicaciones.

2.1.3 Limitaciones de la tecnología WiFi

La fiabilidad y la disponibilidad de la señal inalámbrica son comparativamente menores. Cada punto de acceso WiFi tiene un alcance limitado dentro del cual se puede mantener una conexión inalámbrica entre el ordenador cliente y el punto de acceso. La distancia real varía dependiendo del medio, los fabricantes suelen indicar los rangos tanto en interiores como al aire libre para dar una indicación razonable de rendimiento confiable. Los rangos típicos en interiores son de 150-300 pies [10]. Pero puede ser menor si la construcción del edificio interfiere con las transmisiones de radio.

La interferencia electromagnética en un ambiente de alta tensión puede ralentizar la transmisión de datos. La interferencia de radio frecuencia del equipo de telefonía móvil puede afectar el funcionamiento de equipos.

2.2 TECNOLOGÍA CELULAR

Hoy en día, la tecnología celular es una de las más exitosas plataformas de comunicación que se han desarrollado. Esta tecnología tiene una aceptación muy alta con más de 5 mil millones de dispositivos en todo el mundo. A lo largo de la historia de la telefonía celular, esta ha tenido una constante evolución para lograr un progreso en el rendimiento y en la escalabilidad. A continuación se mencionan las diferentes generaciones de la red celular [15]:

- Primera Generación (1G) – Sistema celular analógico que soporta transferencias. Esta red analógica soportaba principalmente usuarios de voz.
- Segunda Generación (2G) - Introdujo las técnicas de modulación digital y vocoders para la compresión de datos de voz. La naturaleza digital de la tecnología 2G habilitó baja a mediana velocidad de datos para datos inalámbricos.
- Tercera Generación (3G) - Al igual que los sistemas 2G, los sistemas 3G también emplean técnicas digitales y vocoders y ofrecen mayores velocidades de datos y una mayor capacidad.
- Cuarta Generación (4G) - redes futuras con altos índices de datos, menor latencia (retardo), y una mejor movilidad.

En la siguiente sección se indican las características de la tecnología celular.

2.2.1 Características de la tecnología celular

La tecnología celular 3G (tercera generación) / 4G (cuarta generación) opera en el rango de espectro de 824-894MHz/1900MHz [14]. Estas son bandas de frecuencia con licencia. La tasa de transmisión de datos de esta tecnología es de 60 - 240 kbps, y la distancia de cobertura dependerá de la disponibilidad del servicio celular [16].

Esta topología de red celular se compone de celdas, que están formadas por muchos transmisores inalámbricos de baja potencia. Con el movimiento de los dispositivos móviles con módem celular, la transmisión de datos también es intercambiada entre una celda y otra, lo que facilita el flujo no interrumpido de datos. De esta manera se forma una arquitectura punto a punto [17]. También puede recibir datos desde una interfaz serial o Ethernet y transmitir datos a una segunda interfaz en la red celular, lo que permiten a los componentes que normalmente están cableados convertirse en inalámbricos.

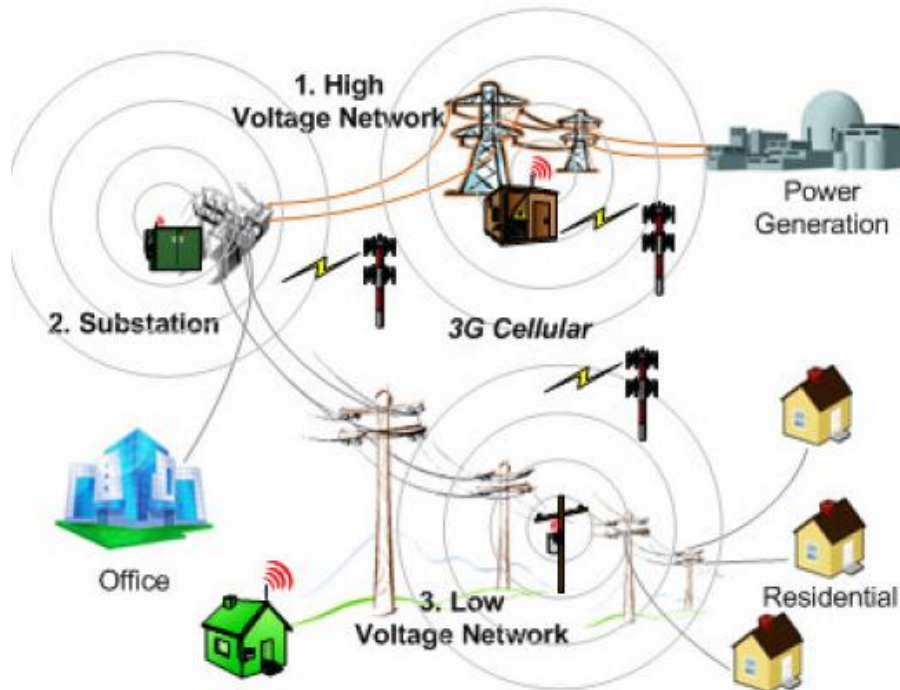
Esta tecnología ofrece una amplia cobertura de los datos y los costos de mantenimiento y de red son totalmente cubiertos por la compañía celular [18].

En la Figura 12, se muestra una solución para el seguimiento y control distribuido para redes de alta, media y baja tensión. Los dispositivos de detección remotos están conectados a diversos puntos de control dentro de la red eléctrica, incluyendo transformadores de subestaciones de vivienda, postes, interruptores y circuitos eléctricos de alimentación. Los dispositivos de detección controlan la tensión, fase, intensidad y potencia. Estos datos se recogen y transmiten a través de redes inalámbricas 3G y redes fijas a varios sistemas de TI responsables de almacenar, analizar e informar sobre los datos. Es vital para estas operaciones la elevación de las alarmas y eventos de la red.

Algunas características que justifican el uso de tecnología celular para Smart Grid son las siguientes [15]:

- *Alto rendimiento*: la tecnología móvil está en constante evolución. Hoy en día, una velocidad de datos que excede los 2 Mbps y una latencia en milisegundos están normalmente disponibles.

Figura 12. Monitoreo remoto vía red celular



Fuente: Clark, A.; Pavlovski, C. J., IMECS 2010 [19]

- *Alta fiabilidad:* Los operadores han desplegado transporte de datos y componentes de red redundantes, baterías de respaldo y generadores de energía para asegurar un funcionamiento ininterrumpido. La disponibilidad de las redes celulares se calcula en 99%.
- *Seguridad:* Las redes celulares tienen características incorporadas de seguridad, incluyendo encriptación y autenticación. Adicionalmente se pueden utilizar mecanismos de seguridad de la capa para satisfacer las necesidades particulares de casos de uso.
- *Alta escalabilidad:* La red celular puede soportar millones de dispositivos. Se ha demostrado que puede escalar para soportar dispositivo el rápido crecimiento de tráfico y dispositivos.

- *Basado en estándares:* las tecnologías celulares están respaldados por normas mundiales. La interoperabilidad sin fisuras entre los dispositivos y las redes están garantizadas.

2.2.2 La tecnología móvil para aplicaciones de Smart Grid

La ventaja con la tecnología celular es que la infraestructura existente puede ser utilizada en cierta medida. Además, con el crecimiento de la tecnología móvil 3G / 4G, la velocidad de datos y calidad de servicio (QoS) han mejorado muy rápido. A continuación se señalan algunas aplicaciones de esta tecnología para Smart Grids.

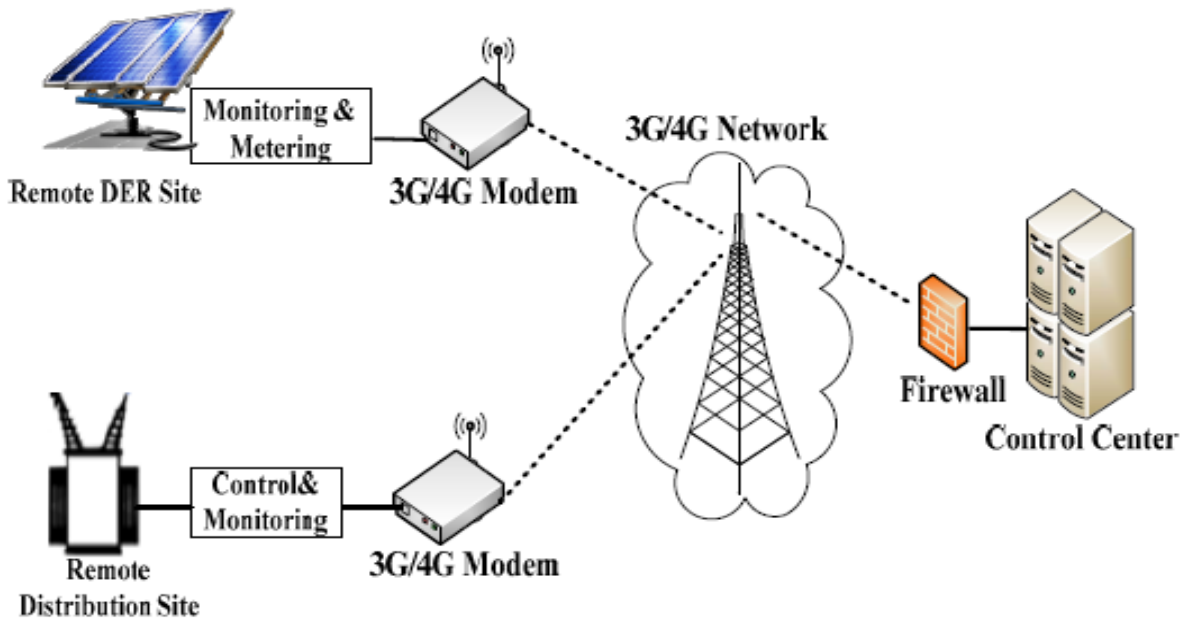
2.2.2.1 Interfaz SCADA para la subestación de distribución a distancia

Gracias a los usuarios de teléfonos móviles, la cobertura de telefonía móvil está disponible incluso en lugares muy remotos. Zhang [20] ha demostrado el uso de la tecnología Code Division Multiple Access (CDMA) para el Control de Supervisión y Adquisición de Datos (Supervisory Control And Data Acquisition SCADA), al ofrecer una comunicación celular entre la subestación Unidad Terminal Remota (RTU) y el servidor SCADA. La Figura 13 muestra la aplicación de tecnología celular para interfaz SCADA de una subestación de distribución remota [17].

2.2.2.2 Seguimiento y medición de DERs remotos

Como se muestra en la figura 13, la tecnología celular se puede utilizar para el seguimiento y medición de DERs instalados remotamente. El intercambio de información no crítica puede llevarse a cabo en forma de SMS, que es una solución que puede ser económica. La aplicación de monitoreo de subestaciones remotas usando el Servicio General de Paquetes vía Radio (General Packet Radio Service GPRS) se explica en las referencias [18], [21].

Figura 13. Tecnología celular para SCADA y monitoreo de la red de energía



Fuente: Parikh, P.P.; Kanabar, M.G.; Sidhu, T.S.; 2010 IEEE [17]

2.2.3 Limitaciones de la tecnología celular

Aunque la elección de una red móvil 3G se justifica si se piensa en la necesidad de implementación inicial de cobertura urbana y la disponibilidad oportuna del servicio, también se presentan varios problemas en el uso de la red 3G comercial. La red 3G ha sido diseñada para datos de banda ancha y usuarios de voz y no para la aplicación o la necesidad de apoyar a varios miles de dispositivos que se comunican.

La cuestión de la disponibilidad es un reto. Es evidente que las redes celulares se han diseñado teniendo en cuenta al usuario humano, con el apoyo de varias decenas o cientos de canales por celda. El despliegue necesario para la Smart Grid dicta que se requieren varios miles de dispositivos, en el orden de 10.000 canales por celda, dependiendo del tamaño de la celda y área geográfica. Para la mayor parte de estos dispositivos se pueden compartir los canales disponibles. Sin embargo, en escenarios de interrupción o cortes, se requiere un alto nivel de conectividad simultánea. Como tal, la disponibilidad de canal necesita algún tipo

de garantía del proveedor de servicios. También es necesario un tráfico asimétrico que atienda a un mayor tráfico de enlace, lo que es tal vez un requisito contradictorio para los patrones de tráfico de descarga de banda ancha existentes experimentados por los operadores [19].

El tema de la seguridad también es fundamental para evitar que ataques cibernéticos, por ejemplo, la inyección de falsos mensajes de control en el flujo de comunicaciones que alteran la red y causan apagones o cortes. Aunque la tecnología celular cuenta con medidas de seguridad probablemente no son suficientes para atender a la necesidad de una total seguridad de los mensajes de control dentro de una Smart Grid.

Por otra parte, el establecimiento de una llamada toma un tiempo de retardo indefinido, además la caída de la llamada puede afectar el intercambio de datos grandes. Debido a las altas tarifas mensuales para la conexión individual y los elevados costes de llamadas, la tecnología celular puede no ser rentable para un grupo mayor que los sitios remotos o la transferencia de datos normal [16].

2.3 WIMAX

Otra tecnología de red inalámbrica es la Worldwide inter-operability for Microwave Access (WiMAX) que hace parte del estándar 802.16 para redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN). El objetivo principal de esta tecnología es lograr la interoperabilidad mundial para acceso por microondas. En 2001, cuando el primer borrador del estándar IEEE 802.16 fue lanzado, se definió el amplio rango de operación de 10-66GHz para la infraestructura de comunicación [17]. La IEEE aprobó el estándar 802.16 en junio de 2004. WiMAX puede ser utilizada para redes inalámbricas al igual que la popular WiFi. Sin embargo WiMAX permite mayores velocidades de datos en distancias más largas, uso eficiente del ancho de banda y evita la interferencia casi al mínimo. A continuación se señalan las características principales de la tecnología WiMAX.

2.3.1 Características de la tecnología WiMAX

Las especificaciones 802.16 se aplican a través de un amplio rango del espectro de radiofrecuencia. WiMAX Forum ha publicado un subconjunto del rango para la interoperabilidad. Para la comunicación fija han sido dedicadas las bandas de 3.5 y 5.8GHz, mientras que para las comunicaciones móviles han sido asignadas las bandas de frecuencia de 2.3, 2.5 y 3.5 GHz. Los espectros de 2.3, 2.5 y 3.5 GHz tienen licencia, mientras que el espectro de 5,8 GHz es un espectro sin licencia [17].

Esta tecnología soporta velocidades de hasta 70Mbps y un rango de hasta 48 km, además ofrece conectividad entre los extremos de la red sin necesidad de línea de visión directa en circunstancias favorables. Sin embargo, la distancia y velocidad de la red son inversamente proporcionales entre sí. Los espectros con licencia permiten una mayor potencia y mayor distancia de transmisión, lo que es más adecuado para la comunicación de larga distancia. El ancho de banda y el rango

de WiMAX ofrecen la alternativa de cable, DSL y el canal T1 de comunicación para acceso de última milla.

El ancho de banda y alcance de WiMAX la hacen adecuada para las siguientes aplicaciones [10]:

- Conexión de hotspots WiFi entre sí y con otras partes de la Internet.
- Proporcionar una alternativa inalámbrica para cable y DSL para el acceso de banda ancha de última milla (último kilómetro).
- Proporcionar servicios de alta velocidad para datos y telecomunicaciones móviles.
- Proporcionar una fuente diversa de la conectividad a Internet como parte de un plan de continuidad de negocio.

Aunque la relación costo-beneficio de la tecnología WiMAX en una aplicación de control remoto será mayor, esta no se limita a tales aplicaciones y puede ser una respuesta a la reducción del costo de TI. Dada la limitada infraestructura cableada en algunos países en desarrollo, los costos de instalación de una estación de WiMAX en conjunto con una torre de celular existente o incluso con un hub solitario, tienden a ser pequeños en comparación con el desarrollo de una solución cableada. Las áreas de baja densidad de población y terreno plano son particularmente aptas para esta tecnología y su área de distribución. Para los países que han saltado la infraestructura de cableado como resultado de los costos prohibitivos y una geografía complicada, WiMAX puede mejorar la infraestructura inalámbrica en un modo de bajo costo, descentralizado, de despliegue fácil y eficaz.

En la tabla 2 se muestran las principales características de los estándares que rigen esta tecnología.

Tabla 2. Características de estándares para WiMAX

	802.16	802.16a	802.16b
Frecuencias de operación	10-66GHz	Menor a 11 GHz	Menor a 6 GHz
Funcionamiento	Solo con línea de vista	Sin línea de vista	Sin línea de vista
Velocidades de transferencia	32-134Mbps con canales de 28MHZ	Hasta 75Mbps con canales de 20MHz	Hasta 15 Mbps con canales de 5MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM y 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM y 64QAM
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Ancho de banda	20, 25 y 28MHz	Entre 1.25 y 20MHz	Entre 1.25 y 20MHz
Radio típico de celda	2 a 5 Km aproximadamente	5 a 10 Km, máximo 50Km	2 a 5 Km aproximadamente

Fuente: Velazco Capacho, Daniel, UIS 2010 [13]

2.3.2 WiMAX para aplicaciones de Smart Grids

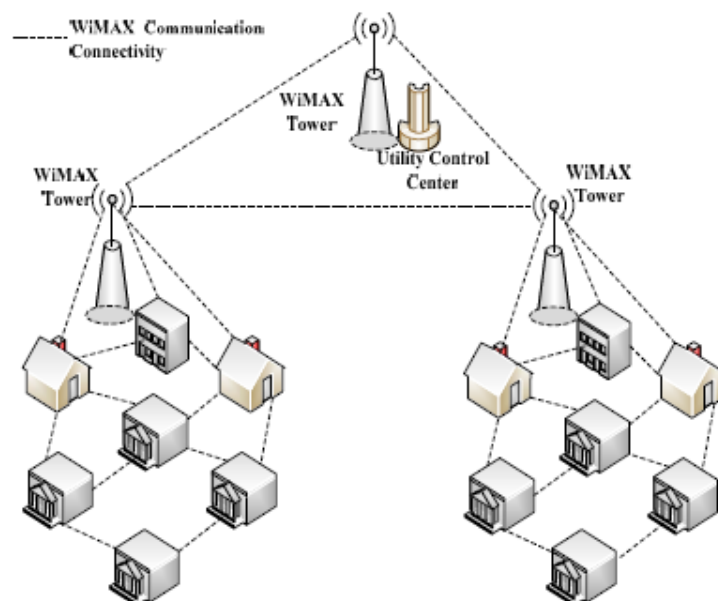
2.3.2.1 Wireless Automatic Meter Reading (WMAR)

Una cobertura de gran distancia y velocidad de datos suficientemente alta hacen que la tecnología WiMAX sea adecuado para la lectura inalámbrica automática de medidores (WAMR) como parte de la utilidad de infraestructura de medición automática (AMI). La figura 6 muestra el sistema WAMR basado en WiMAX. La aplicación de WAMR para la medición de ingresos ofrece varias ventajas a las empresas eléctricas y / o proveedor de servicios en el entorno de red inteligente (Smart Grid) mediante la reducción de la necesidad de lectores de medidores humanos [17].

2.3.2.2 Precios en tiempo real

La Red WiMAX para AMI se puede utilizar para proporcionar modelos de precios en tiempo real basados en el consumo de energía en tiempo real de los clientes. La capacidad de fijación de precios en tiempo real de los sistemas de WAMR también puede ser beneficiosa para los clientes cambiando sus cargas durante las horas pico [22].

Figura 14. Comunicación WiMAX para WARM.



Fuente: Parikh, P.P.; Kanabar, M.G.; Sidhu, T.S.; 2010 IEEE [17]

2.3.2.3 Detección de corte y Restauración

En la actualidad, la red de distribución tiene un mecanismo de detección de corte casi insignificante, especialmente para los clientes residenciales, resultando en la baja confiabilidad de la fuente de alimentación. Con la ayuda de la comunicación de dos vías usando WiMAX, una detección rápida de corte y su restauración pueden ser implementadas.

2.3.3 Limitaciones de la tecnología WiMAX

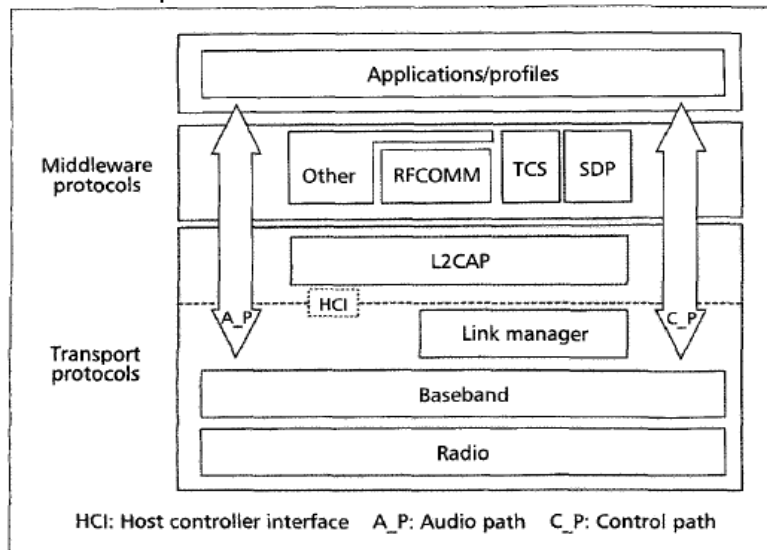
El hardware de radiofrecuencia para una torre WiMAX es relativamente caro, y por lo tanto, la colocación de la torre WiMAX debe hacerse de forma óptima para reducir los costos de infraestructura y cumplir con los requisitos de calidad de servicio (QoS).

Por otra parte, la frecuencia por encima de 10 GHz en WiMAX no puede penetrar a través de obstáculos, por lo tanto, las frecuencias más bajas son las más prácticas para las aplicaciones de AMI, especialmente en el área urbana. Sin embargo, las bandas de frecuencias más bajas ya disponen de licencia, y por lo tanto, la forma más probable de utilización de WiMAX es mediante el arrendamiento de esta a una tercera parte.

2.4 BLUETOOTH

La tecnología Bluetooth es esencialmente un protocolo para la conectividad inalámbrica de un conjunto diverso de dispositivos que van desde PDAs, teléfonos móviles, ordenadores portátiles, a los hornos de cocina, refrigeradores, termostatos, etc, en el hogar, empresa, móvil y otros ambientes. La especificación Bluetooth fue desarrollada por el Bluetooth Special Interest Group (SIG), un consorcio de la industria fundada por Ericsson, IBM, Intel, Nokia y Toshiba. El SIG tiene ahora más de 1.800 empresas miembros [23]. La Figura 15 muestra la pila del protocolo Bluetooth

Figura 15. Modelo del protocolo Bluetooth



Fuente: Bisdikian, C, Communications Magazine, IEEE 2001 [24]

Los protocolos de la pila se han agrupado en dos categorías: los protocolos de transporte y de middleware. Los protocolos de transporte incluyen los protocolos desarrollados en exclusiva para la tecnología inalámbrica Bluetooth. Estos protocolos están involucrados en todas las comunicaciones de datos entre dos dispositivos Bluetooth. Los protocolos de middleware comprenden tanto los protocolos específicos de Bluetooth y otros protocolos adoptados.

Estos dispositivos se clasifican como "Clase 1", "Clase 2" o "Clase 3" en referencia a su potencia de transmisión, siendo totalmente compatibles los dispositivos de una clase con los de las otras [13].

Clase 1 Potencia máxima permitida 100mW	–	Rango Máximo 100 metros
Clase 2 Potencia máxima permitida 2.5mW	–	Rango Máximo 10 metros
Clase 3 Potencia máxima permitida 1mW	–	Rango Máximo 1 metros

Los dispositivos con Bluetooth también pueden clasificarse según su ancho de banda

Versión 1.2	Ancho de Banda	1Mbps
Versión 2.0 + EDR	Ancho de Banda	3Mbps
Versión 3.0 + HS	Ancho de Banda	24Mbps
Versión 4.0	Ancho de Banda	24Mbps

2.4.1 Características de la tecnología Bluetooth

El área de cobertura de Bluetooth es de 1 m a 100 metros. La distancia real varía dependiendo del medio ambiente, los fabricantes suelen indicar los rangos tanto en interiores como al aire libre para dar una indicación razonable de rendimiento confiable. Las conexiones Bluetooth son automáticas y casi instantáneas. A diferencia de WiFi, Bluetooth incluye la detección de servicios y perfiles de usuario. [25]

Bluetooth opera a niveles de potencia menores que el estándar 802.11, con muchos dispositivos transmitiendo a tan sólo 1 o 10 milisegundos Watts, y está dirigido a la conectividad ad-hoc. La especificación Bluetooth está controlada por el Bluetooth Special Interest Group y es un estándar, IEEE 802.15.1.

La tecnología Bluetooth no requiere de ningún hub o un switch para la comunicación. Aquí, cada nodo tiene un área finita, entonces el otro nodo puede funcionar como router / gateway propio [25].

La tecnología Bluetooth incluye varias características de conservación de energía (sniff, hold and park) y potencia de transmisión adaptable. La potencia de transmisión adaptable permite una transmisión por radio para disminuir su potencia de transmisión cuando el indicador de intensidad de la señal recibida en el dispositivo receptor indica que un nivel de potencia más baja es suficiente para este enlace de comunicación [23].

2.4.2 Limitaciones de la tecnología Bluetooth

En los entornos de Bluetooth, antes de que una conexión se pueda establecer, un procedimiento algo complicado de detección de dispositivos debe realizarse antes de que los paquetes comiencen a fluir en los enlaces inalámbricos entre el maestro y los esclavos y viceversa. La detección del dispositivo incluye procedimientos de *inquiry* y *paging*. El procedimiento de *inquiry* se utiliza en aplicaciones donde la dirección del dispositivo de destino es desconocida para la fuente. El procedimiento de investigación también se puede utilizar para descubrir qué otros dispositivos Bluetooth están dentro del alcance. Un problema con la detección de dispositivos Bluetooth es que, debido a los plazos involucrados para la investigación y la paginación (*inquiry* y *paging*), se puede tomar un tiempo antes de que los dispositivos se descubran y se inicie la transmisión de datos. La comunidad de Bluetooth es consciente del enorme retraso en la detección de dispositivos. En el peor de los casos, una investigación puede durar más de 10 segundos. [26].

La tecnología Bluetooth se puede utilizar para las aplicaciones locales de supervisión en línea como parte de los sistemas de automatización de

subestaciones [27]. Estos dispositivos son altamente influenciados por los enlaces de comunicación en los alrededores y puede interferir con las la redes LAN inalámbricas basadas en los estándares IEEE 802.11. El Bluetooth ofrece una seguridad débil en comparación con otras normas.

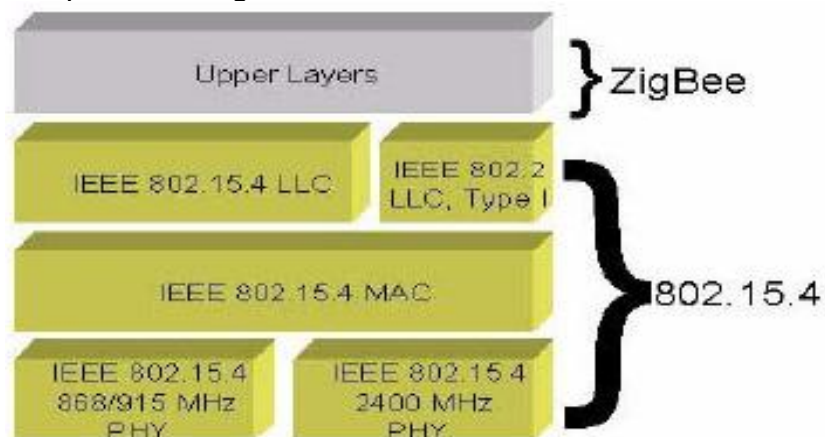
La comunicación inalámbrica Bluetooth es un sistema de salto de frecuencia con una tasa nominal de salto de 1600 saltos por segundo. Cada slot TDD es de 625 psec de duración. Bluetooth opera en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2,4 GHz de licencia libre. Dado que 2,4 GHz es la frecuencia de absorción de la molécula de agua, los hornos de microondas también operan en esta banda. Por lo tanto, una limitación de Bluetooth es que los hornos microondas son una fuente de interferencia importante. Además, esto también implica que las ondas de radio en las comunicaciones Bluetooth no pueden penetrar el agua. [23]

2.5 ZIGBEE

ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo, baja tasa, y corto alcance basada en el estándar IEEE 802.15.4 que puede ser ampliamente utilizada en control industrial, automatización del hogar, cuidado de la salud, automatización de edificios, electrónica de consumo, control remoto y otros campos. En el área de automatización de energía eléctrica se ha utilizado para la lectura inalámbrica del medidor, monitoreo del sistema de potencia, la medición parámetros eléctricos y otros. Todas estas aplicaciones han alcanzado un control eficaz sobre las operaciones del sistema de energía eléctrica y han mejorado la fiabilidad y la eficiencia del sistema.

Como se ve la Figura 16, las capas física y de enlace de datos para ZigBee están definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Dos de los principales objetivos de 802.15.4 son bajo costo y baja potencia, lo que conduce a baja complejidad y simplicidad. La negociación para tasas de datos aumenta la complejidad de un protocolo, por lo que 802.15.4 utiliza sólo dos tipos diferentes de tasa de datos: 250 Kbps para alta velocidad y 20 Kbps para baja velocidad, aplicaciones de muy baja potencia. [28]

Figura 16. Arquitectura ZigBee



Fuente: Kollam, M.; ICoAC, 2011 [28]

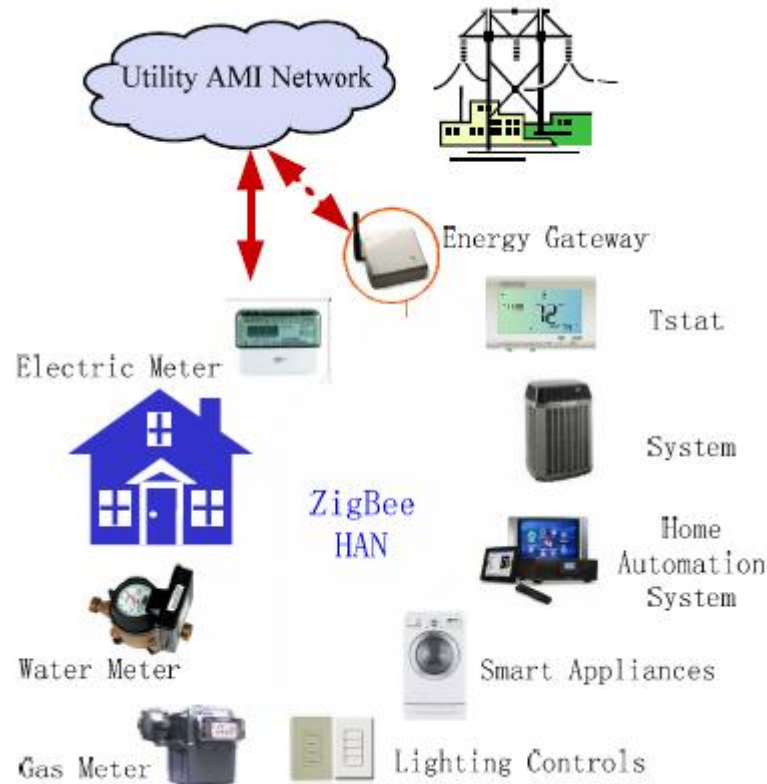
2.5.1 Tecnología ZigBee en Smart Grid HAN

La Smart Grid permite una configuración totalmente automatizada y la gestión de la generación, transmisión, distribución, almacenamiento y consumo de energía, y convierte la red eléctrica en una de alta velocidad, bidireccional, en tiempo real y dinámica red de información interactiva con una combinación de red de energía. La generación de energía, transmisión, distribución y consumo no solamente están vinculados por las interfaces eléctricas, también están vinculados con las interfaces de comunicación seguras, además, los mercados, operaciones y proveedores de servicios están estrechamente vinculados entre sí y con las cuatro secciones anteriores para formar una red de comunicaciones de energía interactiva. En consideración a la generación de energía distribuida en la Smart Grid, cada una de estas interfaces eléctricas y de comunicación pueden ser bidireccionales. La tecnología ZigBee puede ser integrada en los sectores de generación, transmisión, distribución y consumo, para proporcionar datos de monitoreo precisos y fiables para una operación confiable de la Smart Grid.

Home Area Network (HAN) es uno de los componentes de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) en Smart Grid. AMI es un sistema de red completa para medir, recopilar, almacenar, analizar y procesar información sobre el consumo de energía de los usuarios, compuesto principalmente de contadores inteligentes instalados al usuario final, Home Area Network, el sistema de gestión de datos ubicado en la compañía de energía eléctrica y el sistema de comunicaciones que los conecta [29]. AMI conecta a los usuarios con la compañía de energía eléctrica de cerca y es considerado como el primer paso para convertir en realidad La Smart Grid [30]. La red de comunicación entre puerta de enlace del HAN y centros de datos pueden ser apoyadas por Power Line Carrier (PLC), comunicación digital microondas, fibra óptica SDH, redes ASON, GPRS / CDMA, comunicaciones por satélite u otros medios de comunicación, mientras que en la "última milla" de la smart Grid, la tecnología de comunicación inalámbrica ZigBee se puede adoptar

para construir un sistema completo de AMI. La Figura 17 muestra un HAN basado en la tecnología ZigBee. [31]

Figura 17. HAN basado en la tecnología ZigBee



Fuente: Qiang Zhang; Yugeng Sun; Zhenhui Cui; ICCIA 2010 [31]

A través de la red ZigBee, los contadores inteligentes, puerta de entrada de energía y otros equipos de uso doméstico están estrechamente conectados y se construye un sistema de gestión de energía dentro de la familia. Las siguientes características y beneficios son necesarios para un HAN basado en ZigBee en Smart Grid AMI:

- Proporciona la capacidad de respuesta a la demanda y control de carga.
- Proporciona una conexión de mensajería confiable entre los propietarios de viviendas y empresas de servicios públicos.
- Proporciona información en tiempo real.

- Permite la comunicación metro a metro para sub medición.
- Proporciona monitoreo remoto y control de las condiciones para toda la casa.

A continuación se mencionan las principales características de la tecnología ZigBee para su uso en Smart Grids.

2.5.1.1 Características de ZigBee para Smart Grid

- *Baja potencia:* En el modo de en espera en bajo consumo, dos pilas AA se pueden utilizar durante 6 meses a 2 años. Esto es una ventaja sobresaliente de la tecnología ZigBee. [31]
- *Baja tasa:* ZigBee trabaja en una velocidad de 20-250kbps, provee 250kbps (2.4GHz), 40 kbps (915MHz) y 20kbps (868MHz) de la transmisión de datos original para satisfacer la demanda de baja velocidad de transmisión de bits de la aplicación de datos.
- *Corto retardo:* ZigBee tiene una respuesta más rápida. Sólo se tarda 15 ms para despertar del modo dormir y 30 ms para acceder a la red.
- *Auto Organización:* ZigBee utiliza método de auto-organización para formar una red con topología flexible. Usa Protocolo de enrutamiento dinámico para asegurar la transmisión de datos fiable.
- *Gran escala:* En una red ZigBee, se pueden soportar como mucho 65.000 nodos. Esto es adaptable a la compleja estructura de red inteligente (Smart Grid).

- *Alta seguridad:* ZigBee ofrece una seguridad de tres niveles, incluida la no configuración de seguridad, utilizando la lista de control de acceso (ACL) o Advanced Encryption Standard (AES-128) para garantizar una seguridad de alto nivel [32].
- *Distancia de comunicación:* Cerca de 1mW (0 dBm) de radio de potencia de salida está disponible a partir de un amplificador integrado en chips RF comerciales IEEE 802.15.4, lo cual cubre cerca de 30m en interiores y cerca de 100m en exteriores.[33]

2.5.2 Limitaciones de la tecnología ZigBee

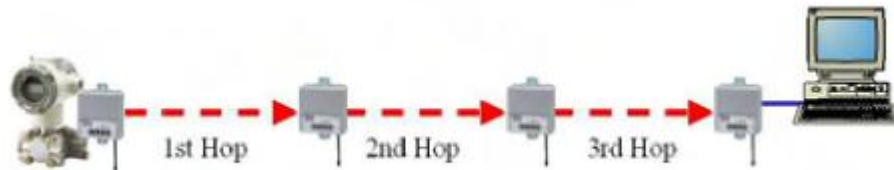
ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica típica de baja potencia, baja velocidad y corta distancia que trabaja en la tasa más baja de 20-250kbps. Para soportar una aplicación que requiera una gran escala, sensibilidad a los retardos y menor cantidad de datos hay ventajas obvias para elegir la tecnología ZigBee, pero para las aplicaciones con intensas y grandes cantidades de datos en tiempo real, esta tecnología no alcanzará los requisitos fácilmente [34].

Por ejemplo, ZigBee no es adecuado para la transmisión de alta frecuencia porque utiliza un mecanismo de retransmisión múltiple que fácilmente puede producir tormenta de transmisión y congestión de la red. Además, la longitud de una sola trama es limitada, como la trama MAC no proporciona más de 127B, cortando el costo de cada capa, la longitud real de los datos que una trama puede enviar es generalmente no más de 80B.

La distancia de comunicación (30m – 100m) no es suficiente para automatización industrial. Con frecuencia se requiere una distancia de comunicación más larga en fábricas donde hay sitios muy grandes. Si se usa tecnología multi-salto, la distancia de comunicación se puede ampliar, sin aumentar la potencia máxima de

salida (Fig. 18). Teniendo en cuenta los recursos microcomputadora, la latencia, confiabilidad, etc. El multi-hop de comunicación máximo disponible es de alrededor de 5 saltos. [33]

Figura 18. Comunicación inalámbrica multi-salto



Fuente: ZigBeeAlliance [33]

3. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS PARA UNA WSN EN UNA SMART GRID

3.1 METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Para realizar la comparación de esta tecnología se ha escogido el método de Utilidad Multiatributo, el cual considera que para cada atributo se determina una función de utilidad parcial y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa [13].

Dado que se tienen varios entornos de aplicación de las tecnologías en nuestro caso, y el objetivo de la comparación será mostrar cuales tecnologías se acomodan mejor a cada entorno, primero serán definidas las funciones de utilidad para cada parámetro de comparación seleccionado, posteriormente se definirán las características particulares de cada entorno para finalmente basándose en estas dar una ponderación a los resultados de las funciones de utilidad definidas para formar la función multiatributo compuesta.

3.2 DEFINICIÓN DE FUNCIONES DE UTILIDAD

A continuación se formularan las funciones de utilidad y criterios de medición para los parámetros topología, escalabilidad, requerimientos de hardware, conectividad y seguridad.

3.2.1 Topología

Al momento de hablar de topología como una característica, se tendrá en cuenta las topologías de red que cada tecnología pueda soportar. Para medir este parámetro se le darán puntos por topologías de conexión soportada de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 3. Tabla de puntajes de la función de utilidad para topología

Topología de conexión	Soporta	No soporta
Punto a Punto	0,25	0
Punto Multipunto	0,25	0
Broadcast	0,25	0
Malla	0,25	0

Fuente: Autores

3.2.2 Escalabilidad

La escalabilidad como propiedad deseable en el sistema para hacerse más grande, o abarcar más servicios sin requerir mayores cambios esenciales en su estructura, y sin perder calidad en el servicio prestado, esta mayormente relacionada con las soluciones propuestas por los implementadores de sistemas. Sin embargo, hay características de las tecnologías inalámbricas, que afectan o pueden llegar a afectar la escalabilidad de una solución, siendo estas la coexistencia de tecnologías y la identificación única de dispositivos.

Coexistencia intra-tecnológica: Algunas tecnologías de radio proveen mecanismos para evitar o detectar interferencia causada por otras fuentes del mismo tipo dentro del rango de recepción [35].

Coexistencia inter-tecnológica: Algunas tecnologías de radio proveen mecanismos para evitar o detectar interferencia causada por otras fuentes de otro tipo que están operando en el mismo espectro y se encuentran dentro del rango de recepción [35].

Identificación única de dispositivo: La identificación de cada nodo de radio es deseada para mantener la unicidad del dispositivo y así evitar direccionamientos erróneos por caso de confusión de dispositivos.

Cantidad de dispositivos soportada: da la idea de cuantos dispositivos pueden llegar a ser instalados en una solución con esta tecnología.

Los valores de la función de utilidad estarán dados de acuerdo a tabla 4.

3.2.3 Requerimientos de hardware

Para evaluar los requerimientos de hardware de una tecnología inalámbrica se debe tener en cuenta la implementación de la misma, consultando acerca de la existencia de un proveedor de servicios para esta tecnología, que tan ahorradora de energía puede llegar a ser cuando esté en funcionamiento (Véase escalafón en tabla 5), y por ultimo su facilidad de instalación. Se considerarán fáciles de instalar, aquellas tecnologías para las cuales no se requiera de un gran trabajo en instalación de infraestructura complementaria (soportes, suministro de energía) para su puesta en marcha.

Los valores de la función de utilidad estarán dados en la tabla 6

Tabla 4. Tabla de puntajes de la función de utilidad para escalabilidad

Escalabilidad	Presenta una solución definida / buen desempeño	Presenta posibilidad de control / un aceptable desempeño	No soporta / mal desempeño
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	0,1	0,08	0
Interferencia de canal adyacente	0,1	0,08	0
Interferencia de canal alternado	0,1	0,08	0
Evasión de colisiones	0,1	0,08	0
Coexistencia inter-tecnológica	0,1	0,08	0
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	0,1	0,08	0
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	0,1	0,08	0
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	0,1	0,08	0
Identificación única de dispositivo	0,1	0,08	0

Fuente: Autores

Tabla 5. Escalafón de ahorro de energía de tecnologías inalámbricas

Escalafon de ahorro y consumo de energía en tecnologías Wireless		
Puesto	Tecnología	Observaciones
1	ZigBee	De acuerdo con Echeverría[39], ZigBee puede durar años con la misma batería, mientras que Bluetooth días y finalmente WiFi con algunas horas.
2	Bluetooth	
3	WiFi	
4	T. Celular y WiMAX	Estas tecnologías necesitan de la instalación de torres o puntos de acceso que tienen alimentación continua, por lo que se dejan en ultimo lugar.

Fuente: Autores

Tabla 6. Tabla de puntajes de la función de utilidad para requerimientos de hardware

Requerimientos de Hardware	Presenta	No Presenta
Existe proveedor de servicio	0,5	0
Ahorro energía	"=1/posición en escalafon"	
Facilidad de instalación	0.5(fácil instalación)	0 (Inf. compleja)

Fuente: Autores

3.2.4 Conectividad

Dentro de la conectividad se tendrán en cuenta las características de disponibilidad de enlace, área de cobertura y tasas de transferencia, la función de utilidad se define en la tabla 7.

Tabla 7. Tabla de puntajes de la función de utilidad para conectividad

Conectividad		
Disponibilidad del enlace	>95%	<95%
enlace apropiado entre dispositivos	0,2	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	0,2	0
Tasas de transferencia (relativo)	Crubre la necesidad	No subre la necesidad
Pico "goodput" de subida	0,2	0
Pico "goodput" de bajada	0,2	0
Latencia	0,2(<1s)	0(>1s)
Rango de cobertura (Relativo)	0,2	0

Fuente: Autores

3.2.5 Seguridad

Dado que la seguridad puede llegar a ser un factor muy importante en las aplicaciones de Smart Grid, se analizará que tecnologías soportan cifrado, autenticación, protección a la repetición, intercambio de claves, detección de nodos falsos (rogue).

Tabla 8. Tabla de puntajes de la función de utilidad para seguridad

Seguridad	Soporta	No soporta
cifrado	0,2	0
Autenticación	0,2	0
Protección a la repetición	0,2	0
intercambio de claves	0,2	0
detección de nodo falso (rogue)	0,2	0

Fuente: Autores

3.2.6 Función de utilidad principal

La función de utilidad principal estará conformada por la suma de los valores asignados en las tablas de puntajes, después de ser multiplicado por su peso ponderado, el cual será definido más adelante en la sección 3.3. La ecuación de la función principal de utilidad queda de la siguiente forma:

$$\sum Pu_i * Pe_i$$

Dónde:

Pu_i = Puntaje dado según las tablas

Pe_i = Peso ponderado de acuerdo a los perfiles de red

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO

En la sección 1.2.6 del capítulo uno fue propuesto un esquema de red para un conjunto de WSN aplicados en Smart Grid, en la cual se evidencian tres principales aplicaciones WSN en Smart Grid, las cuales son la monitorización y control del consumo al interior de las instalaciones del cliente (tal como la Smart

Grid HAN descrita en la sección 2.5.1), Las aplicaciones AMI y las aplicaciones DA.

El peso de cada criterio en cada perfil de entorno dependerá del impacto o importancia que pueda tener al momento de generar una aplicación. Los pesos a asignar se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Tabla de pesos ponderados para evaluación de tecnologías

Importancia	Peso
Irrelevante	0
Relevante	2
Importante	5
Determinante	10

Fuente: autores

A continuación se crearán los perfiles de comparación para cada una de estas tres soluciones.

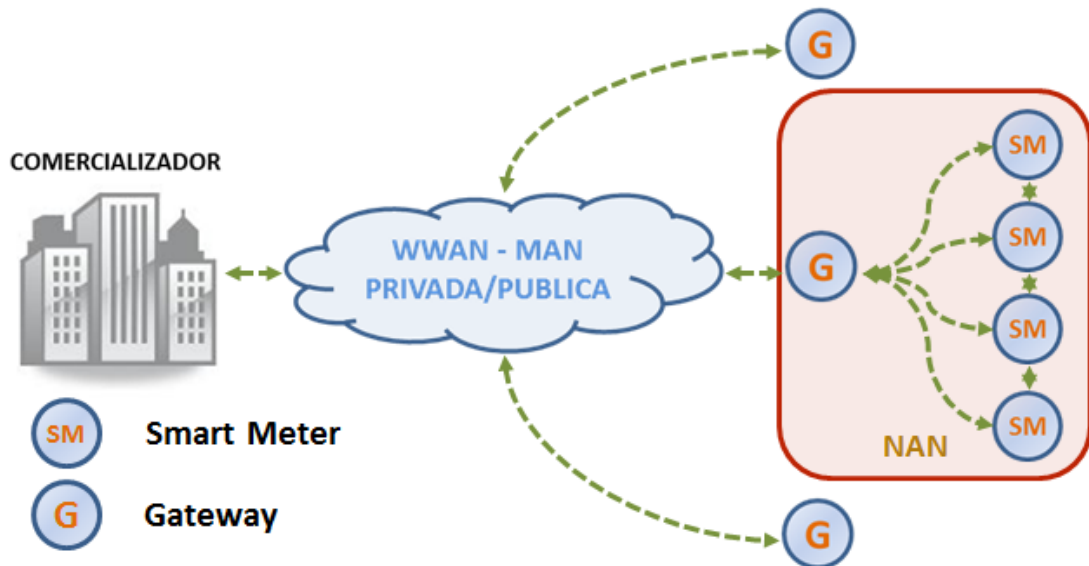
3.3.1 Aplicaciones al interior de los predios del cliente

El resumen de asignación de pesos se encuentra en la tabla 10.

3.3.2 Estructura AMI

La estructura AMI propuesta en la sección 1.2.6 del capítulo 1, contempla un despliegue de red como el mostrado en la figura 19. En este despliegue se identifican dos entornos de red principales, los cuales son un entorno de red NAN y un entorno de red WWAN por el cual el dispositivo Gateway enviará los datos recolectados de los Smart Meter al comercializador de energía, y este a su vez envía datos de tarifas y otras variables a los Smart Meter. Los resúmenes de asignación para estas dos redes se encuentran en las tablas 11 y 12

Figura 19. Despliegue propuesto AMI



Fuente: Autores

Hay que tener en cuenta que dentro de esta red no solo se transmitirán datos referentes al consumo de energía del usuario, en muchos casos, con la llegada de la generación distribuida y los automóviles eléctricos, el flujo de datos contendrá datos de la energía vendida por los usuarios al sistema interconectado. Esto hace que el mercado sea más dinámico que el actual. De acuerdo con Peng Cheng, Li Wang, Bin Zhen y Shihua Wang [40] las tasas de transferencia de la infraestructura AMI son en promedio de 8.84 Kbps de subida y 3,12 Kbps de bajada.

De acuerdo con Sensus USA inc. [8], se consideran características de alto impacto al seleccionar tecnologías inalámbricas para infraestructura AMI las referentes a la privacidad, seguridad, confiabilidad de equipos y rango de cobertura, mientras que características como latencia e interoperabilidad, no presentan tanta importancia. La característica que si depende del entorno en el cual se implementara la tecnología es la escalabilidad, pues esta depende de la rapidez con la que aumenten las poblaciones.

Tabla 10. Asignación de pesos para entorno del cliente

Topología de conexión	Peso	Importancia	Observaciones
Punto a Punto	0	Irrelevante	Se considera importante que la tecnología soporte las topologías punto-multipunto y malla, pues son los tipos de despliegues mas comunes en este entorno
Punto Multipunto	5	Importante	
Broadcast	2	Relevante	
Malla	5	Importante	
Escalabilidad			
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	2	Relevante	La coexistencia intra-tecnológica se considera relevante para este entorno, dado que un buen desempeño en este aspecto influye en la cantidad de dispositivos que se puedan instalar.
Interferencia de canal adyacente	2	Relevante	
Interferencia de canal alternado	2	Relevante	
Evasión de colisiones	2	Relevante	
Coexistencia inter-tecnológica			
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	5	Importante	Este aspecto es importante en este entorno, ya que en el interior de los predios de los clientes generalmente coexiste diferentes tecnologías en el mismo espacio, causando que alguna implementación falle o altere su funcionamiento
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	5	Importante	
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	Importante	
Identificación única de dispositivo	2	Relevante	
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	Determinante	Es determinante que la tecnología soporte la cantidad de dispositivos de una posible solución para poder pensar en implementarla, en este entorno pueden llegar fácilmente a los 100 dispositivos.
Requerimientos de Hardware			
Existe proveedor de servicio	0	Irrelevante	Generalmente el usuario compra la solución
Ahorro energía	10	Determinante	Es prioridad de este entorno considerar un bajo consumo de energía dado que la mayoría de los nodos estarán funcionando por medio de baterías
Facilidad de instalación	10	Determinante	
Conectividad			
Disponibilidad del enlace			
enlace apropiado entre dispositivos	5	Importante	Los eventos de comunicaciones exitosas, inciden directamente en la eficiencia de la tecnología, es por esto que se consideran importantes estos parámetros
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	Importante	
Tasas de transferencia (relativo)			
Pico "goodput" de subida	10	Determinante	La tecnología debe ser capaz de soportar las tasas de datos solicitadas por las aplicaciones a desarrollar, en estas aplicaciones se necesitan tasas menores a los 250 Kbps
Pico "goodput" de bajada	10	Determinante	
Latencia	5	Importante	Es importante dado que en algunos procesos encontrados dentro del dominio del cliente pueden aparecer aplicaciones que necesiten una baja latencia
Rango de cobertura (m)	10	Determinante	La tecnología debe tener al menos 30 m de alcance
Seguridad			
cifrado	5	Importante	Este es un aspecto importante a tener en cuenta en cualquier entorno en el que se piense hacer una implementación
Autenticación	5	Importante	
Protección a la repetición	5	Importante	
intercambio de claves	5	Importante	
detección de nodo falso (rogue)	2	Relevante	

Fuente: Autores

Tabla 11. Asignación de pesos para entorno NAN de AMI

Topología de conexión	Peso	Importancia	Observaciones
Punto a Punto	0	Irrelevante	Se considera importante que la tecnología soporte las topologías punto-multipunto y malla, pues son los tipos de despliegues contemplados en este entorno
Punto Multipunto	5	Importante	
Broadcast	2	Relevante	
Malla	5	Importante	
Escalabilidad			
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	2	Relevante	La coexistencia intra-tecnológica se considera relevante para este entorno, dado que un buen desempeño en este aspecto influye en la cantidad de dispositivos que se puedan instalar.
Interferencia de canal adyacente	2	Relevante	
Interferencia de canal alternado	2	Relevante	
Evasión de colisiones	2	Relevante	
Coexistencia inter-tecnológica			
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	Relevante	Es importante que las tecnologías de este entorno tengan buen desempeño ante las emisiones RF de las líneas de energía, pues tienen cierta cercanía con la infraestructura eléctrica principal de los predios
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	Relevante	
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	Importante	
Identificación única de dispositivo	5	Importante	Cada dispositivo será un medidor usado para facturar
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	Determinante	Es determinante que la tecnología soporte la cantidad de dispositivos de una posible solución para poder pensar en implementarla, en este entorno pueden llegar fácilmente a los 100 dispositivos por gateway.
Requerimientos de Hardware			
Existe proveedor de servicio	5	Importante	Este aspecto se vuelve importante, dado que puede ser que se contrate un proveedor de servicios de conectividad dependiendo de la tecnología que se seleccione.
Ahorro energía	5	Importante	Es prioridad de este entorno considerar un bajo consumo de energía dado que los nodos pueden llegar a funcionar con baterías.
Facilidad de instalación	5	Importante	
Conectividad			
Disponibilidad del enlace			
Habilidad para establecer un enlace apropiado entre dispositivos	5	Importante	Los eventos de comunicaciones exitosas, inciden directamente en la eficiencia de la tecnología, es por esto que se consideran importantes estos parámetros
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	Importante	
Tasas de transferencia (relativo)			
Pico "goodput" de subida	10	Determinante	para garantizar lo propuesto por Cheng [40], se considerará una tasa deseable de al menos 100 Kbps para bajada y subida
Pico "goodput" de bajada	10	Determinante	
Latencia	2	Relevante	No es imperativo que los datos sean entregados inmediatamente.
Rango de cobertura (m)	10	Determinante	La tecnología debe tener al menos 80 m de alcance
Seguridad			
cifrado	5	Importante	Este es un aspecto importante a tener en cuenta en cualquier entorno en el que se piense hacer una implementación
Autenticación	5	Importante	
Protección a la repetición	5	Importante	
intercambio de claves	5	Importante	
detección de nodo falso (rogue)	5	Importante	

Fuente: Autores

Tabla 12. Asignación de pesos para entorno WWAN de AMI

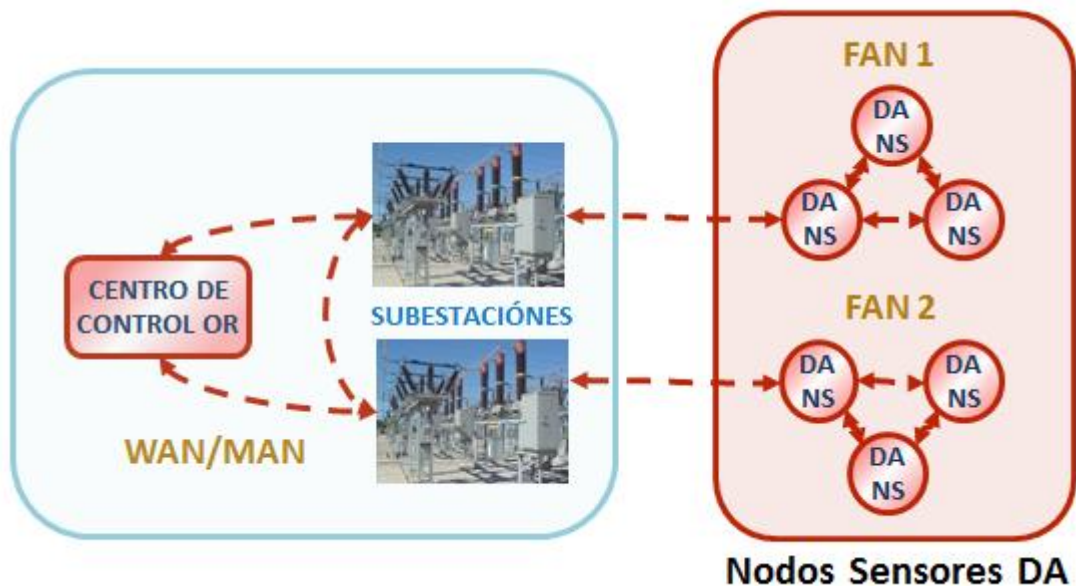
Topología de conexión	Peso	Importancia	Observaciones
Punto a Punto	0	Irrelevante	Se considera importante que la tecnología soporte las topologías punto-multipunto y malla, pues son los tipos de despliegues contemplados en este entorno
Punto Multipunto	5	Importante	
Broadcast	2	Relevante	
Malla	5	Importante	
Escalabilidad			
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	2	Relevante	La coexistencia intra-tecnológica se considera relevante para este entorno, dado que un buen desempeño en este aspecto influye en la cantidad de dispositivos que se puedan instalar.
Interferencia de canal adyacente	2	Relevante	
Interferencia de canal alternado	2	Relevante	
Evasión de colisiones	2	Relevante	
Coexistencia inter-tecnológica			
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	Relevante	Es importante que las tecnologías de este entorno tengan buen desempeño ante las emisiones RF de las líneas de energía, pues tienen cercanía con la infraestructura de distribución eléctrica
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	Relevante	
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	Importante	
Identificación única de dispositivo	5	Importante	Cada dispositivo puede llegar ser un gateway de una NAN
Cantidad de dispositivos (relativo)	5	Importante	Es importante que la tecnología soporte la cantidad de dispositivos de una posible solución para poder pensar en implementarla, en este entorno pueden llegar fácilmente a los 1000 dispositivos.
Requerimientos de Hardware			
Existe proveedor de servicio	5	Importante	Este aspecto se vuelve importante, dado que puede ser que se contrate un proveedor de servicios de conectividad dependiendo de la tecnología que se seleccione.
Ahorro energía	2	Relevante	por la naturaleza y disposición de esta red, generalmente los dispositivos estarán conectados a una fuente continua de poder.
Facilidad de instalación	2	Relevante	
Conectividad			
Disponibilidad del enlace			
Habilidad para establecer un enlace apropiado entre dispositivos	5	Importante	Los eventos de comunicaciones exitosas, inciden directamente en la eficiencia de la tecnología, es por esto que se consideran importantes estos parámetros
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	Importante	
Tasas de transferencia (relativo)			
Pico "goodput" de subida	10	Determinante	para garantizar lo propuesto por Cheng [40], se considerará una tasa deseable de al menos 100 Kbps para bajada y subida
Pico "goodput" de bajada	10	Determinante	
Latencia	2	Relevante	No es imperativo que los datos sean entregados inmediatamente.
Rango de cobertura (m)	10	Determinante	La tecnología debe tener al menos 10000 m de alcance
Seguridad			
cifrado	5	Importante	Este es un aspecto importante a tener en cuenta en cualquier entorno en el que se piense hacer una implementación
Autenticación	5	Importante	
Protección a la repetición	5	Importante	
intercambio de claves	5	Importante	
detección de nodo falso (rogue)	5	Importante	

Fuente: Autores

3.3.3 Estructura DA

El despliegue para la estructura DA propuesta en la sección 1.2.6 del capítulo 1, se puede sintetizar en la figura 20. En este despliegue se identifican dos entornos de red principales, los cuales son el entorno de red FAN en donde se encuentran los nodos sensores de la red eléctrica y la red WAN, que para nuestro caso sería una red WWAN, que por cuestiones de seguridad, sería una red privada dedicada para esta infraestructura. Los datos obtenidos en la red FAN por los nodos sensores se envían a las subestaciones y centrales de control para mantener la monitorización y control de los mismos. La asignación de pesos para estas dos redes se encuentra resumida en las tablas 13 y 14.

Figura 20. Despliegue propuesto para DA



Fuente: Autores

De acuerdo con Sensus USA inc. [8], se consideran características de alto impacto al seleccionar tecnologías inalámbricas para infraestructura DA las referentes a la confiabilidad de equipos, interoperabilidad, escalabilidad, seguridad y rango de

cobertura, mientras que características como latencia y privacidad, no presentan tanta importancia.

De acuerdo con Peng Cheng, Li Wang, Bin Zhen y Shihua Wang [40] las tasas de transferencia de la infraestructura DA son en promedio de 761.88 Kbps de subida y 585.3 Kbps de bajada.

Tabla 13. Asignación de pesos para entorno FAN de DA

Topología de conexión	Peso	Importancia	Observaciones
Punto a Punto	0	Irrelevante	Se considera importante que la tecnología soporte las topologías punto-multipunto y malla, pues son los tipos de despliegues contemplados en este entorno
Punto Multipunto	5	Importante	
Broadcast	2	Relevante	
Malla	5	Importante	
Escalabilidad			
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	2	Relevante	La coexistencia intra-tecnológica se considera relevante para este entorno, dado que un buen desempeño en este aspecto influye en la cantidad de dispositivos que se puedan instalar.
Interferencia de canal adyacente	2	Relevante	
Interferencia de canal alternado	2	Relevante	
Evasión de colisiones	2	Relevante	
Coexistencia inter-tecnológica			
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	Relevante	Es importante que las tecnologías de este entorno tengan buen desempeño ante las emisiones RF de las líneas de energía, pues tienen cercanía con la infraestructura de distribución eléctrica
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	Relevante	
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	Importante	
Identificación única de dispositivo	5	Importante	Cada dispositivo representa un nodo sensor DA
Cantidad de dispositivos (relativo)	5	Importante	Es importante que la tecnología soporte la cantidad de dispositivos de una posible solución para poder pensar en implementarla, en este entorno pueden llegar a los 300 dispositivos.
Requerimientos de Hardware			
Existe proveedor de servicio	5	Importante	Este aspecto se vuelve importante, dado que puede ser que se contrate un proveedor de servicios de conectividad dependiendo de la tecnología que se seleccione.
Ahorro energía	2	Relevante	por la anturaleza y disposición de esta red, generalmente los dispositivos estarán conectados a
Facilidad de instalación	2	Relevante	
Conectividad			
Disponibilidad del enlace			
Habilidad para establecer un enlace apropiado entre dispositivos	5	Importante	Los eventos de comunicaciones exitosas, inciden directamente en la eficiencia de la tecnología, es por esto que se consideran importantes estos parametros
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	Importante	
Tasas de transferencia (relativo)			
Pico "goodput" de subida	10	Determinante	para garantizar lo propuesto por Cheng [40], se considerará una tasa deseable de al menos 3 Mbps Kbps para bajada y subida
Pico "goodput" de bajada	10	Determinante	
Latencia	10	Determinante	Es imperativo que los datos sean entregados inmediatamente (generalmente en menos de 1 segundo para ciertos tipos de datos)[40].
Rango de cobertura (m)	10	Determinante	La tecnología debe tener al menos 1000 m de alcance
Seguridad			
cifrado	5	Importante	Este es un aspecto importante a tener en cuenta en cualquier entorno en el que se piense hacer una implementación
Autenticación	5	Importante	
Protección a la repetición	5	Importante	
intercambio de claves	5	Importante	
detección de nodo falso (rogue)	5	Importante	

Fuente: Autores

Tabla 14. Asignación de pesos para entorno WWAN de DA

Topología de conexión	Peso	Importancia	Observaciones
Punto a Punto	0	Irrelevante	Se considera importante que la tecnología soporte las topologías punto-multipunto y malla, pues son los tipos de despliegues contemplados en este entorno
Punto Multipunto	5	Importante	
Broadcast	2	Relevante	
Malla	5	Importante	
Escalabilidad			
Coexistencia intra-tecnológica			
Interferencia co-canal	2	Relevante	La coexistencia intra-tecnológica se considera relevante para este entorno, dado que un buen desempeño en este aspecto influye en la cantidad de dispositivos que se puedan instalar.
Interferencia de canal adyacente	2	Relevante	
Interferencia de canal alternado	2	Relevante	
Evasión de colisiones	2	Relevante	
Coexistencia inter-tecnológica			
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	Relevante	Es importante que las tecnologías de este entorno tengan buen desempeño ante las emisiones RF de las líneas de energía, pues tienen cercanía con la infraestructura de distribución eléctrica
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	Relevante	
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	Importante	
Identificación única de dispositivo	5	Importante	Cada dispositivo representa un gateway DA
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	Determinante	Es determinante que la tecnología soporte la cantidad de dispositivos de una posible solución para poder pensar en implementarla, en este entorno pueden llegar fácilmente a los 1000 dispositivos.
Requerimientos de Hardware			
Existe proveedor de servicio	5	Importante	Este aspecto se vuelve importante, dado que puede ser que se contrate un proveedor de servicios de conectividad dependiendo de la tecnología que se seleccione.
Ahorro energía	2	Relevante	por la naturaleza y disposición de esta red, generalmente los dispositivos estarán conectados a
Facilidad de instalación	2	Relevante	
Conectividad			
Disponibilidad del enlace			
Habilidad para establecer un enlace apropiado entre dispositivos	5	Importante	Los eventos de comunicaciones exitosas, inciden directamente en la eficiencia de la tecnología, es por esto que se consideran importantes estos parámetros
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	Importante	
Tasas de transferencia (relativo)			
Pico "goodput" de subida	10	Determinante	para garantizar lo propuesto por Cheng [40], se considerará una tasa deseable de al menos 3 Mbps Kbps para bajada y subida
Pico "goodput" de bajada	10	Determinante	
Latencia	10	Determinante	Es imperativo que los datos sean entregados inmediatamente (generalmente en menos de 1 segundo para ciertos tipos de datos)[40].
Rango de cobertura (m)	10	Determinante	La tecnología debe tener al menos 10000 m de alcance
Seguridad			
cifrado	5	Importante	Este es un aspecto importante a tener en cuenta en cualquier entorno en el que se piense hacer una implementación
Autenticación	5	Importante	
Protección a la repetición	5	Importante	
intercambio de claves	5	Importante	
detección de nodo falso (rogue)	5	Importante	

4. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Para realizar la comparación se tuvo en cuenta la matriz consolidada de tecnologías inalámbricas proporcionada por NIST en su grupo de trabajo PAP2 [41] en conjunto con la información ya recolectada, y la metodología propuesta en el capítulo tres de este documento.

4.1 RESUMEN DE EVALUACIONES

Las evaluaciones se resumen en las tablas 16 a 21.

4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 15. Resumen de evaluaciones

Tecnología	WiFi(802.11 n)	Celular (4G LTE)	Wimax (802.16e)	Bluetooth (low energy)	ZigBee (2.4 GHz)
Entorno					
HAN	25,73	20,75	20,71	27,15	31,92
NAN en AMI	24,49	21,10	21,36	21,31	24,12
WWAN en AMI	17,99	19,35	19,61	16,31	16,62
FAN en DA	17,99	20,95	21,21	13,91	12,62
WWAN en DA	17,99	21,95	22,21	13,91	13,62

Fuente: Autores

La tabla 21 muestra el resumen de las evaluaciones anteriores donde se puede apreciar el puntaje obtenido por cada tecnología de acuerdo con el entorno en que se desee realizar la aplicación. Los resultados obtenidos señalan lo siguiente:

Tabla 16. Resumen de asignación de puntajes y valores relativos.

Característica	Tecnología - Valor criterio				
	Wif(802.11 n)	Celular (4G LTE)	Wimax (802.16e)	Bluetooth (low energy)	ZigBee (2.4 GHz)
Topología de conexión					
Punto a Punto	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Punto Multipunto	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Broadcast	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Malla	0,25	0	0	0	0,25
Escalabilidad					
Coexistencia intra-tecnológica					
Interferencia co-canal	0	0,1	0,08	0,1	0
Interferencia de canal adyacente	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Interferencia de canal alternado	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08
Evasión de colisiones	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Coexistencia inter-tecnológica					
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	0,08	0,1	0	0,1	0,08
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	0,08	0,1	0	0,1	0,1
Identificación única de dispositivo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08
Cantidad de dispositivos (relativo)	254	miles	miles	8	65,536
Requerimientos de Hardware					
Existe proveedor de servicio	0,5	0,5	0,5	0	0
Ahorro energía	0,333333333	0,25	0,25	0,5	1
Facilidad de instalación	0,5	0	0	0,5	0,5
Conectividad					
Disponibilidad del enlace					
Habilidad para establecer un enlace apropiado entre dispositivos	0	0,2	0,2	0,2	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	0	0	0,2	0,2	0
Tasas de transferencia (relativo)					
Pico "goodput" de subida	100 Mbps	~63.75 Mbps	~72.2 Mbps	~300 Kbps	170 Kbps
Pico "goodput" de bajada	100 Mbps	~255 Mbps	~288.8 Mbps	~300 Kbps	170 Kbps
Latencia	0	0,2	0,2	0,2	0
Rango de cobertura	0,501 km	100 km	100 km	0,149 km	0,126 km
Seguridad					
cifrado	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Autenticación	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Protección a la repetición	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
intercambio de claves	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
detección de nodo falso (rogue)	0,2		0		0

Fuente: Autores

Tabla 17. Comparación de tecnologías en el entorno HAN

		Tecnología - Valor criterio					Tecnología - Valor Combinado				
		WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee
Topología de conexión	Peso										
Punto a Punto	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0
Punto Multipunto	5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Broadcast	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Malla	5	0,25	0	0	0	0,25	1,25	0	0	0	1,25
Escalabilidad											
Coexistencia intra-tecnológica											
Interferencia co-canal	2	0	0,1	0,08	0,1	0	0	0,2	0,16	0,2	0
Interferencia de canal adyacente	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0
Interferencia de canal alternado	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Evasión de colisiones	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Coexistencia inter-tecnológica											
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	5	0,08	0,1	0	0,1	0,08	0,4	0,5	0	0,5	0,4
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	5	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	0,08	0,1	0	0,1	0,1	0,4	0,5	0	0,5	0,5
Identificación única de dispositivo	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	0,2	0,2	0,2	0	0,2	2	2	2	0	2
Requerimientos de Hardware											
Existe proveedor de servicio	0	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro energía	10	0,3333	0,25	0,25	0,5	1	3,3333	2,5	2,5	5	10
Facilidad de instalación	10	0,5	0	0	0,5	0,5	5	0	0	5	5
Conectividad											
Disponibilidad del enlace											
enlace apropiado entre dispositivos	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	0	0	0,2	0,2	0	0	0	1	1	0
Tasas de transferencia (relativo)											
Pico "goodput" de subida	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Pico "goodput" de bajada	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Latencia	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	0
Rango de cobertura (m)	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Seguridad											
cifrado	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Autenticación	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Protección a la repetición	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
intercambio de claves	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
detección de nodo falso (rogue)	2	0,2	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0
TOTAL PONDERADO POR TECNOLOGÍA							25,73	20,75	20,71	27,15	31,92

Fuente: Autores

Tabla 18. Comparación de tecnologías en el entorno NAN de la red AMI

		Tecnología - Valor criterio					Tecnología - Valor Combinado				
		WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee
Topología de conexión	Peso										
Punto a Punto	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0
Punto Multipunto	5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Broadcast	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Malla	5	0,25	0	0	0	0,25	1,25	0	0	0	1,25
Escalabilidad											
Coexistencia intra-tecnológica											
Interferencia co-canal	2	0	0,1	0,08	0,1	0	0	0,2	0,16	0,2	0
Interferencia de canal adyacente	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0
Interferencia de canal alternado	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Evasión de colisiones	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Coexistencia inter-tecnológica											
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0	0,1	0,08	0,16	0,2	0	0,2	0,16
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1	0,16	0,2	0,2	0,16	0,2
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	0,08	0,1	0	0,1	0,1	0,4	0,5	0	0,5	0,5
Identificación única de dispositivo	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	0,2	0,2	0,2	0	0,2	2	2	2	0	2
Requerimientos de Hardware											
Existe proveedor de servicio	5	0,5	0,5	0,5	0	0	2,5	2,5	2,5	0	0
Ahorro energía	5	0,333	0,25	0,25	0,5	1	1,667	1,25	1,25	2,5	5
Facilidad de instalación	5	0,5	0	0	0,5	0,5	2,5	0	0	2,5	2,5
Conectividad											
Disponibilidad del enlace											
enlace apropiado entre dispositivos	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	0	0	0,2	0,2	0	0	0	1	1	0
Tasas de transferencia (relativo)											
Pico "goodput" de subida	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Pico "goodput" de bajada	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Latencia	2	0	0,2	0,2	0,2	0	0	0,4	0,4	0,4	0
Rango de cobertura (m)	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2
Seguridad											
cifrado	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Autenticación	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Protección a la repetición	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
intercambio de claves	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
detección de nodo falso (rogue)	5	0,2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
TOTAL PONDERADO POR TECNOLOGÍA							24,49	21,1	21,36	21,31	24,12

Fuente: Autores

Tabla 19. Comparación de tecnologías en el entorno WWAN de la red AMI

		Tecnología - Valor criterio					Tecnología - Valor Combinado					
		WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	
Topología de conexión		Peso										
Punto a Punto	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0
Punto Multipunto	5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Broadcast	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Malla	5	0,25	0	0	0	0,25	1,25	0	0	0	0	1,25
Escalabilidad												
Coexistencia intra-tecnológica												
Interferencia co-canal	2	0	0,1	0,08	0,1	0	0	0,2	0,16	0,2	0	0
Interferencia de canal adyacente	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0
Interferencia de canal alternado	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Evasión de colisiones	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Coexistencia inter-tecnológica												
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0	0,1	0,08	0,16	0,2	0	0,2	0,16	0,16
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1	0,16	0,2	0,2	0,16	0,16	0,2
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	0,08	0,1	0	0,1	0,1	0,4	0,5	0	0,5	0,5	0,5
Identificación única de dispositivo	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Cantidad de dispositivos (relativo)	5	0	0,2	0,2	0	0,2	0	1	1	0	0	1
Requerimientos de Hardware												
Existe proveedor de servicio	5	0,5	0,5	0,5	0	0	2,5	2,5	2,5	0	0	0
Ahorro energía	2	0,333	0,25	0,25	0,5	1	0,667	0,5	0,5	1	2	2
Facilidad de instalación	2	0,5	0	0	0,5	0,5	1	0	0	1	1	1
Conectividad												
Disponibilidad del enlace												
enlace apropiado entre dispositivos	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	1	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	0	0	0,2	0,2	0	0	0	1	1	1	0
Tasas de transferencia (relativo)												
Pico "goodput" de subida	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2	2
Pico "goodput" de bajada	10	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	2	2	2	2	2	2
Latencia	2	0	0,2	0,2	0,2	0	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0
Rango de cobertura (m)	10	0	0,2	0,2	0	0	0	2	2	0	0	0
Seguridad												
cifrado	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1
Autenticación	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1
Protección a la repetición	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1
intercambio de claves	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1
detección de nodo falso (rogue)	5	0,2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
TOTAL POR TECNOLOGÍA							17,99	19,35	19,61	16,31	16,62	

Fuente: Autores

Tabla 20. Comparación de tecnologías en el entorno FAN de la red DA

		Tecnología - Valor criterio					Tecnología - Valor Combinado				
		WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee
Topología de conexión	Peso										
Punto a Punto	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0
Punto Multipunto	5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Broadcast	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Malla	5	0,25	0	0	0	0,25	1,25	0	0	0	1,25
Escalabilidad											
Coexistencia intra-tecnológica											
Interferencia co-canal	2	0	0,1	0,08	0,1	0	0	0,2	0,16	0,2	0
Interferencia de canal adyacente	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0
Interferencia de canal alternado	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Evasión de colisiones	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Coexistencia inter-tecnológica											
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0	0,1	0,08	0,16	0,2	0	0,2	0,16
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1	0,16	0,2	0,2	0,16	0,2
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	0,08	0,1	0	0,1	0,1	0,4	0,5	0	0,5	0,5
Identificación única de dispositivo	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Cantidad de dispositivos (relativo)	5	0	0,2	0,2	0	0,2	0	1	1	0	1
Requerimientos de Hardware											
Existe proveedor de servicio	5	0,5	0,5	0,5	0	0	2,5	2,5	2,5	0	0
Ahorro energía	2	0,333	0,25	0,25	0,5	1	0,667	0,5	0,5	1	2
Facilidad de instalación	2	0,5	0	0	0,5	0,5	1	0	0	1	1
Conectividad											
Disponibilidad del enlace											
enlace apropiado entre dispositivos	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	0	0	0,2	0,2	0	0	0	1	1	0
Tasas de transferencia (relativo)											
Pico "goodput" de subida	10	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0	0
Pico "goodput" de bajada	10	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0	0
Latencia	10	0	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0
Rango de cobertura (m)	10	0	0,2	0,2	0	0	0	2	2	0	0
Seguridad											
cifrado	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Autenticación	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Protección a la repetición	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
intercambio de claves	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
detección de nodo falso (rogue)	5	0,2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
TOTAL POR TECNOLOGÍA							17,99	20,95	21,21	13,91	12,62

Fuente: Autores

Tabla 21. Comparación de tecnologías en el entorno WWAN de la red DA

		Tecnología - Valor criterio					Tecnología - Valor Combinado				
		WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee	WiFi	Celular	Wimax	Bluetooth	ZigBee
Topología de conexión	Peso										
Punto a Punto	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0	0
Punto Multipunto	5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Broadcast	2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Malla	5	0,25	0	0	0	0,25	1,25	0	0	0	1,25
Escalabilidad											
Coexistencia intra-tecnológica											
Interferencia co-canal	2	0	0,1	0,08	0,1	0	0	0,2	0,16	0,2	0
Interferencia de canal adyacente	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0
Interferencia de canal alternado	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,2	0,2	0,2	0,2	0,16
Evasión de colisiones	2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Coexistencia inter-tecnológica											
Sensibilidad a interferencia de otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0	0,1	0,08	0,16	0,2	0	0,2	0,16
Nivel de interferencia causado a otras tecnologías de radio	2	0,08	0,1	0,1	0,08	0,1	0,16	0,2	0,2	0,16	0,2
Sensibilidad a las emisiones RF de líneas de energía	5	0,08	0,1	0	0,1	0,1	0,4	0,5	0	0,5	0,5
Identificación única de dispositivo	5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,08	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Cantidad de dispositivos (relativo)	10	0	0,2	0,2	0	0,2	0	2	2	0	2
Requerimientos de Hardware											
Existe proveedor de servicio	5	0,5	0,5	0,5	0	0	2,5	2,5	2,5	0	0
Ahorro energía	2	0,333	0,25	0,25	0,5	1	0,667	0,5	0,5	1	2
Facilidad de instalación	2	0,5	0	0	0,5	0,5	1	0	0	1	1
Conectividad											
Disponibilidad del enlace											
enlace apropiado entre dispositivos	5	0	0,2	0,2	0,2	0	0	1	1	1	0
Habilidad para mantener una conexión apropiada	5	0	0	0,2	0,2	0	0	0	1	1	0
Tasas de transferencia (relativo)											
Pico "goodput" de subida	10	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0	0
Pico "goodput" de bajada	10	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0	0
Latencia	10	0	0,2	0,2	0,2	0	0	2	2	2	0
Rango de cobertura (m)	10	0	0,2	0,2	0	0	0	2	2	0	0
Seguridad											
cifrado	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Autenticación	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
Protección a la repetición	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
intercambio de claves	5	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1
detección de nodo falso (rogue)	5	0,2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
TOTAL POR TECNOLOGÍA							17,99	21,95	22,21	13,91	13,62

Fuente: Autores

- Para un entorno HAN que está pensado en la monitorización y control del consumo de energía al interior de las instalaciones del cliente, la tecnología ZigBee presenta la mejor alternativa, seguida de Bluetooth y en menor medida WiFi, debido principalmente a que son tecnologías que presentan un mayor ahorro de energía y facilidad de instalación frente a tecnologías como WiMAX y Celular las cuales requieren un mayor trabajo para el desarrollo de su infraestructura.
- En un entorno NAN de AMI, las tecnologías WiFi y ZigBee presentan las mejores alternativas gracias no solo a sus características ahorro de energía y facilidad de instalación sino también a sus características de seguridad que en el caso de WiFi es la tecnología que presenta más opciones para cumplir con este aspecto.
- En un entorno WWAN de AMI hay una exigencia mucho mayor en cuanto al rango de cobertura lo que convierte a esta característica en un factor determinante para la selección de la mejor opción. En este caso las tecnologías WiMAX y Celular ofrecen una mejor solución dado que en este aspecto superan ampliamente a las tecnologías WiFi, ZigBee y Bluetooth.
- En la estructura DA es en el entorno de red FAN donde se encuentran los nodos sensores de la red eléctrica, los cuales monitorizan y controla el sistema de distribución. Estos datos se envían a las subestaciones y centrales de control. Es aquí donde las tecnologías WiMAX 802.16e y Celular 4G LTE presentan características de alto impacto. El Rango de cobertura, latencia, cantidad de dispositivos soportados y tasas de transferencias, hacen estas tecnologías las adecuadas.

- En un entorno WWAN de la red DA, al igual que en el caso anterior, los factores determinantes son el rango de cobertura, latencia, cantidad de dispositivos soportados y tasas de transferencias. En este caso aumenta la exigencia en cuanto a rango de cobertura y cantidad de dispositivos lo que hace que las tecnologías WiMAX y Celular 4G LTE sigan estando muy por encima de las demás opciones presentadas.

CONCLUSIONES

- En el entorno de Smart Grid, las principales necesidades a cubrir por las redes de sensores inalámbricos (WSN) son las de medición y control del consumo y la infraestructura de transporte y distribución de energía, en este documento se analizaron dos grandes soluciones definidas en el medio, que son la infraestructura de medición avanzada(AMI) y la distribución automatizada(DA) y se ha identificado que hay un futuro promisorio que tienen las tecnologías inalámbricas como soluciones definitivas para la transmisión de datos dentro de estas soluciones, la investigación está siendo efectuada por numerosos grupos de trabajo para llegar a un consenso en normativas, estándares y criterios para la implementación de estas soluciones.
- Al momento de seleccionar una alternativa de tecnología inalámbrica para una determinada aplicación en una Smart Grid es importante realizar un estudio de las principales características de cada tecnología y contrastarlo con los requerimientos de la aplicación a implementar eligiendo así la mejor opción. Para esto, en este trabajo se ha establecido un método de selección llamado Utilidad Multiatributo para lo cual se establecieron las funciones de utilidad para cada parámetro de comparación seleccionado y se definieron las características de cada entorno y con base en esto se obtuvo una ponderación para cada tecnología con lo que finalmente se puede seleccionar la más adecuada según el entorno.
- Se observa que las tecnologías ZigBee y WiFi predominan en las redes de corto alcance dado que en estos casos, factores como la facilidad de instalación y ahorro de energía son determinantes mientras que características como el rango de cobertura o cantidad de dispositivos a soportar no representan una mayor influencia al momento de seleccionar una opción.

- En el caso de aplicaciones pensadas en redes de largo alcance y gran exigencia en tasas de transferencia de datos las tecnologías WiMAX seguida muy de cerca por la tecnología Celular son la mejores opciones gracias al amplio rango de cobertura que ofrecen.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] <http://www.nist.gov/smartgrid/faq.cfm> Consultado el 01/05/2012

[2] <http://www.iec.ch/smartgrid/background/explained.htm>

Consultado el 01/05/2012

[3] NIST Special Publication 1108R2 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0 – Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, Engineering Laboratory., Febrero de 2012.

Disponible en:

http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf

Consultado el 01/05/2012

[4] Networked Embedded Systems, Edited by Richard Zurawski, CRC Press 2009. Pages 3-1–3-13. Print ISBN: 978-1-4398-0761-3, eBook ISBN: 978-1-4398-0762-0, DOI: 10.1201/9781439807620.ch3

[5] “Wireless sensor networks: fundamentos, estado del arte y desafíos”, Soledad Escolar Díaz. Máster en ciencia y Tecnología informática, Diseño de sistemas distribuidos, Curso 2010-2011.

[6] National instruments webpage (última consulta 11/05/2012):

<http://www.ni.com/white-paper/8707/es>

[7] Gungor, V.C.; Bin Lu; Hancke, G.P.; , "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.10, pp.3557-3564, Oct. 2010

doi: 10.1109/TIE.2009.2039455

URL (ultima consulta 10/05/2012):

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5406152&isnumber=5567234>

[8] Wireless Smart Grid communications, A mesh versus Point-to-Multipoint Comparison. Sensus USA Inc. 2012

Disponible en (última consulta 17/05/2012):

<http://www.sensus.com/documents/10157/51976/Sensus+White+Paper+Mesh+vs+PTMP+Networks.pdf>

[9] "AMI and Beyond: How wireless Broadband Enables the Smart Grid Today and Tomorrow", Solution Brief, Motorola Inc. Disponible en (última consulta 18/05/2012):

<http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Utilities/ Documents/ Static%20Files/How%20Wireless%20Broadband%20Enables%20the%20Smart%20Grid.pdf>

[10] Dhawan, S.; , "Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi, and WiMAX," *Wireless Broadband and Ultra*

Wideband Communications, 2007. AusWireless 2007. The 2nd International Conference on , vol., no., pp.14, 27-30 Aug. 2007

[11] [802.11]IEEE Std.802.11, "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks," 2007.

[12] IEEE PSRC Tech. Rep., "Using Spread Spectrum Radio Communication for Power System Protection Relaying Applications," July 2005.

[13] Velazco Capacho, Daniel, "Evaluación de alternativas de comunicación para los parámetros de calidad de potencia de media tensión y medidas de los consumos de energía de baja tensión" Libro presentado en la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

[14] Li Li; Hu Xiaoguang; Chen Ke; He Ketai; , "The applications of WiFi-based Wireless Sensor Network in Internet of Things and Smart Grid," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on* , vol., no., pp.789-793, 21-23 June 2011

[15] Qualcomm, 3G Cellular Technology for Smart Grid Communications, February 2012 [Online]. Disponible: <http://www.qualcomm.com/media/documents/3g-cellular-technology-smart-grid-communications>

[16] EPRI Tech. Rep., "Wireless Connectivity for Electric Substations," Feb. 2008.

[17] Parikh, P.P.; Kanabar, M.G.; Sidhu, T.S.; , "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE* , vol., no., pp.1-7, 25-29 July 2010

[18] P. K. Lee, L. L. Lai, "A Practical Approach to Wireless GPRS On-Line Power Quality Monitoring System," *Proc. of the IEEE PES General Meeting*, June 2007.

[19] Clark, A.; Pavlovski, C. J., "Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks", Engineers and Computer Scientists (IMECS), 2010 International Multiconference of, vol., no., pp.1-6, 17-19 March 2010

[20] X. Zhang, Y. Gao, G. Zhang, and G. Bi, "CDMA2000 cellular network based SCADA system," *in an international conf. on Power system technology*, pp. 1301-1306, Vol. 2, 2002.

[21] L.Kong, J. Jin, and J. Cheng, "Introducing GPRS technology into remote monitoring system for prefabricated substations in China," *in an international conf. of mobile tech., application and systems*, Nov. 2005

[22] V.C. Gungor, F. C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," [Online]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science>.

[23] Shorey, R.; Miller, B.A.; , "The Bluetooth technology: merits and limitations," *Personal Wireless Communications, 2000 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.80-84, 2000

[24] Bisdikian, C.; , "An overview of the Bluetooth wireless technology," *Communications Magazine, IEEE* , vol.39, no.12, pp.86-94, Dec. 2001

[25] Dhawan, S.; , "Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi, and WiMAX," *Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, 2007. AusWireless 2007. The 2nd International Conference on* , vol., no., pp.14, 27-30 Aug. 2007

[26] Electric Power Research Institute, "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap," Aug. 2009.

[27] H. Zhang, G. Guan, and X. Zang, "The design of insulation online monitoring system based on Bluetooth technology and IEEE1451.5," *in an international conf. on Power Engineering*, pp.1287-1291, Dec. 2007.

- [28] Kollam, M.; Shree, S.R.B.S.; , "Zigbee Wireless Sensor Network for better Interactive Industrial Automation," *Advanced Computing (ICoAC), 2011 Third International Conference on* , vol., no., pp.304-308, 14-16 Dec. 2011
- [29] X. Xu, Introduction to Smart Grid, Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [30] Y. Yu, "Technical composition of smart grid and its implementation sequence", *Southern Power System Technology*, vol. 3, Feb. 2009, pp. 1-5.
- [31] Qiang Zhang; Yugeng Sun; Zhenhui Cui;, "Application and analysis of ZigBee technology for Smart Grid," *Computer and Information Application (ICCIA), 2010 International Conference on* , vol., no., pp.171-174, 3-5 Dec. 2010
- [32] ZigBeeAlliance, "ZigBeeSpeci_cation," Jan. 2008.
- [33] Li Zheng; , "ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications," *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference* , vol., no., pp.1067-1070, 18-21 Oct. 2006
- [34] X. Li, Y. Xu and F. Ren, Techniques for Wireless Sensor Networks, Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.

[35] NISTIR 7761 – NIST Priority Action Plan 2, Guidelines for Assessing Wireless Standards for Smart Grid Applications, Febrero de 2011

Disponible en (última consulta 01/06/2012):

<http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/pub/SmartGrid/PAP02Wireless/NISTIR7761.pdf>

[36] “Smart Grid” - Asignatura: Comunicaciones Industriales Avanzadas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) – Universidad Pontificia Comillas, Curso 2009 – 2010, Mayo de 2010.

[37] "IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads," IEEE Std 2030-2011, vol., no., pp.1-126, Sept. 10 2011

[38] EPRI Tech. Rep., "Assessment of Wireless Technologies in Substation Functions Part-II: Substation Monitoring and Management Technologies," Mar. 2006

[39] Ted Echeverría Dionisio, “Control de sistemas eléctricos utilizando tecnología ZigBee.”, Instituto Tecnológico de Minatitlán.

Disponible en (última consulta 23/06/2012):

http://www.cudi.mx/eventos/2011/SNEST_Echeverria_Dionisio.pdf

[40] Peng Cheng, Li Wang, Bin Zhen, y Shihua Wang, “Feasibility Study of Applying LTE to Smart Grid”. Huawei Technologies Co., Ltd, Beijing 100095, china. 2011.

[41] NIST PAP2, “Wireless Functionality and Characteristics Matrix for the Identification of Smart Grid Domain Application” version 5, 2012.

Disponible en (última consulta 23/06/2012):

<http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/SmartGrid/PAP02Objective2>

BIBLIOGRAFÍA

[802.11] IEEE Std.802.11, "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks," 2007.

AMI and Beyond: How wireless Broadband Enables the Smart Grid Today and Tomorrow, Solution Brief, Motorola Inc. Disponible en (última consulta 18/05/2012):

<http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Utilities/ Documents/ Static%20Files/How%20Wireless%20Broadband%20Enables%20the%20Smart%20Grid.pdf>

Bisdikian, C.; "An overview of the Bluetooth wireless technology," *Communications Magazine, IEEE* , vol.39, no.12, pp.86-94, Dec. 2001

Clark, A.; Pavlovski, C. J., "Wireless Networks for the Smart Energy Grid: Application Aware Networks", Engineers and Computer Scientists (IMECS), 2010 International Multiconference of, vol., no., pp.1-6, 17-19 March 2010

Dhawan, S.; "Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi, and WiMAX," *Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, 2007. AusWireless 2007. The 2nd International Conference on* , vol., no., pp.14, 27-30 Aug. 2007

Electric Power Research Institute, "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap," Aug. 2009.

EPRI Tech. Rep., "Assessment of Wireless Technologies in Substation Functions Part-II: Substation Monitoring and Management Technologies," Mar. 2006

EPRI Tech. Rep., "Wireless Connectivity for Electric Substations," Feb. 2008.

Gungor, V.C.; Bin Lu; Hancke, G.P.; , "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.57, no.10, pp.3557-3564, Oct. 2010. doi: 10.1109/TIE.2009.2039455. URL (última consulta 10/05/2012):

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5406152&isnumber=5567234>

H. Zhang, G. Guan, and X. Zang, "The design of insulation online monitoring system based on Bluetooth technology and IEEE1451.5," *in an international conf. on Power Engineering*, pp.1287-1291, Dec. 2007.

<http://www.iec.ch/smartgrid/background/explained.htm>. Consultado el 01/05/2012

<http://www.nist.gov/smartgrid/faq.cfm> Consultado el 01/05/2012

IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads," IEEE Std 2030-2011, vol., no., pp.1-126, Sept. 10 2011

IEEE PSRC Tech. Rep., "Using Spread Spectrum Radio Communication for Power System Protection Relaying Applications," July 2005.

Kollam, M.; Shree, S.R.B.S.; , "Zigbee Wireless Sensor Network for better Interactive Industrial Automation," *Advanced Computing (ICoAC), 2011 Third International Conference on* , vol., no., pp.304-308, 14-16 Dec. 2011.

L.Kong, J. Jin, and J. Cheng, "Introducing GPRS technology into remote monitoring system for prefabricated substations in China," *in an international conf. of mobile tech., application and systems*, Nov. 2005.

Li Li; Hu Xiaoguang; Chen Ke; He Ketai; , "The applications of WiFi-based Wireless Sensor Network in Internet of Things and Smart Grid," *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on* , vol., no., pp.789-793, 21-23 June 2011.

Li Zheng; , "ZigBee Wireless Sensor Network in Industrial Applications," *SICE-ICASE, 2006. International Joint Conference* , vol., no., pp.1067-1070, 18-21 Oct. 2006.

National instruments webpage (última consulta 11/05/2012):
<http://www.ni.com/white-paper/8707/es>

Networked Embedded Systems, Edited by Richard Zurawski, CRC Press 20092009 Pages 3-1–3-13. Print ISBN: 978-1-4398-0761-3, eBook ISBN: 978-1-4398-0762-0, DOI: 10.1201/9781439807620.ch3

NIST PAP2, "Wireless Functionality and Characteristics Matrix for the Identification of Smart Grid Domain Application" version 5, 2012. Disponible en (última consulta 23/06/2012):

<http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/bin/view/SmartGrid/PAP02Objective2>

NIST Special Publication 1108R2 NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0 – Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, Engineering Laboratory., Febrero de 2012. Disponible en: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf. Consultado el 01/05/2012

NISTIR 7761 – NIST Priority Action Plan 2, Guidelines for Assessing Wireless Standards for Smart Grid Applications, Febrero de 2011. Disponible en (última consulta 01/06/2012):

<http://collaborate.nist.gov/twiki-sggrid/pub/SmartGrid/PAP02Wireless/NISTIR7761.pdf>

P. K. Lee, L. L. Lai, "A Practical Approach to Wireless GPRS On-Line Power Quality Monitoring System," *Proc. of the IEEE PES General Meeting*, June 2007.

Parikh, P.P.; Kanabar, M.G.; Sidhu, T.S.; , "Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications," *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE* , vol., no., pp.1-7, 25-29 July 2010

Peng Cheng, Li Wang, Bin Zhen, y Shihua Wang, "Feasibility Study of Applying LTE to Smart Grid". Huawei Technologies Co., Ltd, Beijing 100095, china. 2011.

Qiang Zhang; Yugeng Sun; Zhenhui Cui;, "Application and analysis of ZigBee technology for Smart Grid," *Computer and Information Application (ICCIA), 2010 International Conference on* , vol., no., pp.171-174, 3-5 Dec. 2010

Qualcomm, 3G Cellular Technology for Smart Grid Communications, February 2012 [Online]. Disponible: <http://www.qualcomm.com/media/documents/3g-cellular-technology-smart-grid-communications>

Shorey, R.; Miller, B.A.; , "The Bluetooth technology: merits and limitations," *Personal Wireless Communications, 2000 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.80-84, 2000

Smart Grid - Asignatura: Comunicaciones Industriales Avanzadas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) – Universidad Pontificia Comillas, Curso 2009 – 2010, Mayo de 2010.

Ted Echeverría Dionisio, "Control de sistemas eléctricos utilizando tecnología ZigBee.", Instituto Tecnológico de Minatitlán. Disponible en (última consulta 23/06/2012): http://www.cudi.mx/eventos/2011/SNEST_Echeverria_Dionisio.pdf

V.C. Gungor, F. C. Lambert, "A survey on communication networks for electric system automation," [Online]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science>.

Velazco Capacho, Daniel, "Evaluación de alternativas de comunicación para los parámetros de calidad de potencia de media tensión y medidas de los consumos de energía de baja tensión" Libro presentado en la Maestría en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.

Wireless sensor networks: fundamentos, estado del arte y desafíos, Soledad Escolar Díaz. Máster en ciencia y Tecnología informática, Diseño de sistemas distribuidos, Curso 2010-2011.

Wireless Smart Grid communications, A mesh versus Point-to-Multipoint Comparison. Sensus USA Inc. 2012. Disponible en (última consulta 17/05/2012):http://www.sensus.com/documents/10157/51976/Sensus+White+Paper_Mesh+vs+PTMP+Networks.pdf

X. Li, Y. Xu and F. Ren, Techniques for Wireless Sensor Networks, Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.

X. Xu, Introduction to Smart Grid, Beijing: China Electric Power Press, 2009.

X. Zhang, Y. Gao, G. Zhang, and G. Bi, "CDMA2000 cellular network based SCADA system," *in an international conf. on Power system technology*, pp. 1301-1306, Vol. 2, 2002.

Y. Yu, "Technical composition of smart grid and its implementation sequence", *Southern Power System Technology*, vol. 3, Feb. 2009, pp. 1-5.

ZigBeeAlliance, "ZigBeeSpecification," Jan. 2008.