

**ARQUITECTURA DE UNA RED HAN (HOME AREA NETWORK) ORIENTADA A
SERVICIOS SOBRE SMART GRID**

**CARLOS ANDRÉS DÍAZ ANDRADE
JUAN CARLOS HERNÁNDEZ DELGADO**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN INFORMÁTICA Y
TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI
2013**

**ARQUITECTURA DE UNA RED HAN (HOME AREA NETWORK) ORIENTADA A
SERVICIOS SOBRE SMART GRID**

**CARLOS ANDRÉS DÍAZ ANDRADE
JUAN CARLOS HERNÁNDEZ DELGADO**

**Trabajo de grado para optar al título de Maestría en
Gestión Informática y Telecomunicaciones**

**Asesor de Investigación:
ANDRÉS NAVARRO CADAVID
Doctor Ingeniero en Telecomunicaciones**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN GESTIÓN INFORMÁTICA Y
TELECOMUNICACIONES
SANTIAGO DE CALI**

2013

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Santiago de Cali, junio 30 de 2013

Contenido

ARQUITECTURA DE UNA RED HAN (HOME AREA NETWORK) ORIENTADA A SERVICIOS SOBRE SMART GRID	1
ARQUITECTURA DE UNA RED HAN (HOME AREA NETWORK) ORIENTADA A SERVICIOS SOBRE SMART GRID	2
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	9
1.1 Contexto de trabajo	9
1.2 Planteamiento del problema.....	10
1.3 Objetivo General	11
1.4 Objetivos específicos	12
1.5 Resumen de estrategia/Enfoque del modelo propuesto.....	12
1.6 Resumen de resultados obtenidos	13
1.7 Organización del documento.....	13
CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL.....	15
2.1 Siglas y Abreviaturas.....	15
2.2 Introducción.....	16
2.3 Aspectos claves de Smart Grid	18
2.3.1 Generación Distribuida y el Paradigma Bidireccional	19
2.3.2 Interactividad	20
2.3.3 Advanced Metering Infrastructure (AMI).....	21
2.3.4 Seguridad Cibernética.....	22
2.3.5 Vehicle-to Grid (V2G)	23
2.4 Modelo Conceptual y la interoperabilidad.....	24
2.5 Diseño de la Arquitectura de Smart Grid	27

2.6 Arquitectura de Comunicaciones de Smart Grid	29
2.7 El valor de la red HAN para Smart Grid.....	31
2.8 Principios Arquitectónicos de las redes HAN	34
2.8.1 Interfaz de Servicios de Energía (ESI)	35
2.8.2 Medidor Inteligente (Smart Meter).....	36
2.8.3 Equipos del Cliente (Customer Equipment).....	37
2.8.4 Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System - EMS)	37
2.8.5 Generación Distribuida (Distributed Generación - DG)	38
2.8.6 Almacenamiento de Energía Distribuida.	38
2.8.7 Electrodomésticos Inteligentes (Smart Appliances)	39
2.9 Iniciativas de Desarrollo de Smart Grid en el mundo	40
2.11 Definiciones.....	41
Capítulo 3: Especificación de Requerimientos y Diseño del Sistema.	42
3.1 Introducción.....	42
3.1.1 Propósito	44
3.1.2 La audiencia para este SRS HAN es la siguiente:	45
3.1.3 Alcance.....	46
3.1.4 Siglas y Abreviaturas.....	47
3.1.5 Definiciones	48
3.1.6 Otras consideraciones y referencias	51
3.1.7 Consideraciones y Referencias de Seguridad en el ámbito HAN.....	53
3.2 Descripción General y Principios de Diseño.....	54
3.2.2 Consideraciones de Arquitectura	54
3.2.2.1 Interfaz de servicios de Energía (ESI).....	55

3.2.2.2 Vehicle-to-Grid (V2G) PHEV	55
3.2.2.3 Sistema de Gestión Energética (EMS)	56
3.2.2.4 Recursos Energéticos Distribuidos (DER).....	56
3.3 Requerimientos del Sistema HAN	57
3.3.1 marco de Requerimientos	57
3.3.3.1 Aplicaciones	59
3.3.3.2 Comunicaciones	60
3.3.3.3 Potencia	61
3.4 Supuestos en los Requerimientos.....	61
3.5 Lista de Requerimientos Funcionales según aspectos claves	62
3.6 Particionamiento en subsistemas arquitectura red HAN:	66
Capítulo 4: Validación de la arquitectura propuesta.....	76
4.1 Contextualización del problema	76
4.2 Entornos de Simulación.....	78
4.3 Diseño del Entorno de simulación	78
4.2.1. MATLAB	80
4.2.2. OMNET++	80
4.2.2.1 Módulos simples y compuestos.....	81
4.2.2.2 Objetos e instancias C++	81
4.2.2.3 Mensajes.....	81
4.3 Modelado de la capa de aplicación en Matlab.....	82
4.3.1 Descripción de la estrategia propuesta de Respuesta a la Demanda.	82
4.3.2 Integración de sistemas de Generación Distribuida.	90
4.4 Modelado del dominio de Red de Comunicaciones	94

4.4.1 Descripción Módulos de simulación	95
4.4.1.1 Los módulos de nodo IEEE 802.15.4	96
4.4.1.1 Los módulos de nodo IEEE 802.15.4	98
4.4.1.2 Los módulos de nodo TCP/IP del framework INET.	99
4.4.2 Simulación y análisis de resultados de la red de comunicaciones	100
4.4.2.1 Análisis de desempeño de la red IEEE 802.15.4	101
4.4.2.1.1 Escenario1: Variación del número de nodos.	103
4.4.2.1.2 Escenario 2: Análisis del tamaño de carga útil	106
4.4.2.2 Análisis de coexistencia redes 802.15.4 y 802.11 (prueba de campo).	109
Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo Futuro	114
ANEXO I Código Fuente	116
.....	117
ANEXO II Framework INET y Mixim	118
Referencias bibliográficas	120

Lista de Figuras

Figura 1 Sistemas de Energía Eléctrica Tradicional (a) y de próxima generación (b)	19
Figura 2 Modelo conceptual del NIST para Smart Grid (NIST, 2010, p.33)	25
Figura 3 NIST Interoperability Roadmap Conceptual Reference Diagram (NIST, 2010, p.35)	26
Figura 4 Modelo de 4 niveles para la implantación de Smart Grid. (Imagen adaptada de Sonoma 2009b)	28
Figura 5 Infraestructura de Comunicaciones para Smart Grid (Imagen adapta de Sonoma 2009 ^a)	30
Figura 6 Mapeo de estándares y tecnologías a varios segmentos de Smart Grid. (Imagen adaptada de Gunther et al, 2009)	33
Figura 7 Dominio del Cliente, componentes de la red HAN/PAN	35
Figura 8 Dominio del cliente en el diagrama de referencia conceptual de interoperabilidad del NIST (NIST, 2010, p.33)	43
Figura 9 Categorías de los Requerimientos red HAN	57
Figura 10 Modelo simplificado del dominio Smart grid en perspectiva TIC (Adaptado Yoshihiro & Tsuyoshi, 2011. Pag 5)	58
Figura 11. Particionamiento por subsistemas para la Arquitectura de la red HAN	66
Figura 12 Componentes básicos arquitectura de comunicaciones para Smart grid	74
Figura 13: Dominio del Cliente, visión del NIST	74
Figura 14. . Diagrama de bloques arquitectura propuesta de la red HAN para de Smart Grid	75
Figura 15. Ejemplo de perfiles de carga de usuarios red EMCALI en los 6 estratos.	77
Figura 16. Perfil de demanda diaria promedio de electricidad	77
Figura 17. Modelo de Simulación visto por capas	79
Figura 18 Entornos de Simulación en el Modelo de Simulación	79
Figura 19 La estructura del modelo en OMNeT + +	82
Figura 20. Curvas de costo variable para diferentes perfiles de carga.	83
Figura 21. Curva diaria de precio variable para demanda agregada.	84
Figura 22: Asignación de cargas por time slot	86

Figura 23. Resultado del control de la demanda usando el algoritmo de programación de tareas	88
Figura 24 Efecto de la señal de costo en el desplazamiento automático de cargas	89
Figura 25: Reducción de los picos de demanda. Perfiles de carga resultante después de aplicar el algoritmo de programación de cargas por precio variable. .	89
Figura 26 Ejemplo 2, efecto de suavizado de los periodos de carga máxima por desplazamiento de carga.	90
Figura 27 Información de radiación solar en la ciudad de Cali	91
Figura 28: Perfil de radiación solar promedio del mes de julio.....	92
Figura 29. Perfiles de radiación solar diaria promedio meses del año.....	92
Figura 30 Curva típica de salida de un Panel Solar.....	93
Figura 31 Resultado de reducción de los picos de carga por el control de la demanda y generación distribuida	94
Figura 32: Red HAN propuesta en el entorno OMNET++	95
Figura 33: (a) Nodo base de IEEE 802.15.4 (b) Tarjeta NIC base de un nodo 802.15.4.....	97
Figura 34. Modelo del Controlador central HAN (Gateway).....	98
Figura 35. Nodo basado en IEEE 802.15.4 con direccionamiento IP.	99
Figura 36. Módulo de INET con la pila TCP/IP y NIC ethernet	100
Figura 37. Módulo de INET con la pila TCP/IP y NIC WLAN.....	100
Figura 38 Ambiente de simulación topología estrella.....	102
Figura 39 Impacto del número de nodos sobre el valor del Goodput.....	104
Figura 40 Variación de la latencia durante el tiempo de simulación. Número de nodos =12.	105
Figura 41 Variación de la latencia promedio respecto a la cantidad de nodos. ...	105
Figura 42 Variación del goodput para diferentes tamaños de carga útil.	107
Figura 43 Valor de latencia promedio para diferentes valores de tamaño de información útil.....	108
Figura 44 Esquema ambiente del prueba de coexistencia entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11g.....	109
Figura 45 Tarjeta de desarrollo IEEE 802.15.4.....	110
Figura 46. Interferencia entre canales IEEE 802.15.4 y IEEE 802.11b.....	112

Lista de Tablas

Tabla 1 Siglas y Abreviaturas	16
Tabla 2 Definiciones	41
Tabla 3 Siglas y Abreviaturas	47
Tabla 4 Definiciones	51
Tabla 5. Lista de requerimientos clave para las redes HAN dentro de Smart grid.	62
Tabla 6 Mapeo Requerimientos clave sobre dispositivos Lógicos	67
Tabla 7: Etiquetas a los diferentes requerimientos obtenidos en el mapeo.	68
Tabla 8: Lista de requerimientos obtenida de SRS para la red HAN	73
Tabla 9: Caracterización de la información cargas para el algoritmo de programación	85
Tabla 10 Consumo promedio mensual de energía en los estratos 1, 2 y 3. (UNAL, 2006, página 34)	85
Tabla 11 Resumen parámetros de la simulación	102
Tabla 12: Frecuencias centrales correspondiente al número de canal.	111
Tabla 13 Resultados medición PER para los 16 canales en la banda de 2.4 GHz y diferentes valores de potencia de transmisión.	112

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto de trabajo

En los últimos años, muchos países en el mundo ven la modernización de las redes de energía eléctrica un factor fundamental para enfrentar la crisis energética, ya que permitirá alcanzar un mejoramiento de la eficiencia energética, una mayor transición a fuentes de energía renovables y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, todo ello con el fin de garantizar una economía sostenible para la prosperidad de las generaciones actuales y futuras. Actualmente en todo el mundo, se están invirtiendo miles de millones de dólares en la construcción de elementos que en última instancia serán redes de energía eléctrica "inteligentes" [Hiskens, 2010].

En términos generales, el concepto de redes "Smart" o "inteligentes", hace referencia a una red de energía moderna acorde con los adelantos y tendencias del siglo 21 y que pretende integrar servicios de diferentes tecnologías de comunicación y computación digital con una infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica que soporte un escenario de flujo de energía eléctrica de dos vías y que junto a un plano de comunicación bidireccional con capacidades de monitoreo y control, darán acceso a una serie de nuevas funcionalidades y aplicaciones que van mucho más allá de la iniciativa actual de algunos países de instalar medidores "inteligentes" en casas y negocios [Hiskens, 2010].

Dentro de la visión de Smart Grid, las TICs (tecnologías de información y comunicaciones) juegan un papel fundamental al proporcionar inteligencia a los dispositivos de la red de potencia, permitiendo a su vez tomar decisiones autónomas o simplemente actuar como interfaces de comunicación con los mismos dispositivos para que sean controlados por proveedores de servicios externos [Hiskens, 2010], dicho sistema de gestión permitirá mejorar la eficiencia en el consumo de energía en el hogar, reduciendo notablemente sus costos. Además los componentes de TIC proporcionarán a los usuarios finales una información en tiempo real del consumo de energía.

Ahora, en el modelo conceptual de Smart Grid propuesto por el NIST (National Institute of Standards and Technology) y que se describirá en el capítulo 2, se distinguen varios dominios, siendo la red HAN (Home Area Network) uno de los dominios clave para el éxito de Smart Grid. La HAN es una red instalada en el lado del cliente donde en principio debe existir un dispositivo central de gestión que posea inteligencia local y esté conectado a una multitud de dispositivos inteligentes: medidores inteligentes, lavadoras inteligentes, Televisores, electrodomésticos controlados remotamente, etc.

Otros agentes que juegan un papel importante en Smart Grid son los proveedores de servicios de energía, por tal razón el dispositivo central de gestión de energía en la HAN estaría conectado a una red de comunicación por medio de un Gateway a las redes de dichos proveedores para que proporcionen inteligencia adicional y pueden ofrecer servicios como tarificación, programación de dispositivos y desconexión en tiempo real [Verschueren, et al, 2010].

En la actualidad en el campo de Smart Grid, existen varios organismos de desarrollo y estandarización, los cuales se detallan en el marco teórico de este documento, así como los principales proyectos e iniciativas más representativas.

1.2 Planteamiento del problema

La energía siempre ha desempeñado un papel fundamental en la seguridad, la prosperidad económica y la calidad del medio ambiente en los países. En los últimos años se ha intensificado la atención hacia el desarrollo de tecnologías que permitan por un lado obtener una eficiencia energética y por otro la generación de energías alternativas. [America's Energy Future Energy Efficiency, Technologies Subcommittee, 2010]. Las tecnologías de eficiencia energética que existen en la actualidad o que puedan ser desarrolladas en un futuro próximo, podrían ahorrar mucho dinero y energía, según un nuevo informe del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. La plena adopción de estas tecnologías podría reducir el uso proyectado de energía en EE.UU. entre 17% a un 20% en el año 2020, y 25% a 31% en el año 2030. [RedOrbit, 2009]

El despliegue completo de estas tecnologías de eficiencia dependerá en parte de factores que promuevan su adopción, tales como precios de la energía o las políticas públicas destinadas a aumentar la eficiencia energética.

Según el mismo informe, casi el 70% del consumo de electricidad en los Estados Unidos se da en los edificios. El ahorro de energía que se podría alcanzar con la implantación de estas tecnologías tan solo en los edificios podría eliminar la necesidad de agregar nuevas capacidades de generación de electricidad hasta el año 2030. Con ello, las nuevas instalaciones de generación de energía serían necesarias sólo para corregir los desequilibrios en el suministro regional de energía, sustituir instalaciones obsoletas o para introducir fuentes de electricidad más amigables con el medio ambiente. [RedOrbit, 2009]

La innovación de vanguardia y el despliegue de las tecnologías de energía inteligente pueden reducir los costos para los consumidores y en el largo plazo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y proporcionar las bases para un sólido crecimiento económico en el futuro. [Technet, 2009]

“Los ciudadanos apoyan fuertemente las innovaciones de vanguardia que los ayuden ahorrar dinero por sus facturas de energía y cambios en sus hábitos de consumo de electricidad”, dijo Jim Hawley, director general interino de TechNet. “Así como la reunión mundial en Copenhague para la discusión de mejores formas de gestionar nuestros recursos de energía, estos datos demuestran que los ciudadanos están dispuestos a adoptar la tecnología para ser más eficientes y ahorrar en los costos de energía. Las soluciones tecnológicas son fundamentales para una implementación robusta de Smart Grid a nivel nacional y ayudar a ser más inteligente sobre la forma en que usamos la energía y nuestros recursos naturales” [TechNet, 2009]

Teniendo en cuenta las ventajas mencionadas dentro de la visión de Smart Grid, el proyecto propone una arquitectura de un sistema informático, que incorpore, una red HAN (Home Area Network) para interconectar y proporcionar inteligencia a los dispositivos y electrodomésticos en el hogar. Dicho sistema de gestión permitirá tomar decisiones autónomas para el mejoramiento de la eficiencia en el consumo de energía, buscando reducir sus costos. Por otro lado, los componentes de TIC de una red HAN, podrían proporcionar a los usuarios finales una información completa y en tiempo real del consumo de energía, permitiendo crear conciencia en las personas y por consiguiente modificar sus hábitos de consumo.

1.3 Objetivo General

Proponer una arquitectura para la gestión inteligente de energía eléctrica en el hogar y que a su vez soporte la prestación de servicios sobre una infraestructura Smart Grid.

1.4 Objetivos específicos

1. Elaborar documento del estado del arte sobre redes HAN y Smart Grid.
2. Realizar análisis de requerimientos para prestar servicios de Smart Grid sobre una red HAN.
3. Definir la arquitectura de la red HAN que de soporte a servicios de Smart Grid.
4. Validar y verificar la arquitectura propuesta a través de un ambiente de simulación.

1.5 Resumen de estrategia/Enfoque del modelo propuesto

Para la definición de la arquitectura del sistema tele informático en cuestión, se aplica principalmente dos metodologías. Primero se realiza la especificación de requerimientos (SRS por sus siglas en inglés) para redes HAN, que está organizado a su vez de acuerdo al estándar IEEE 830 (1998) de Prácticas recomendadas para especificación de requerimientos de software pero enfocado en aplicaciones de redes HAN. Y la segunda metodología se basa en el resultado del SRS para luego hacer una partición y definir los componentes del sistema y sus relaciones, para esta tarea se usa la metodología de análisis de Dorfman. En resumen las secciones que se incluyen son:

Sección 1 - Introducción: En esta sección se proporciona una introducción a todo el capítulo de Especificación de Requerimientos de Sistema (ERS).

Sección 2 - Descripción general: describe los elementos y los principios clave del ecosistema de Smart Grid que afectan en el desarrollo de la red HAN y sus consideraciones arquitectónicas.

Sección 3 - Requerimientos del sistema: Primero se da un contexto para el listado de todos los Requerimientos del sistema HAN organizados categóricamente, y luego se realiza una partición e identificación de los componentes (hardware, software e interconectividad) de la arquitectura usando análisis de Dorfman.

1.6 Resumen de resultados obtenidos

Se realiza la especificación de requerimientos para el diseño de la red HAN de acuerdo al estándar IEEE 830 de prácticas recomendadas para especificación de requerimientos de software pero enfocado en aplicaciones de redes HAN. Se definieron los componentes del sistema usando la metodología de análisis de Dorfman, teniendo en cuenta los dominios de las redes de comunicaciones y los principios arquitectónicos del NIST. Se realizó una evaluación del diseño propuesto a través de varias plataformas de simulación y pruebas de campo evaluando problema de escalabilidad mediante métricas de desempeño (goodput, latencia y PER) y la coexistencia entre redes de diferentes tecnologías. Se aplicó un algoritmo de gestión y control de carga en el lado de la demanda usando una estrategia de asignación de precios variables, con ello logró reducir los picos en periodos de máxima carga desde un 22 hasta un 40%.

1.7 Organización del documento

El presente trabajo se organiza de la forma que se expone a continuación:

El Capítulo 2 proporciona una base de conocimiento respecto a la terminología, las características, el desempeño funcional y conceptos claves de Smart Grid, así como una descripción del marco conceptual del NIST, el cual proporciona el contexto para los aspectos técnicos más detallados de la interoperabilidad, el diseño de modelos y el mapeo de requerimientos basados en estándares y criterios técnicos, así como los componentes para el dominio del cliente y los flujos de información de la red HAN a otros dominios

También se propone un marco para la arquitectura de comunicaciones de la red HAN con sus segmentos clave y elementos constitutivos en donde se detallan su interacción con los componentes básicos de un sistema de comunicaciones de extremo a extremo e incluye la terminología utilizada para definir las interfaces a otros segmentos de red, que son claves para la adecuada interoperabilidad.

En el capítulo 3 se definen los requerimientos y se describen los principios de diseño necesarios para enmarcar el desarrollo de los requerimientos funcionales y técnicos que permitan incorporar servicios de las redes HAN dentro de Smart Grid. Para la especificación de Requerimientos del Sistema (SRS) se definieron tres grandes categorías: aplicaciones, comunicaciones y red de potencia. Luego con el análisis de Dorfman se define la arquitectura.

En el capítulo 4 se describe el desarrollo del diseño de arquitectura de la red HAN a través de un ambiente de simulación basado en OMNeT++, donde se hace uso de los modelos existentes de la red de comunicaciones de la extensión INET y MiXiM, y se implementa los algoritmos de la capa de aplicación referente a la gestión de la energía y análisis de datos usando Matlab.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos durante la simulación para la validación de la arquitectura propuesta.

En el capítulo 6 se indican las principales conclusiones de este trabajo, se proponen desarrollos futuros y líneas de investigación

CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL

2.1 Siglas y Abreviaturas

LED	Light Emitter Diode
HAN	Home Area Network
AMI	Advanced Metering Infrastructure
AMR	Automatic Meter Reading
IP	Internet Protocol
V2G	Vehicle-to-Grid
BEV	Battery electric vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
SLA	Service Level Agreement
BAN	Building Area Network
IAN	Industrial Area Network
WAN	Wide Area Networks
MAN	Metropolitan Area Network
ISP	Internet Service Provider
TOU	Time of use
EMS	Energy management systems
PAN	Premises Area Network
ESI	Electric Services Interfaces
PCT	Programmable Controller Thermostat

FAN	Field Area Network
IHD	In Home Display
DG	Distributed Generation
EPS	Electric Power Storage
HVAC	Heater, Ventilation, and Air Conditioning
EISA	Energy Independence Security Act of 2007
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Comisión
NIST	National Institute of Standards and Technology

Tabla 1 Siglas y Abreviaturas

2.2 Introducción

Las definiciones y la terminología de los entes a cargo de la normalización y el desarrollo de las redes eléctricas varían levemente. Sin embargo, el concepto general de redes *smart* o inteligentes hace referencia a una red de energía avanzada, acorde con los adelantos y tendencias del siglo XXI, que incorpora los servicios y beneficios de las tecnologías de comunicación y computación digital a una infraestructura de transmisión y distribución de energía eléctrica, y que se caracteriza por un flujo bidireccional de energía e información, incluyendo equipos instalados en la parte de la red del cliente y sensores asociados (Hiskens, 2010; Boswarthick, Elloumi, & Ballot, 2010).

Existe consenso respecto de su objetivo principal: El proyecto Smart Grid aspira a desarrollar una red eléctrica más eficiente y confiable, que mejore la seguridad y calidad del suministro, de acuerdo a los avances de la era digital (Boal, 2010).

Según estudios de la iniciativa eléctrica Galvin, en los Estados Unidos (EE.UU) las tecnologías Smart Grid disminuirán los costes en el suministro de energía eléctrica y reducirán la necesidad de una inversión masiva en infraestructura en al menos los próximos 20 años, con una grilla eléctrica de mayor capacidad (Galvin & Yeager, 2008). La implementación generalizada de tecnología que permita a los usuarios controlar fácilmente su consumo de energía podría además incidir en la

reducción de los precios para todos los consumidores (Electricity Advisory Committee [EAC], 2008).

En el aspecto ambiental existe un gran interés de los países en desarrollar políticas y reglamentaciones que incentiven la creación de conciencia social respecto de las consecuencias de los gases de efecto invernadero. El problema radica en el combustible utilizado por las plantas de generación de energía tradicionales y se produce durante los picos de demanda que obligan a activar plantas especiales para poder suplir esas necesidades adicionales de energía. Esas plantas se utilizan únicamente durante esos periodos, con los sobrecostos que ello supone –que repercute directamente en las facturas–. Un dato muy significativo: en los Estados Unidos, un país desarrollado, el 40% de las emisiones de dióxido de carbono provienen de la generación eléctrica, mientras que únicamente el 20% son causadas por el transporte (U.S. Department of Energy [DOE], s.f). Esto presenta un enorme desafío para la industria del sector eléctrico en términos del cambio climático global. De acuerdo con el laboratorio Nacional de energías renovables (NREL), “Las empresas de servicios públicos son presionadas en muchos frentes para que adopten prácticas empresariales que respondan a las preocupaciones del medio ambiente en el mundo” ([DOE 1], s/f, p.21).

En este sentido, la aplicación de las tecnologías Smart Grid podría reducir las emisiones de carbono por medio del mejoramiento de la eficiencia, de la respuesta a la demanda y de la gestión de la carga de la red eléctrica. La motivación es grande ya que por ejemplo, si una red como la estadounidense mejorara su eficiencia en sólo un 5%, el ahorro de energía equivaldría a eliminar permanentemente el combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero de 53 millones automóviles (DOE, s.f). Smart Grid también reduciría al mínimo los costos de generación eléctrica en horas pico. Para conseguir estos objetivos es necesaria la contribución tanto de las compañías eléctricas, como de los usuarios. Las primeras deben dar los pasos necesarios para reemplazar una producción basada en el carbono por otra con base en energías renovables; los segundos deben incluirse en la solución a través de medidas de ahorro energético, para lo que deben contar con la información y los medios apropiados.

La red eléctrica transporta la energía eléctrica en alta tensión mediante la gestión de las infraestructuras eléctricas que forman la red de transmisión y enlazan las centrales de generación con las redes de distribución a los consumidores. La energía eléctrica no se puede almacenar en grandes cantidades, lo que implica que su producción y consumo deben ser iguales en todo momento, que debe existir un equilibrio constante de la producción con la demanda. Esa es la otra gran función de red eléctrica, la de operador del sistema, en la que debe de prever el consumo y supervisar en tiempo real las instalaciones de generación y transporte, de forma que las centrales produzcan la demanda real de los consumidores (Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones [OIETIT], 2011). Para esta operación se

dispone de centros de control que monitorizan el estado de la red y sus parámetros eléctricos a través de una red de telecomunicaciones que gestiona principalmente la red de transporte. Pero también ha habido modificaciones tecnológicas en el sector de la operación y mercado eléctrico discutidas en (OJETIT, 2011). Sin embargo, desde los puntos de distribución hacia el consumidor doméstico final queda mucho por hacer y hay que tener en cuenta que su participación en las redes inteligentes del futuro será un factor clave. En la actualidad, en muchos países del mundo se ha iniciado la sustitución de los contadores tradicionales analógicos por con nuevos contadores inteligentes.

Aunque en la actualidad, a menudo las redes inteligentes se asocian solamente con el despliegue de contadores inteligentes y con una comunicación entre una entidad de control centralizada y los usuarios, su uso permitiría poner en práctica controles de respuesta a la demanda de la energía eléctrica. Pero ese es sólo uno de los servicios relacionados con las redes inteligentes. Los medidores inteligentes instalados actualmente por algunas empresas de servicios públicos proporcionan funcionalidades muy limitadas y no tienen la capacidad de lograr por sí mismo todos los objetivos deseados relacionados con la implantación de redes inteligentes. Las redes que solo agregan contadores inteligentes a las tecnologías tradicionales a veces son llamados Smart Grid. Sin embargo, una red más avanzada y verdaderamente inteligente, una Smart Grid 2.0 comprendería otras tecnologías, como: la utilización de controles autónomos en el lado del usuario final, la generación y el almacenamiento de energía distribuida y las arquitecturas de potencia flexibles (Kwasinski, 2010).

2.3 Aspectos claves de Smart Grid

Para la implementación de Smart Grid es relevante entender cómo las tecnologías de redes inteligentes pueden ser integradas con el fin de producir un sistema que sea benéfico tanto para los proveedores de servicios públicos como para los operadores de las TIC y los usuarios, abriendo de esta manera nuevos mercados y generando nuevos modelos de negocio.

En dicha integración, se puede decir que Smart Grid no es sólo un concepto sino un esquema que combina diversas tecnologías, especialmente aquellas vinculadas a la comunicación y al control para transformar la actual red eléctrica en un modelo de generación distribuido, aumentando además su confiabilidad, flexibilidad y disponibilidad, y reduciendo el costo de la energía. Esas metas son importantes en muchas aplicaciones, particularmente en la industria de las TIC (Electroindustria, 2010), donde los aspectos más interesantes y prometedores en

la evolución hacia una red más inteligente son el soporte de flujo de energía bidireccional, la capacidad de interacción directa con el usuario, el desarrollo de sistemas de medición avanzada, la ciber-seguridad y el soporte de carga de automóviles eléctricos y su uso como gran sistema de almacenamiento distribuido.

2.3.1 Generación Distribuida y el Paradigma Bidireccional

Una de las características más importantes que diferencia una red eléctrica inteligente de una tradicional es su capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional, es decir, de pasar del esquema donde el flujo de energía va solo desde las grandes plantas de generación hacia los usuarios finales, particulares o industriales (sección “a” de la figura) a otro que incorpora y aprovecha la capacidad de almacenamiento y generación distribuida, con un rol activo para los usuarios en el que son capaces de proveer energía a otros usuarios (sección b de la figura 1).

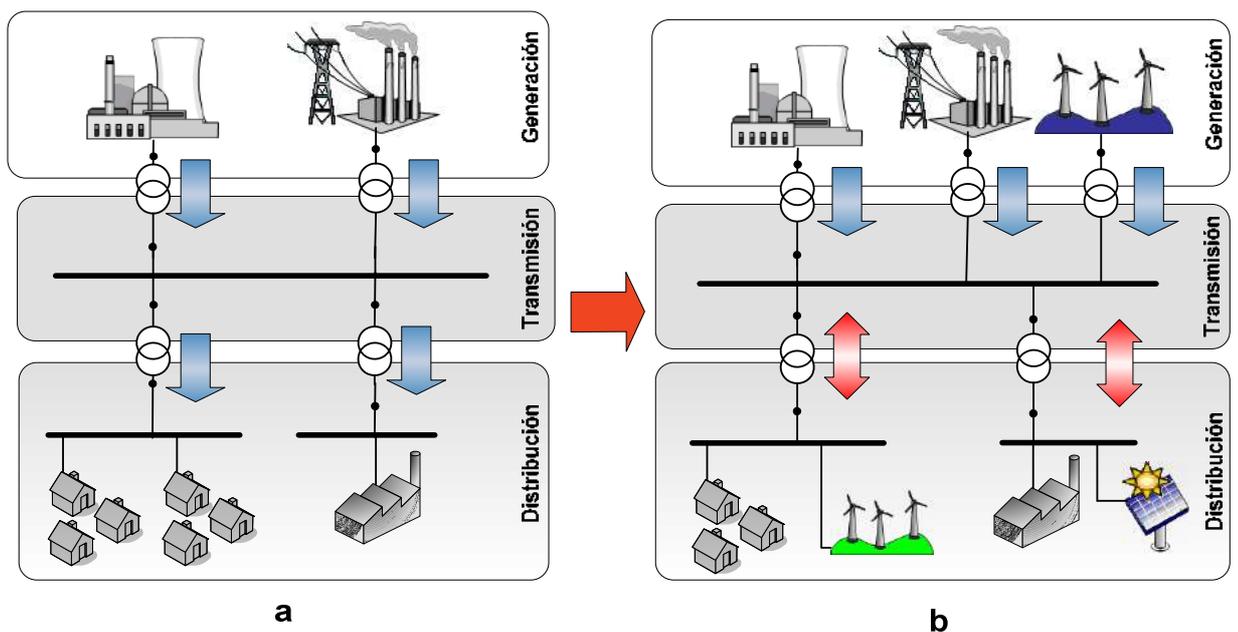


Figura 1 Sistemas de Energía Eléctrica Tradicional (a) y de próxima generación (b)

Además, en un sistema que permita la comunicación bidireccional entre el consumidor final y las compañías eléctricas, la información proporcionada por los consumidores es utilizada por las compañías para permitir una operación más eficiente de la red eléctrica. Así mismo, Verschueren & Haerick, (2010), describe que dicha información permitirá ofrecer nuevos servicios a los clientes de forma

complementaria a la propia energía eléctrica, servicios tales como: monitoreo en línea del consumo –Google Power Meter por ejemplo-, servicios de carga de vehículos eléctricos, negociación de energía con los sistemas de almacenamiento distribuidos y de generación renovable, entre otros. Esa información permitirá ofrecer nuevos servicios a los clientes de forma complementaria a la propia energía eléctrica.

Que los usuarios se conviertan en proveedores es posible gracias al desarrollo de tecnologías de generación de energía renovable como la energía solar fotovoltaica y la eólica –al estar estas pequeñas generadoras integradas a la red de distribución– y a los adelantos de los sistemas de micro almacenamiento residencial distribuido: pequeñas unidades de almacenamiento residencial con capacidad de unos pocos KW/h. (Hussein A. & Harb, A., et al)

Un factor importante a considerar en el diseño de una infraestructura de Smart Grid es la condición intermitente y variable inherente a las fuentes de energía renovable. Su aprovechamiento depende de las condiciones climáticas. Para encarar este desafío, Ipakchi & Farrokh (2009) describen que en la actualidad existen desarrollos y lineamientos de diseño y posibles soluciones junto a la aplicación de herramientas de predicción de condiciones climáticas que permiten la integración y penetración de estas fuentes en la operación de la grilla de potencia.

2.3.2 Interactividad

Históricamente las interacciones del cliente en la gestión de su propio consumo de energía se han limitado al control voluntario de la demanda y a programas de control directo de carga, como por ejemplo, el cambio a bombillos ahorradores o luminarias LED (McNaughton, G. & Saint, R., 2010). Con Smart Grid es posible que los usuarios o dispositivos instalados en el lado del cliente tomen decisiones para controlar la demanda que se adapten mejor a sus necesidades financieras y sociales.

Se estima que tal como ocurrió con Internet la red eléctrica será interactiva tanto para las entidades de generación de energía como para los actores del lado del consumo. En 2020 las empresas de servicios energéticos permitirán a toda persona tener acceso a la prestación de otros servicios tales como la gestión de la demanda. Como efecto de los contadores inteligentes, las tecnologías de control electrónico, los medios modernos de comunicación y la mayor conciencia de los usuarios, la gestión local del consumo electricidad jugará un papel clave en la prestación de nuevos servicios que crearán valor para las partes involucradas (*European SmartGrids Technology Platform [ESTP]*, 2006).

En este contexto, la medición y gestión de los servicios tendrá una consecuencia fundamental en la evolución de la demanda de la energía eléctrica. Por esta razón, elementos tales como los contadores electrónicos, los sistemas de gestión automática de contadores y lo que en principio se denomina las redes HAN (Home Area Network), junto con otros sistemas de comunicación y control que se utilizan en las redes de transmisión y distribución, servirán de apoyo para crear una herramienta valiosa para la integración de los procesos de negocio en la gestión en tiempo real de la cadena de valor entre los stakeholder de Smart Grid.

2.3.3 Advanced Metering Infrastructure (AMI)

La infraestructura de medición avanzada le apuesta a incorporar a los consumidores al sistema eléctrico por medio del despliegue de nuevas redes de comunicaciones y sistemas de base de datos, y proporcionará beneficios importantes tanto a las compañías eléctricas como a los consumidores. AMI consiste en un sistema de comunicación bidireccional que involucra medidores "inteligentes" y otros dispositivos de gestión de la energía. Esto permite a las empresas responder más rápidamente a los posibles problemas, los servicio de conexión/desconexión, y para comunicar en tiempo real los precios de la electricidad, entre otras funciones (Hart, 2008). Las señales de los precios proporcionan a los consumidores incentivos financieros para reducir su consumo de electricidad.

Además, las compañías eléctricas pueden enviar señales de precios a termostatos y electrodomésticos inteligentes para alertar sobre próximos períodos de alto costo. Una opción es que el mismo consumidor determine la respuesta y la acción a tomar, otra que dispositivos inteligentes pueden disminuir el uso de los electrodomésticos hasta que el período de alto costo (hora pico) haya terminado, o cambie el uso automáticamente moviéndolo a períodos de menor costo.

Un elemento importante en la infraestructura AMI es el *Automatic Meter Reading* (AMR). Aunque muchos de estos lectores soportan elementos de Smart Grid, no alcanzan para desarrollar todo su potencial principalmente porque al estar soportados en el estándar ANSI C.12.22, se centran en proporcionar mejoras en la flexibilidad e independencia de diferentes arquitecturas de comunicación de datos de medición, usando la red celular, redes inalámbricas de bandas no licenciadas, líneas de potencia o satélites. Para alcanzar el pleno potencial de Smart Grid, la red de comunicaciones debe ser compatible con los protocolos y aplicaciones de no medición. Por lo tanto, el mayor desafío está en extender por completo IP como protocolo de la capa de unificación de todos los segmentos de Smart Grid incluyendo las redes de AMI y sus dispositivos finales. Estas y otras limitaciones

son tratadas por Flynn (2007). Ambos esquemas, el de generación y el de almacenamiento distribuido, sumados a ciertas capacidades de control, darán acceso a una serie de nuevas funcionalidades, aplicaciones y modelos de negocio que van mucho más allá de la iniciativa actual de algunas empresas del sector energético, que se limitan a reemplazar los contadores en casas y negocios por medidores inteligentes para tareas de monitoreo. Mahmood, Aamir y Anis (2008) describen los lineamientos y técnicas de diseño e implementación de un sistema AMR que provee beneficios importante de monitoreo y control, como esquema inicial de Smart Grid. (Hart, 2008)

2.3.4 Seguridad Cibernética

Como se mencionó, Smart Grid conlleva a la integración de sistemas computacionales, algo que podría traer nuevos riesgos de ciber-seguridad a los sistemas de gestión, generación y distribución de la grilla inteligente.

Según el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, EPRI (2009), uno de los mayores desafíos que enfrenta el desarrollo de redes inteligentes se relaciona con la seguridad cibernética de los sistemas. Según el Informe de EPRI: "La seguridad cibernética es un problema crítico debido a la posibilidad cada vez mayor de ataques cibernéticos y los incidentes críticos en contra de este sector, ya que se vuelve cada vez más interconectado" (Metke & Ekl, 2010, p. 99).

El primer paso hacia la protección de Smart Grid contra las violaciones de seguridad involucra un análisis de riesgos. En una eventual amenaza del sistema de potencia eléctrica, los riesgos más importantes serían la interrupción de la grilla eléctrica, la pérdida de disponibilidad del sistema y la posibilidad de perder el control de ciertos aspectos de la grilla.

Además de enfrentar apagones y pérdida de disponibilidad es necesario considerar las consecuencias de las fallas de la grilla. En el caso de los apagones forzados industrias que emplean procesos continuos, como las refinerías petroquímicas y la manufactura farmacéutica, entre otras, podrían verse muy afectadas. Se pueden presentar también daños en equipos sensibles en situaciones donde la electricidad abastece funciones centrales de ventilación o enfriamiento (Metke & Ekl, 2010).

Otro aspecto de la seguridad cibernética a tener en cuenta es la privacidad de los usuarios. El uso indebido puede llevar a determinar: el equipamiento que existe en un hogar y sus patrones de uso; el número de personas que viven en un hogar y sus costumbres (hora de levantarse y acostarse, comidas, lugares de la vivienda en los que pasan más tiempo); y la presencia de aparatos médicos que permitirían

inferir problemas de salud en los habitantes del hogar (información clasificada con el máximo grado de confidencialidad, de acuerdo a las leyes de protección de datos) (Gómez, 2011).

Así, estos posibles usos no deseados de la información pueden añadir más debate a la cuestión de la privacidad, tema bastante abordado por el uso de Internet, por la existencia de un gran número de empresas que tratan de trazar la actividad de los usuarios mediante técnicas tales como las cookies o el “fingerprinting” de dispositivos (huella única que se puede conseguir mediante el análisis de la información que se envía al visitar una página Web). El tema de la privacidad en las redes eléctricas probablemente se situará a un nivel parecido al de la privacidad en Internet y será objeto de especial atención por parte de los entes reguladores (Katz, 2010). Por ejemplo, agencias como el NIST (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología) han publicado un volumen con recomendaciones sobre privacidad, como parte de un estudio de ciberseguridad en el Smart Grid, donde se recomienda seguir ciertas prácticas que son cada vez más frecuentes en los servicios en Internet.

2.3.5 Vehicle-to Grid (V2G)

El vehículo eléctrico tendrá un papel de mucha importancia en el ecosistema de Smart Grid. Se reconoce como una tecnología que será clave para mejorar la competitividad de la economía al menos por dos vías: el uso más eficiente de la energía y las infraestructuras, y su contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte (Ramos, 2010). Solans (2010)

La tecnología V2G (Vehicle-to-Grid) utiliza la energía almacenada en baterías de vehículos eléctricos, tales como Battery electric vehicle (BEVs) y los plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), para proporcionar electricidad a la red cuando los operadores así lo soliciten (horas pico mayormente). La ventaja de V2G no es solo la reducción en el costo equivalente en la movilidad, sino que también el aumento en la eficiencia y la fiabilidad de la red existente, como efecto de la disminución del uso del petróleo y de la integración de una mayor proporción de energías renovables intermitentes (por ejemplo, eólica, solar) (ZigBee Alliance, 2010).

Por otro lado MITYC, et al, 2010, pg 6 dice: “El vehículo eléctrico, como cualquier nueva tecnología, debe superar ciertas barreras para su introducción, tanto por el desconocimiento de los usuarios de las posibilidades reales y beneficios que le ofrece, como por la necesidad de que la oferta se desarrolle lo más ampliamente posible. Sin lugar a dudas, el vehículo eléctrico o enchufable, habrá de convivir durante muchos años con las actuales tecnologías basadas en el motor de combustión interna.... Así pues, desde el punto de vista de las prestaciones

debemos considerar al vehículo eléctrico con realismo y mesura, ya que no siendo, de momento, una alternativa general al vehículo de combustión interna para cualquier movilidad, sí es adecuado para el ámbito urbano y periurbano.”

Finalmente, cualquier nuevo desarrollo debe mirar hacia delante, prever requisitos futuros y aprovechar las nuevas tecnologías que surjan. Actualmente existe una campaña muy importante para fomentar la adquisición de vehículos eléctricos. Si su implantación masiva se hiciese realidad, como parece que será, la red deberá ser capaz de hacer frente a un enorme incremento de la demanda. Por ello, está previsto que se aprovechen las baterías de los PHEVs como reserva energética para satisfacer picos de consumo muy elevados (Boal, 2010)

2.4 Modelo Conceptual y la interoperabilidad

El acta de Independencia Energética y Seguridad (EISA) de 2007 establece que el National Institute of Standards and Technology (NIST) es el eje para la coordinación y desarrollo de un marco y un modelo para Smart Grid. El Roadmap de NIST (2010) constituye un plan de trabajo para la Interoperabilidad de estándares para Smart Grid. Define un marco conceptual para examinar las necesidades en este ámbito, proporciona una lista de los estándares existentes, orienta la elaboración de las normas que guían las deliberaciones de la industria y establece un conjunto de medidas prioritarias para avanzar en los planes de estandarización del sector y mejorar la interoperabilidad de redes inteligentes.

El modelo conceptual de Smart Grid del NIST es un conjunto de diferentes puntos de vista (diagramas) y descripciones que son la base fundamental para la discusión de las características, usos, comportamientos, interfaces, requisitos y estándares del ámbito de Smart Grid. Cabe resaltar que el modelo no representa la arquitectura final sino que es marco conceptual, una herramienta para describir y discutir el desarrollo de dicha arquitectura.

El modelo conceptual de la Figura 2 (NIST, 2010) permite identificar y debatir los problemas de interoperabilidad para avanzar en la integración. Resalta las áreas clave del problema de interoperabilidad y puede ayudar a resolver problemas de interdependencias en el sistema eléctrico y otras infraestructuras, y además refleja el papel cada vez más importante de la tecnología.

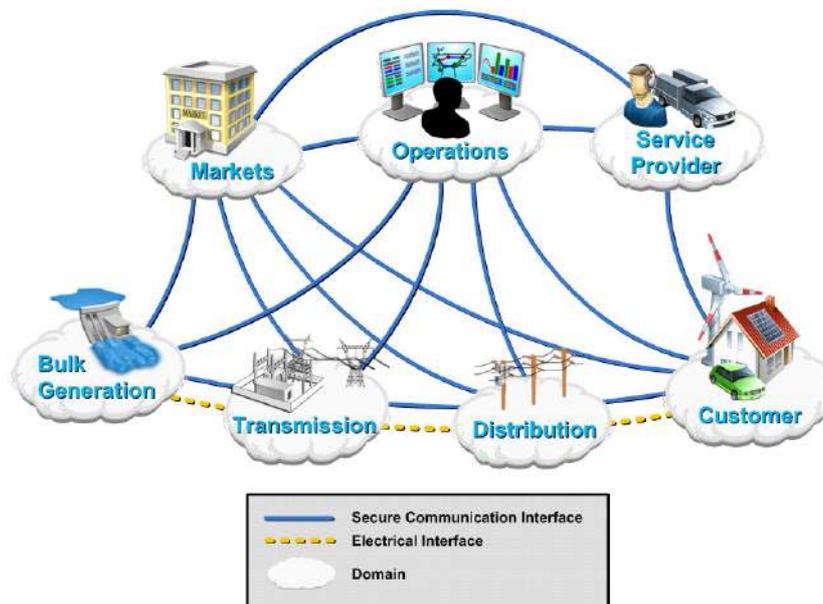


Figura 2 Modelo conceptual del NIST para Smart Grid (NIST, 2010, p.33)

El modelo conceptual se compone de varios *dominios*, cada uno de los cuales contiene aplicaciones y *actores* que están conectados por las *asociaciones*, las mismas que tienen *interfaces* en cada extremo.

En el modelo, los dominios se conectan o interactúan a través de interfaces de carácter eléctrico o conexiones de comunicaciones. En la Figura 2, las interfaces eléctricas se muestran como líneas discontinuas amarillas y las interfaces de comunicación con líneas continuas azules. Cada una de estas interfaces puede ser bidireccional. Las Interfaces de comunicación no representan necesariamente conexiones físicas sino conexiones lógicas de información entre distintos dominios.

En la parte inferior del modelo se identifican las cuatro áreas funcionales en las que tradicionalmente se ha subdividido la red eléctrica: generación, transporte, distribución y consumo, entre las que la energía fluye en un solo sentido, desde el punto de generación hacia el usuario. Sin embargo, gracias a la implantación de los aspectos claves de Smart Grid discutidos en la sección II (paradigma bidireccional, interactividad, la ya importante proliferación de las energías renovables y la prevista de los vehículos eléctricos), el modelo de red se alterará irremediablemente.

El modelo conceptual descrito proporciona una perspectiva global de alto nivel. No es sólo una herramienta para la identificación de actores y posibles vías de comunicación en la red inteligente, sino también una forma útil para la identificación de las interacciones potenciales intra e inter dominio, y las aplicaciones potenciales y capacidades habilitadas por estas interacciones. Por otro lado, el diagrama de referencia conceptual del NIST (Figura 3) tiene la

intención de ayudar en el análisis, no es un esquema de diseño que define una solución y su implementación. En otras palabras, el modelo conceptual es solo descriptivo. Su propósito es fomentar la comprensión de las complejidades operativas de Smart Grid, pero no determinar la forma cómo la red inteligente se llevará a cabo.

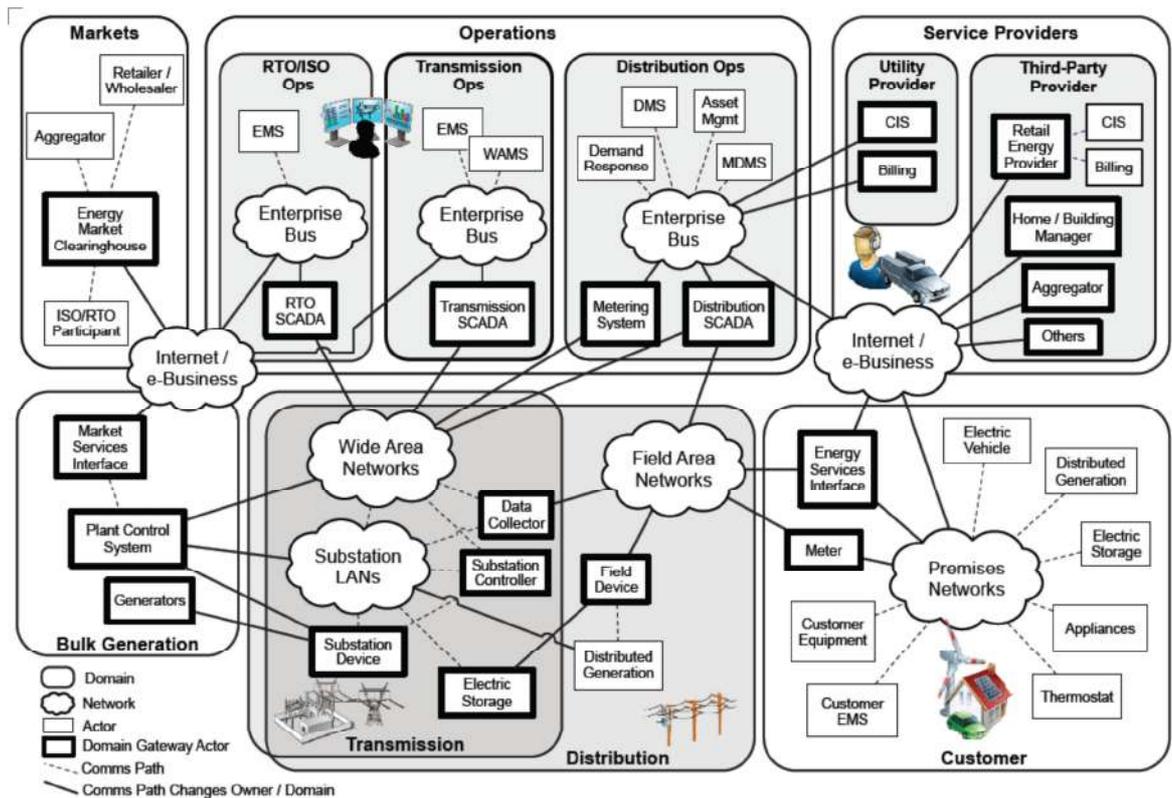


Figura 3 NIST Interoperability Roadmap Conceptual Reference Diagram (NIST, 2010, p.35)

El diagrama muestra una visión particular de cómo iniciar el abordaje del problema de integración de los siete dominios del modelo conceptual. En él, a través de algunos módulos Gateway y tecnologías de comunicación identificadas inicialmente se conectan una serie de redes o núcleos de información generados o solicitados por los actores o Stakeholder del sistema.

2.5 Diseño de la Arquitectura de Smart Grid

Aunque la generación y el transporte convencionales siguen existiendo en este nuevo modelo, las redes eléctricas se están transformando en millones de nodos interconectados. Una proporción de la electricidad generada en las plantas convencionales será reemplazada por la generación distribuida, las fuentes renovables, la gestión activa de la demanda y los sistemas de almacenamiento. Y los usuarios pasarán de ser simples receptores pasivos de electricidad a convertirse, al mismo tiempo, en fuentes y sumideros de energía (Boal, 2010).

Es importante enfatizar el papel que están llamadas a desempeñar las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) para adaptar la red eléctrica. Como se mencionó, para 2020 deberá ser interactiva, siguiendo el modelo de Internet, tanto para la generación como para las cargas. La toma de decisiones dejará de estar centralizada y se establecerá un control distribuido a través de los nodos dispersos del sistema, que hará que la información circule de forma bidireccional (Boal, 2010).

De acuerdo a lo expuesto, la red inteligente puede ser vista como una gran sistema de sistemas, donde se puede expandir cada uno de los siete dominios definidos por el NIST (Figura 2) a tres áreas fundamentales: la capa del sistema de potencia y energía, la capa de comunicación y la capa de TI.

El desarrollo de estas dos últimas capas permite a la capa de potencia y energía convertirse en "más inteligente". Sonoma Innovation (2009) propone una metodología de diseño de 4 niveles (ver Figura 4), donde en los dos primeros se encuentran precisamente el modelo conceptual y el marco arquitectónico del NIST descrito en el apartado anterior. De los bloques del marco de interoperabilidad para Smart Grid (nivel2) se desprende el nivel 3, en el que se identifican sus tres áreas fundamentales: el sistema de energía y potencia, la arquitectura de comunicaciones y la arquitectura de TI. Cabe resaltar que esta visión no es la única ni definitiva.

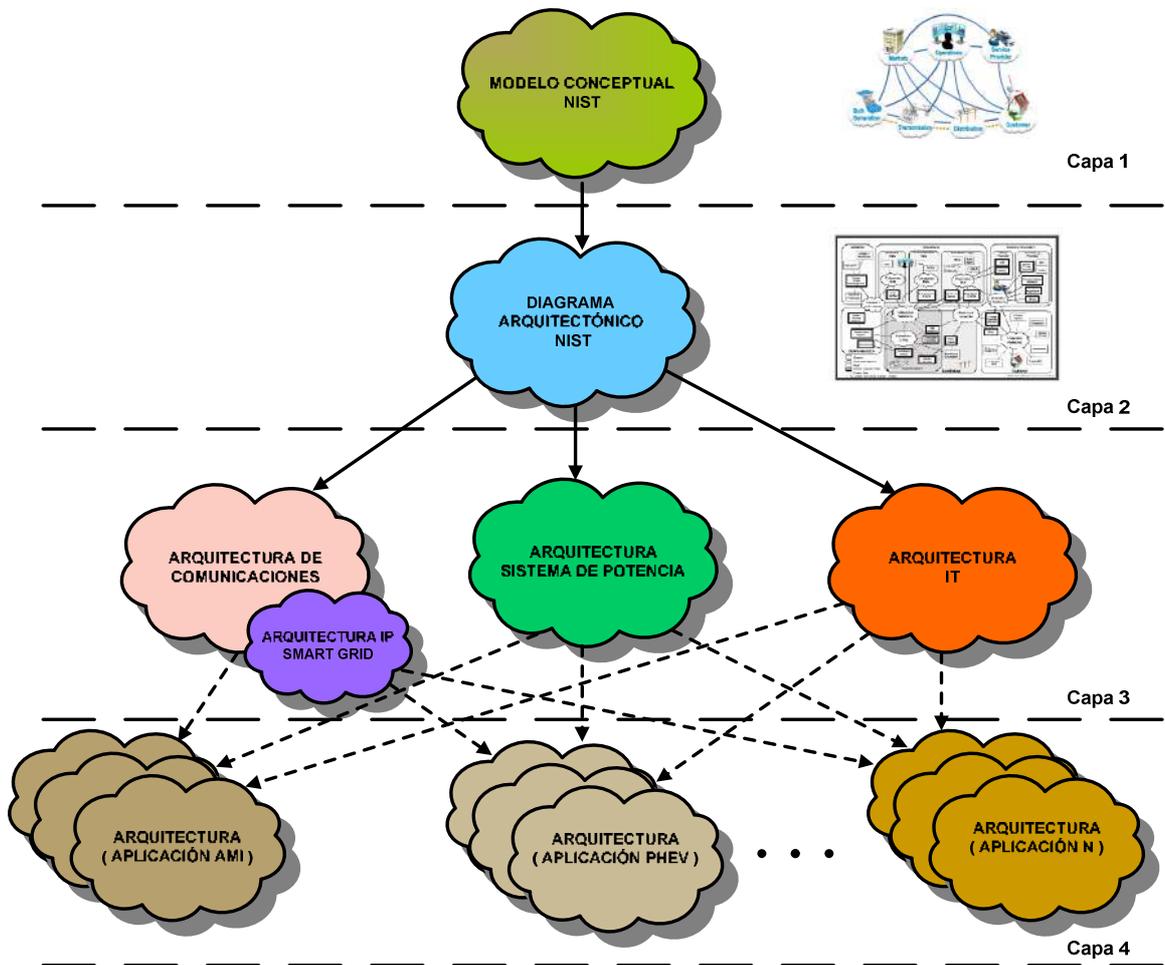


Figura 4 Modelo de 4 niveles para la implantación de Smart Grid. (Imagen adaptada de Sonoma 2009b)

El marco conceptual del NIST se sitúa en un nivel más alto y amplio y proporciona el contexto para los aspectos técnicos más detallados de la interoperabilidad, el diseño de modelos y el mapeo de requerimientos de una determinada familia de soluciones basadas en los estándares y criterios técnicos. Finalmente una solución manifiesta un diseño en un proveedor de software de tecnología en particular, asegurar la evaluación de los diseños, modelos y marcos (GridWise Architecture Council [GridWise], 2008). Según Basso & DeBlasio, [s/f] en el informe del NIST, se ha identificado en los planes de acción prioritarios al estándar IEEE P2030 –que se centra principalmente en la interoperabilidad de Smart Grid– y a la serie de estándares IEEE 1547 –encargada de la interconexión de los recursos distribuidos con la grilla eléctrica–. En Basso (2011) se describe los principios de diseño para la interconexión e interoperabilidad de dichos estándares de la IEEE.

Basso [2009] y en IEEE [2011] que es el Draft más reciente de la guía para la interoperabilidad de Smart Grid, proporcionan una base de conocimiento respecto a la terminología, las características, el desempeño funcional, los criterios de evaluación y la aplicación de los principios de ingeniería para la interoperabilidad Smart Grid. Incluye la integración al sistema de energía de las TIC que son necesarias para lograr un funcionamiento confiable para la generación y distribución de energía y aplicaciones de usuario final, que permitirá en últimas el flujo bidireccional de energía e integración de fuentes de energía renovable con la respectiva comunicación y control [Basso, 2009] e [IEEE, 2011].

2.6 Arquitectura de Comunicaciones de Smart Grid

En esta sección se propone un marco para la arquitectura de comunicaciones de Smart Grid con sus segmentos clave y elementos constitutivos. Es un refinamiento del modelo de cuatro niveles (ver Figura 4). Su arquitectura se define en el nivel inferior. La Figura 5 muestra los componentes básicos de un sistema de comunicaciones de extremo a extremo e incluye la terminología utilizada para definir los múltiples segmentos de red y los puntos de demarcación (límites), que tienen un rol clave para una adecuada interoperabilidad, la definición de acuerdos de nivel de servicio (SLA) y el cumplimiento de métricas de rendimiento de las mismas interfaces. Esta segmentación y la demarcación ofrecen un enfoque modular y flexible que permite definir los segmentos de interoperabilidad, las interfaces y los elementos para la gestión y operación, con base en las mejores prácticas de la industria de telecomunicaciones y energía.

En el caso específico de la arquitectura de comunicaciones que muestra la figura 5, Smart Grid es un sistema de sistemas que combina una gran variedad de tecnologías, donde dichos subsistemas requieren interfaces bien definidas y armonizadas con los estándares existentes. Se propone una arquitectura que utiliza IP como protocolo unificador de múltiples protocolos, intra e inter-dominios. En la misma figura se presenta una segmentación en diferentes tipos de redes, a su vez contrastada con los dominios del sistema de potencia (generación, transmisión y distribución).

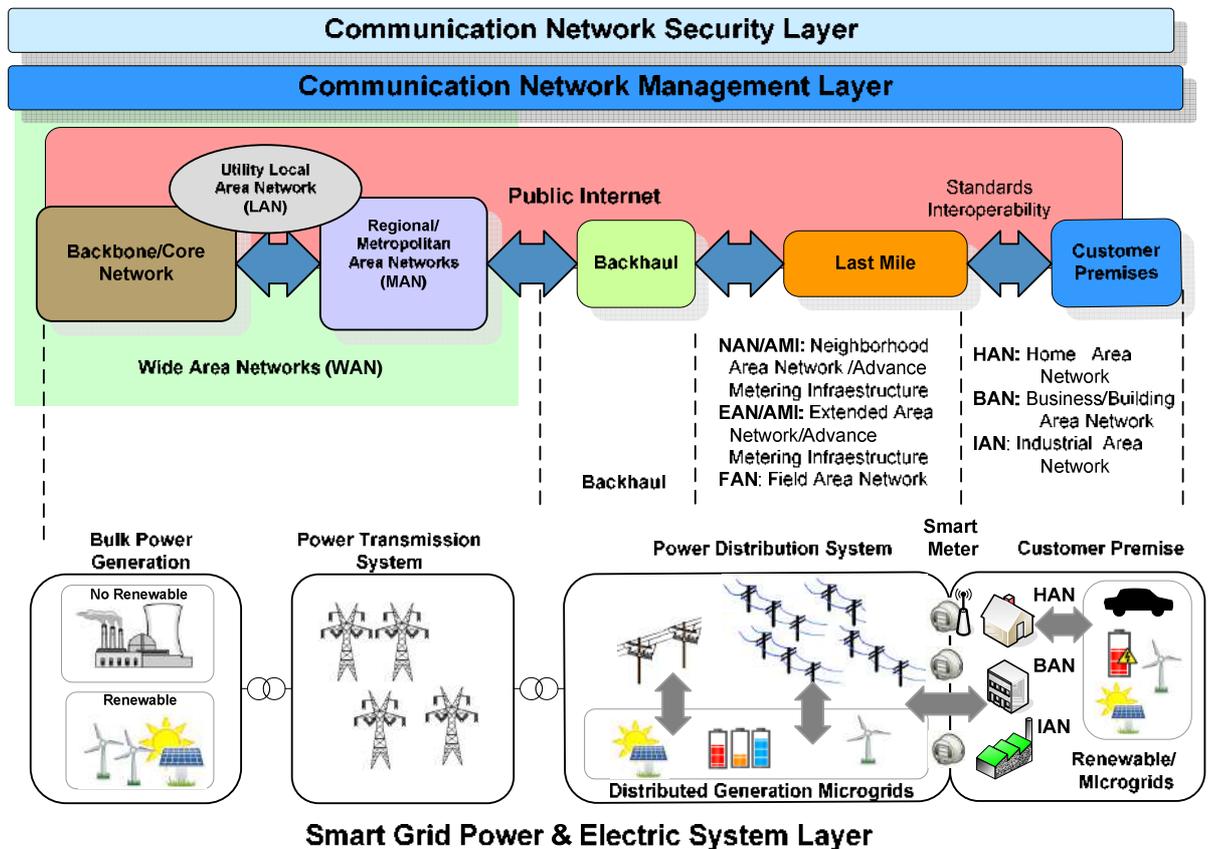


Figura 5 Infraestructura de Comunicaciones para Smart Grid (Imagen adapta de Sonoma 2009³)

Los elementos básicos de esta arquitectura de comunicaciones son:

Customer Premise. Una vivienda individual, un edificio y una empresa, requiere respectivamente una HAN (Home Area Network), una BAN (Building Area Network) o una IAN (Industrial Area Network). Bajo el título de HAN se agrupan las tres. Una HAN es una red de comunicaciones de corto alcance que conecta electrodomésticos y otros dispositivos en el entorno de una vivienda o edificio. Al combinar las HAN con la infraestructura AMI: los consumidores podrán monitorizar su uso de energía a través de pantallas instaladas en sus hogares o programar sus termostatos o sistema de aire acondicionado en función del precio de la energía, y a las compañías se les garantizará el acceso directo a las cargas, lo que les permitirá gestionar de forma más eficiente su demanda. Estas redes también están conectadas a otros elementos auxiliares del cliente como los PEV (Plug-In Electric Vehicle), fuentes de energía renovable (solar / eólica) y dispositivos de almacenamiento.

Última milla (*last mile*). Son redes de comunicaciones de dos vías tanto inalámbricas como cableadas superpuestas al sistema de distribución de energía. Torchia (2011) señala que una parte integral del éxito de Smart Grid estará determinado por la capacidad de la red de distribución para soportar cambios en los procesos de negocio que resultan de metas como la eficiencia energética, la respuesta de la demanda, de las exigencias regulatorias, así como de la posibilidad de integración de recursos distribuidos. El autor entrega una lista de 10 consideraciones para seleccionar una red de área de distribución para Smart Grid.

Dentro del segmento de última milla se pueden definir las redes NAN y FAN o la infraestructura AMI, dependiendo de las características del sistema de red del proveedor de servicios, el tipo de servicios ofrecidos, la topología de red, la demografía y la tecnología utilizada por el proveedor. Una NAN proporciona cobertura en un área geográfica limitada, que habitualmente se extiende por varios edificios.

Backhaul. Es el sistema que conecta la red WAN a la red de última milla. Agrega y transporta datos de la red de telemetría de los usuarios finales, parámetros críticos de control de las subestaciones e información de campo de los dispositivos de la red de distribución.

Wide Area Networks (WAN). Cubren áreas más amplias y por lo general integran varias redes de menor tamaño, que usan diferentes sistemas de comunicación (Lima, 2011; Trilliant, 2009). Se componen de la red de núcleo o red troncal y de la red de área metropolitana (MAN), que en conjunto conectan la mayoría de los servicios de las redes troncales de los distintos proveedores de servicio, a lo largo de las líneas de transmisión eléctrica de alta potencia –o usando radio enlaces–. La elección de una u otra tecnología depende de factores como la confiabilidad, el costo, la seguridad y la infraestructura disponible.

2.7 El valor de la red HAN para Smart Grid

Las redes HAN juegan un papel importante en el logro de estos objetivos de Smart Grid, ya que permitirá ampliar las capacidades de la red inteligente dentro del hogar. En este aspecto la red HAN sería la columna vertebral de la comunicación entre los medidores inteligentes y aparatos electrodomésticos, ayudando a desarrollar la respuesta a la demanda y gestión de la demanda en el lado de los usuarios. También están estrechamente relacionados al desarrollo de las redes HAN, la integración de fuentes de energía renovables como los sistemas fotovoltaicos PV y eólicos.

Los edificios y hogares tienen una participación importante en el futuro de Smart Grid ya que representan alrededor del 70% del consumo de la electricidad generada [Facility Interface to the Smart Grid]. El resto se distribuye

principalmente en el sector industrial. Una de las bases que justifica la implementación de la red inteligente es el hecho de que si el sistema provee información detallada sobre el consumo eléctrico a los hogares en tiempo real y propone un patrón de consumo que ahorre dinero, los hogares posiblemente lo implementarán. De esta forma, los usuarios pagarían menos y las empresas, podrían reducir el uso de plantas de generación adicionales basadas en combustibles fósiles, en horas pico de demanda [Holmberg, s.f].

La Figura 6 proporciona una descripción de alto nivel del ecosistema de Smart Grid. Su objetivo es garantizar una adecuada interoperabilidad entre todos los dominios, específicamente entre los sistemas de información y las tecnologías de comunicaciones, de manera que todos los stakeholders (proveedores de servicios públicos, clientes, entes reguladores, etc.) puedan interactuar con el sistema y participar en el cumplimiento de las metas sociales y de negocio propuestas alrededor de la grilla inteligente. Para garantizar dicha participación, se parte de la red HAN en la que los consumidores podrán instalar monitores y controles, y en la que, a través de la red del proveedor de servicios de energía, formada por infraestructura de comunicaciones y de potencia, se accede a las aplicaciones de los proveedores de servicios. Cada uno de los dominios representa una zona de interoperabilidad donde puede haber estándares o tecnologías que compitan entre sí o sean complementarias.

Según Chandy, Gooding & McDonald(2010) y como también lo muestra la figura 6, la arquitectura actual de la red eléctrica puede ser vista como un sistema de sistemas caracterizada por un conjunto de silos. Es decir que las diferentes funciones de la red, tales como la facturación, distribución y medición de energía, utilizan diferentes silos de información que están integrados por una fina capa de TI. El mismo autor asegura que para que las soluciones Smart Grid se integren exitosamente, se debe realizar una transición de las arquitecturas actuales (silos) a una basada en estándares ampliamente adoptados, en servicios comunes y sistemas débilmente acoplados. En los cuatro patrones arquitectónicos propuestos en dicho trabajo, se analizan las ventajas y los riesgos de cada uno de ellos y resalta que cada transición de un modelo arquitectónico a otro tiene costos elevados, lleva tiempo y requiere decisiones estratégicas de diseño tanto en la red eléctrica como la arquitectura de TI y comunicaciones.

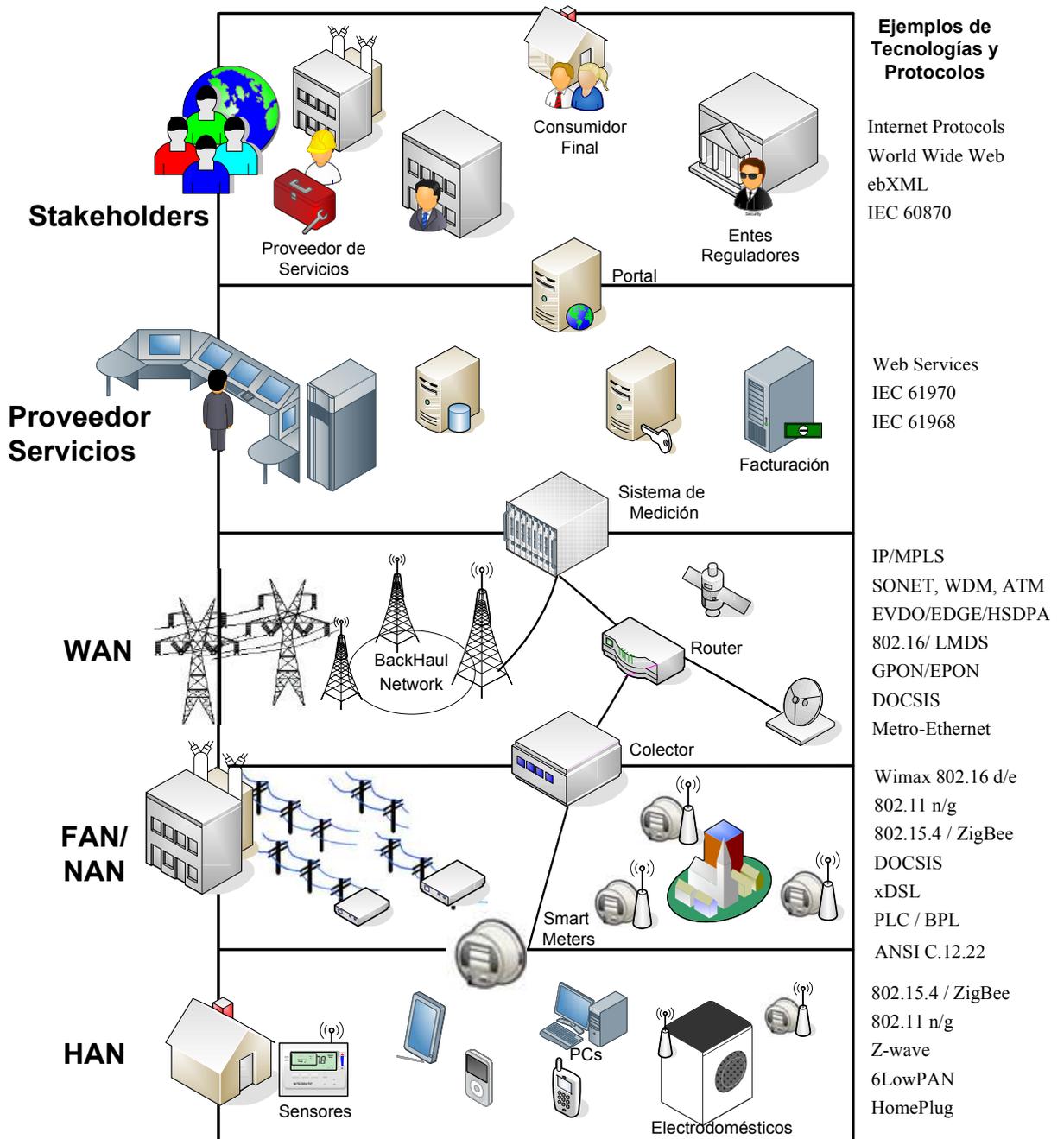


Figura 6 Mapeo de estándares y tecnologías a varios segmentos de Smart Grid. (Imagen adaptada de Gunther et al, 2009)

La figura 6 muestra además un mapeo de los diferentes estándares y las tecnologías provistas para cada tipo de redes de comunicaciones identificada en el

entorno de Smart Grid. De ellas, los stakeholder –y más propiamente las compañías del sector energético– probablemente optarán por instalar varias, para de esa manera estar en capacidad de enfrentar diferentes dificultades geográficas, distintas densidades de población y diferentes requerimientos de ancho de banda y tiempos de respuesta, por ejemplo. De Craemer & Deconinck (s/f) propone una arquitectura de comunicaciones para Smart Grid y realiza un breve análisis de cada estándar disponible junto con los criterios para su selección y ubicación en el modelo OSI.

En Díaz (s.f) y Katz J. (2010b) los autores muestran como las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) son necesarias para desarrollo del negocio energético. Uno de los requisitos fundamentales para la implementación de una red inteligente es poseer y gestionar en tiempo real un gran volumen de información del estado de la generación y del estado de la red de transporte/distribución, así como de los usuarios finales. Esto tiene implícita la necesidad de disponer de una infraestructura de TIC escalable, confiable y segura. Se discute sobre la integración y la consolidación de aspectos tales como: la generación y el almacenamiento distribuidos; el smart metering y la información de consumo en tiempo real (AMI); los modelos de negocio *Time of use* (TOU) y *Dinamic pricing*; la instalación de *Energy management systems* (EMS) tanto en hogares, como en locales comerciales e industriales; la integración de vehículos eléctricos (V2G); la sensorización y controles autónomos, la ciberseguridad. Ngan HW (2008) plantea la inteligencia de negocio (business intelligence) como una pieza clave para el análisis de datos del sistema distribuido e interpretación de la red eléctrica al extraer información útil que constituya un puente entre las TI y las operaciones. Ngan plantea además cuatro atributos claves de Smart Grid: tolerancia a fallos y lo que se conoce como ‘self-healing’, seguridad ante amenazas físicas y cibernéticas, debe soportar un amplio rango de fuentes de generación distribuida y finalmente facilitar al usuario final un mejor control del consumo de energía y capacidad de la red HAN de interactuar con el sistema de gestión de energía de las empresas de servicio. Todo alrededor de las funciones y los dominios de la Smart Grid.

2.8 Principios Arquitectónicos de las redes HAN

Desde el punto de vista del marco de referencia conceptual del NIST [NIST, 2009], La PAN (Premises Area Network) es considerada un subsistema dentro de Smart Grid que implementa la red del cliente. En la figura 7 se muestran los componentes propuestos por el NIST para el dominio del cliente. Dichos componentes son principalmente: el medidor inteligente (smart meter), Interfaces de Servicios de Energía (ESI – Electric Services Interfaces), Sistema de Gestión de Energía (EMS, Energy Management System), Equipos del cliente (Customer

Equipment), Almacenamiento y Generación distribuida (Distributed Generation /Storage), Vehículos Eléctricos (Electric Vehicle), Electrodomésticos (Appliances) y sistema PCT (Programmable Controller Thermostat).

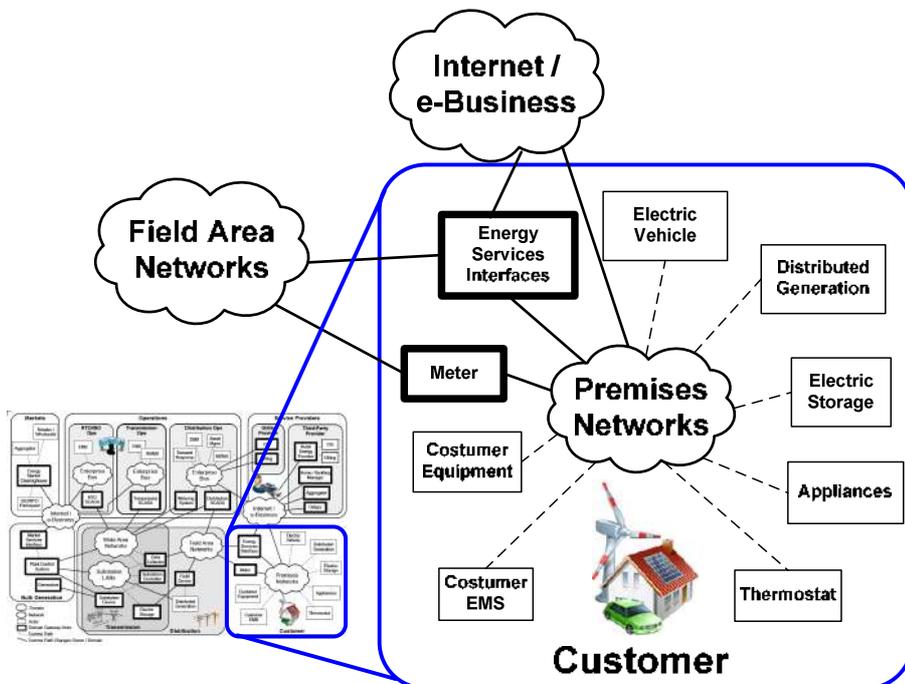


Figura 7 Dominio del Cliente, componentes de la red HAN/PAN.

La figura 7 muestra además las posibles rutas de flujos de información de la PAN (Premises Area network) a otros dominios. Dado que este trabajo está enfocado únicamente a clientes residenciales, se utilizará el término Home Area Network en el lugar del término más general Premises área network. La figura muestra que hay dos posibles rutas de acceso de información desde un cliente HAN a la empresa de servicios: una directamente a través de una FAN (Field Area Network) que probablemente será la infraestructura de medición AMI, y la otra sobre un enlace de Internet, posiblemente a través de un proveedor ISP.

A continuación se describe cada uno de los componentes de la HAN identificados en el marco conceptual del NIST:

2.8.1 Interfaz de Servicios de Energía (ESI)

La interfaz de servicios de la Energía (ESI) es un tipo especial de dispositivo dentro de la red HAN. El ESI se enfoca en la red y también puede ser pensado

como un gateway. El ESI proporciona una ruta segura entre las redes HAN en las instalaciones del usuario y la red de servicios públicos. Como tal, tiene otros requerimientos únicos que no se aplican a otros dispositivos lógicos. Permite aplicaciones como el control remoto de carga, seguimiento y control de la generación distribuida, visualización del consumo de los clientes dentro del hogar, lectura de los medidores no eléctricos, y la integración con la construcción de sistemas de gestión. También presta servicios de auditoría y funciones de logueo que registra las transacciones desde y hacia dispositivos de la red HAN. [Open Smart Grid (OpenSG) Technical Committee of the UCA International Users Group, 2010]

2.8.2 Medidor Inteligente (Smart Meter)

Un medidor inteligente es un dispositivo con capacidad de comunicación que mide la energía, el agua o el consumo de gas natural de un edificio o casa. Mientras que los medidores tradicionales sólo miden el consumo total, los medidores inteligentes registran los eventos, perfiles de carga y precios en la red y transmiten los datos e informaciones por medio de redes FAN, Internet o redes similares. Los clientes pueden comprobar el uso que han hecho de la electricidad y controlar su consumo. Con un sistema de medidores inteligentes, los usuarios indican la cantidad que están dispuestos a pagar en las facturas y el mismo sistema les indica cuanta electricidad pueden consumir. El sistema tiene en cuenta incluso los dispositivos que tienen un mayor consumo de electricidad, como la calefacción y los aires acondicionados y ajusta los termostatos como consecuencia. [Fujii & Romero, 2007]

Además, - de interactuar con los dispositivos compatibles con las redes HAN y permitir que los consumidores pueden gestionar mejor su consumo eléctrico, los medidores inteligentes también soportan: [Energy retail Association, 2007]

- Tarifas flexibles de acuerdo al consumo en períodos establecidos de tiempo.
- Capacidad para medir la energía que vende el usuario al proveedor, dicha energía de exceso es propiciada por las tecnologías de microgeneración (por ejemplo, paneles solares o turbinas eólicas).
- Se utilizará el mismo medidor de electricidad para todos los tipos clientes, ya sean de prepago o de crédito y con independencia del proveedor.

- Mejora de la precisión de la predicción de la demanda de energía en diferentes momentos del día.

2.8.3 Equipos del Cliente (Customer Equipment)

Los dispositivos de los clientes interactúan con contadores inteligentes para proporcionar información que permite a los clientes y empresas de servicios públicos administrar el uso de energía. Entre los dispositivos desplegados en las instalaciones del cliente se encuentran: In Home Display (IHD), Dispositivo de gestión de energía, Dispositivos de control de carga directa y Electrodomésticos inteligentes. [SmartGrid.gov, s.f]

2.8.4 Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System - EMS)

El EMS es un sistema central para gestionar el consumo de energía del cliente. Puede ser programado para tomar decisiones basándose en los precios o en los mensajes de eventos de la empresa de servicios públicos y en los cambios en la misma carga del cliente. Proporciona información a la empresa de servicios y realiza ajustes en respuesta a los cambios del mercado y en las condiciones del sistema de potencia. [Edison SmartConnect, 2009]

Utilizando el sistema, la empresa de servicios públicos es capaz de enviar mensajes tales como alertas o sugerencias de ahorro de energía, interrupciones planificadas, uso de energía y las tarifas, y otra información relacionada con la energía. Esta información puede provenir de dos fuentes: el sistema de comunicación de la empresa de servicios del cliente o directamente desde el medidor. [Edison SmartConnect, 2009]

2.8.5 Generación Distribuida (*Distributed Generación - DG*)

La generación distribuida significa que la electricidad se produce cerca de su punto de uso. DG no necesita nuevas líneas de transmisión y pone énfasis en la electricidad generada localmente. DG se puede implementar en las zonas urbanas o zonas rurales y depende de fuentes limpias y renovables de energía como la solar y la eólica. DG convierte a los consumidores en productores. También permite a los consumidores comerciales, industriales, residenciales generar electricidad y vender el excedente a sus empresas de servicios públicos locales. Las tecnologías utilizadas en la generación distribuida a veces se refieren como recursos energéticos distribuidos. DG también se conoce como energía descentralizada. [Hertzloc, 2010]

2.8.6 Almacenamiento de Energía Distribuida.

A diferencia del gas natural o los combustibles fósiles, la electricidad no puede almacenarse fácilmente. Sin embargo, el interés en el almacenamiento de energía eléctrica (Electric Power Storage - EPS) ha ido creciendo con los avances tecnológicos que pueden hacer del almacenamiento, un medio más práctico para la integración de la energía renovable en la red eléctrica y la consecución de otros beneficios operativos.

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden ayudar a equilibrar la generación inherentemente variable de las fuentes renovables y que adecuadamente implementados e integrados, pueden ayudar a aumentar la confiabilidad de la red eléctrica y mejorar el desempeño.

Paradójicamente, el almacenamiento de la electricidad por lo general no implica el almacenamiento de la energía eléctrica en sí. Por el contrario, el dispositivo de almacenamiento convierte la electricidad en otra forma, tales como la energía cinética o energía potencial del agua que se ha bombeado a una mayor altura y que luego convierte nuevamente en electricidad. Con la excepción de

almacenamiento de bombeo hidroeléctrico, las tecnologías EPS se encuentran todavía en diversas etapas de desarrollo.

Las instalaciones de almacenamiento pueden estar situadas en plantas de generación, en los sistemas de transmisión o distribución de energía, o en las instalaciones del usuario final. Las instalaciones suelen ser pequeñas, pero esto puede cambiar a medida que las tecnologías vayan madurando. [Kaplan, 2009]

2.8.7 Electrodomésticos Inteligentes (Smart Appliances)

Los hogares inteligentes tendrán una amplia gama de dispositivos inteligentes. Además de los contadores inteligentes, también se incluyen electrodomésticos inteligentes (refrigeradores, congeladores, lavadoras y secadoras de ropa), unidades de aire acondicionado, termostatos, fuentes de energía distribuida y vehículos eléctricos. Todos estos dispositivos tendrán comunicación de dos vías, y serán capaces de transmitir y recibir información desde y hacia el sistema de gestión de la empresa de servicios públicos. Esto permitirá una mayor adopción de los programas de respuesta a la demanda para reducir el consumo de energía. Por ejemplo, un dispositivo en la red puede ser apagado en las horas pico, en respuesta a los ajustes introducidos por el consumidor o por la empresa de servicios públicos. Los dispositivos inteligentes también pueden operar en conjunto con precios de tiempo de uso adoptado por empresas de servicios públicos, para operar en el momento más económico para el usuario.

En el hogar los dispositivos y electrodomésticos ya están conectados a través de redes HAN. Los dispositivos tales como termostatos inteligentes pueden compartir información con los medidores inteligentes de la casa y con los IHD (In-Home Display) para proporcionar los consumidores información del consumo de energía actualizado. [Dicks, 2011]

2.9 Iniciativas de Desarrollo de Smart Grid en el mundo

En la actualidad hay muchas actividades en paralelo relacionadas con la estandarización de redes smart grid. Dado que estas actividades son relevantes para el mismo tema, es inevitable cierto traslape y duplicación de ellas. Existen varios organismos de desarrollo y estandarización, entre ellos:

IEC Smart Grid Strategy Group. La International Electrotechnical Commission (IEC) es el punto focal natural para la industria eléctrica. Tiene como objetivo proporcionar una fuente de referencia única para la gran cantidad de proyectos de Smart Grid que se están poniendo en marcha en todo el mundo. Ha desarrollado un marco para la estandarización que incluye protocolos y estándares de referencia para lograr la interoperabilidad de los sistemas y dispositivos Smart Grid (Boswarthick et al., 2010).

National Institute of Standards and Technology (NIST). No es un cuerpo de estandarización en sí mismo, sino que ha recibido la designación del gobierno de los Estados Unidos para gestionar el proyecto de selección de un conjunto de estándares para la red Smart Grid de ese país (NIST, 2010)

EU Commission Task Force for Smart Grids. Su misión es asistir a la Comisión Europea en las políticas y directrices de la reglamentación a nivel europeo y coordinar los primeros pasos hacia la implementación de smart grid en la prestación del tercer paquete energético. (EU Commission Task Force for Smart Grids [EC], s.f)

IEEE P2030. Es un grupo de trabajo de la IEEE para el desarrollo de una guía para la interoperabilidad de Smart Grid en la operación de las tecnologías energéticas y tecnología de la Información con el sistema de energía eléctrica (EPS) y las cargas y aplicaciones de usuario final (Boswarthick et al., 2010).

Muchos proyectos de demostración están actualmente en marcha y algunos resultados están disponibles (EC, s.f). Las iniciativas más representativas en el campo de Smart Grid, están presentes en Estados Unidos, Europa, Japón y China.

2.11 Definiciones

In Home Display (IHD)	Un dispositivo de visualización diseñado para ofrecer la información relacionada con la entrega de energía, tales como el consumo, precios o mensajes de servicio de una empresa de servicios públicos o de otros proveedores de servicios de energía a un cliente residencial. Estos dispositivos también pueden permitir la comunicación de información de los clientes de vuelta a la empresa de servicios o el proveedor de servicios energéticos.
Dispositivo de gestión de energía	Un dispositivo que puede controlar otros dispositivos de energía, tales como termostatos, iluminación, dispositivos de control directo de carga, o de los recursos energéticos distribuidos dentro de las instalaciones del cliente. Estos dispositivos también pueden recibir señales de información o de control de servicios públicos o de otros proveedores de servicios energéticos. Estos dispositivos pueden ayudar a los clientes a administrar el consumo de electricidad de forma automática mediante la utilización de la información de los proveedores de servicios o de las preferencias establecidas por el cliente.
Dispositivos de control de carga directa	Un interruptor de control remoto que puede cambiar la potencia de una carga o apagar o encender un electrodoméstico. Tal dispositivo también podría ser utilizado para regular la cantidad de energía que una carga puede consumir. Los dispositivos de control de carga directa pueden ser operados por una empresa de servicios públicos o de otros proveedores de energía para reducir la demanda de energía de un cliente en determinados momentos.
PCT Programmable Communicating Thermostat	Termostatos con capacidades de comunicación. La comunicación permite enviar mensajes a los termostatos para modificar de forma remota los puntos de temperatura y el consumo de la carga.
Electrodomésticos inteligentes (Smart Appliances)	Un aparato que incorpora inteligencia y comunicaciones para permitir el control automático o remoto basado en las preferencias del usuario o en señales externas de una empresa de servicios públicos o de otros proveedores de servicios energéticos. [SmartGrid.gov_IAM y las inversiones del cliente del sistema de activos.

Tabla 2 Definiciones

Capítulo 3: Especificación de Requerimientos y Diseño del Sistema.

Para la definición de la arquitectura del sistema tele informático de una red HAN, se aplica principalmente dos metodologías. Primero se realiza la especificación de requerimientos (SRS por sus siglas en inglés) para redes HAN, que está organizado a su vez de acuerdo al estándar IEEE 830 (1998) de Prácticas recomendadas para especificación de requerimientos de software pero enfocado en aplicaciones de redes HAN. Y la segunda metodología se basa en el resultado del SRS para luego hacer una partición y definir los componentes del sistema y sus relaciones, para esta terea se usa la metodología de análisis de Dorfman. En resumen las secciones que se incluyen son:

Este capítulo de especificación de requerimientos SRS para redes HAN está organizado de acuerdo al estándar IEEE 830 (1998) de Prácticas recomendadas para especificación de Requerimientos de software pero enfocado en aplicaciones de redes HAN. Las secciones que se incluyen son:

Sección 1 - Introducción: En esta sección se proporciona una introducción a todo el capítulo de Especificación de Requerimientos de Sistema (ERS). Consta de varias subsecciones: propósito, alcance, definiciones, referencias, guías de desarrollo y una visión general del capítulo.

Sección 2 - Descripción general: describe los elementos y los principios clave del ecosistema de Smart Grid que afectan en el desarrollo de la red HAN y sus consideraciones arquitectónicas.

Sección 3 - Requerimientos y diseño del sistema: Primero se da un contexto para el listado de todos los Requerimientos del sistema HAN organizados categóricamente, y luego se identifican los componentes funcionales (hardware, software e interconectividad) de la arquitectura usando el análisis de Dorfman.

Sección 4 – Propuesta de la arquitectura de la red HAN.

3.1 Introducción

El diagrama Conceptual de referencia del NIST como se mencionó anteriormente en el marco conceptual del capítulo 2, es un conjunto de diferentes puntos de vista y descripciones que son la base fundamental para la discusión de los usos, comportamientos, interfaces, requerimientos y estándares del ámbito de Smart

Grid. El modelo representa una herramienta para describir y discutir el desarrollo de la arquitectura. Dicho modelo de referencia indica los flujos de información conceptuales entre los diferentes dominios, en donde se encuentran incluidos los clientes, mercados, proveedores de servicios, Operaciones, Generación en masa, Transmisión y Distribución. El recuadro azul representa el dominio en el cual se enfocará este capítulo para la especificación de requerimientos para redes HAN.

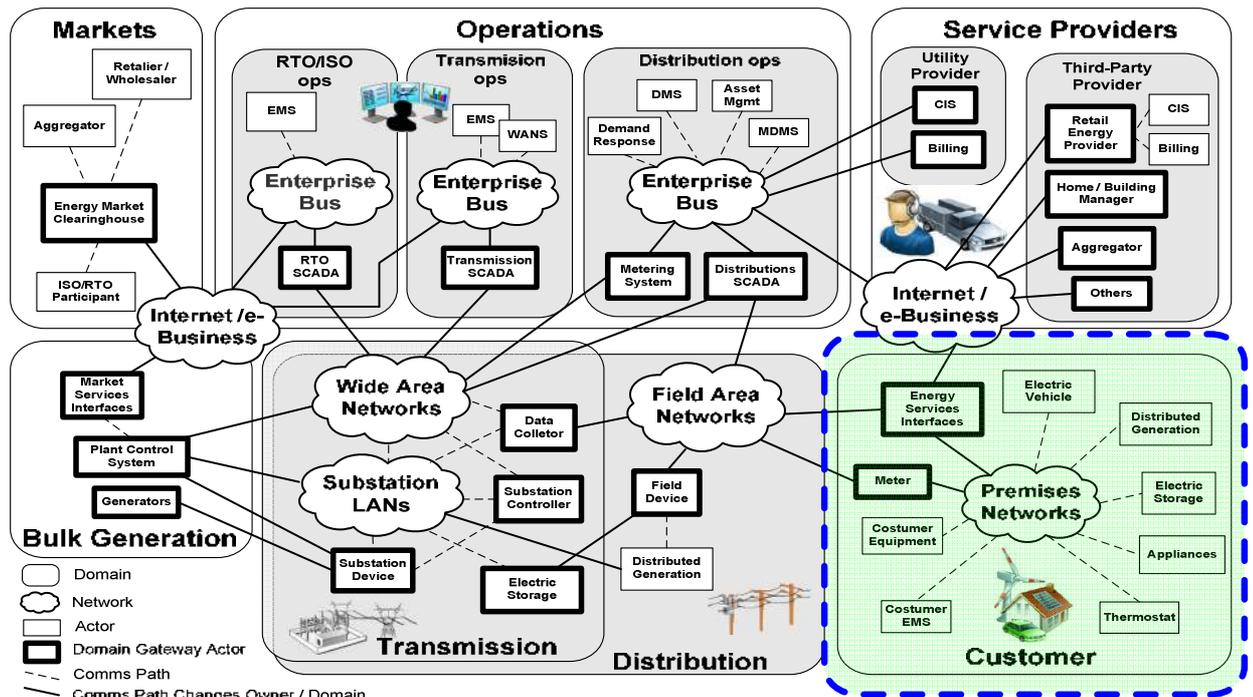


Figura 8 Dominio del cliente en el diagrama de referencia conceptual de interoperabilidad del NIST (NIST, 2010, p.33)

El dominio del cliente a menudo es dividido conceptualmente en tres zonas, Home to Grid (H2G), Building to Grid (B2G), y Vehicle to Grid (V2G). Para efectos de este capítulo el análisis se centrará en las interacciones de H2G con los dominios de las operaciones y los proveedores de servicios, específicamente para efectos de precios, alertas y respuestas de la demanda. Cabe resaltar que una de las diferencias entre el ambiente residencial y el ambiente comercial / industrial (B2G) es el nivel de sofisticación y la participación de los clientes, que pueden asumir la actividad de configuración de la red para lograr la interoperabilidad de las comunicaciones con la red eléctrica inteligente. Pero en los hogares que posean redes HAN, los consumidores pueden que no tengan experiencia para configurar aspectos de la red o simplemente no desean invertir tiempo o dinero configurando sus electrodomésticos para comunicarse a través de la red doméstica o la red de distribución.

Para el análisis de estas interacciones, varios grupos de la industria están trabajando activamente en el desarrollo de los requisitos funcionales para la comunicación de la red Smart Grid con la red HAN del cliente. Entre los grupos más representativos en este desarrollo se encuentran el GridWise Architecture Council / NIST, el Home-to-Grid Domain Expert Working Group y el grupo OpenHAN Task Force (McNaughton, G. & Saint, R., 2010).

3.1.1 Propósito

El mundo requiere mayores cantidades de energía, y energía más limpia, lo que hace imprescindible reducir su dependencia de los combustibles fósiles para producirla y por consiguiente reducir los gases que producen el efecto invernadero. Para tales efectos, no es una primera opción viable continuar construyendo centrales eléctricas adicionales para cumplir con las tasas actuales de crecimiento en la demanda de energía [Díaz & Hernández, 2011]. En este sentido, los diferentes gobiernos han impulsado políticas para que las empresas de servicios públicos trabajen en formas novedosas para reducir el consumo de electricidad por parte de los usuarios. En ese propósito, el concepto Smart Grid tiene un rol central, por su capacidad de integrar diferentes fuentes de generación de energía distribuidas (eólica, solar, hidroeléctrica, etc.), aumentar la eficiencia de la actual red eléctrica y soportar la masificación de vehículos eléctricos. Las Tecnologías de la información y las Telecomunicaciones, son esenciales en dicha modernización, pues de su desarrollo depende en buena medida que las redes de energía eléctrica logren ser cada vez más inteligentes.

La red HAN es un subsistema dentro de Smart Grid dedicado a la gestión del lado de la demanda, incluyendo eficiencia energética, respuesta a la demanda e integración de fuentes de energía renovable, dichos aspectos son los propósitos claves que incorporan las redes HAN para prestar servicios sobre Smart Grid y sirven para definir el propósito para este SRS, los cuales se plantean a continuación:

- ✓ Definir los requerimientos para un sistema de comunicaciones de los dispositivos del cliente basado en estándares para redes HAN que permita su interoperabilidad con el resto de la red eléctrica inteligente.
- ✓ Apoyar los procesos de planeación y ejecución de respuesta a la demanda que realizan las empresas de servicios eléctricos, mediante una lectura de información de los patrones de consumo de los usuarios y variaciones de

carga de los electrodomésticos y dispositivos conectados a la red HAN y, aplicar sobre los mismos, operaciones de gestión de energía.

- ✓ La red HAN debe proporcionar a los usuarios información clara y oportuna sobre su consumo de energía, para que de esa manera se promueva un nivel de concientización que lleve a través de mecanismos de control de carga a una modificación de sus patrones de conducta. Este tipo de cambios, según EAC (2008) permitirá lograr una reducción significativa de los costos de la factura de energía y disminución de los efectos sobre el medio ambiente.
- ✓ La red HAN debe proporcionarle al usuario la capacidad de recibir mensajes y alertas de tarificación de picos críticos que envían las empresas y proveedores de servicios públicos, todo ello en un esquema de precio variable como el tratado en [Time Of Use, TOU], con ello se busca que los usuarios respondan a las tarifas variables y puedan gestionar mejor su consumo energético.
- ✓ La red HAN debe apoyar la integración de las fuentes de generación distribuida (Distributed Electrical Resources, DER) a la infraestructura de la red eléctrica inteligente. Los beneficios a los usuarios de las DER, principalmente basadas en fuentes de energía renovables eólica y solar son, por un lado la posibilidad de generación parcial o total de la energía requerida en el hogar y por otro permitir ofrecer el excedente a las empresas de servicios públicos lo que reduciría considerablemente los costos de energía. Además de las fuentes de generación distribuida, la red HAN incluye la integración del almacenamiento distribuido (DS) y los vehículos eléctricos plug-in (PEV).

3.1.2 La audiencia para este SRS HAN es la siguiente:

- Instituciones educativas y grupos de investigación.
- Las empresas de servicios públicos que desplieguen infraestructura AMI y que interactúan a su vez con las redes HAN
- Los diseñadores y fabricantes de sistemas de redes HAN.
- Los fabricantes de productos de consumo (por ejemplo, sistemas HVAC programables, sistemas de gestión de energía, interruptores de control

de carga, pantallas en el hogar, electrodomésticos inteligentes, vehículos eléctricos PEV, etc.)

- Proveedores de software que desarrollen programas que proporcionen funcionalidades de Smart Grid a los consumidores (por ejemplo, respuesta a la demanda, gestión de energía, sistemas prepago, integración de recursos distribuidos de energía, etc.)
- Stakeholders que se benefician con las implementaciones de la infraestructura AMI y la interacción con las redes HAN.

3.1.3 Alcance

Este documento hace referencia a la red HAN, que se extiende desde el borde del Sistema de AMI, donde se encuentra la interfaz de servicios de energía (ESI) hasta todos los dispositivos HAN relevantes en el hogar. Se presentan los requerimientos iniciales y casos de uso para el planteamiento de una arquitectura de alto nivel de un sistema de comunicaciones de una red HAN para prestar servicios de Smart Grid.

El alcance de este SRS no incluye ciertos sistemas instalados en el lado de los proveedores de servicios, pero los servicios ofrecidos por la red HAN tienen implicaciones inherentes sobre ellos (por ejemplo, la red de comunicaciones AMI, los sistemas de gestión y recolección de datos de los medidores inteligentes, etc.). Tampoco se aplica a los dispositivos del cliente que no forman parte de los servicios de gestión de energía, como por ejemplo dispositivos de automatización y confort en el hogar, monitoreo de salud en el hogar, y los productos del sistema de seguridad.

Aunque este trabajo se enfoca principalmente en las especificaciones de requerimientos de la red HAN es decir los consumidores residenciales, los requerimientos son aplicables y pueden ser utilizados también en el ámbito comercial e industrial.

3.1.4 Siglas y Abreviaturas

Esta sección provee una lista de todas las siglas y abreviaturas utilizadas a lo largo de este capítulo.

AMI	Infraestructura de Medición Avanzada
DER	Recursos distribuidos de energía
EMS	Sistema de gestión de energía
ESI	Interfaz de servicios de energía
ESU	Unidad de abastecimiento de energía
EUMD	Dispositivo de medición de usuario final
EVSE	Equipo para abastecimiento de vehículos eléctricos
HAN	Home Area Network
HMI	Interfaz Hombre / máquina
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
IHD	Pantalla en el hogar
PCT	Termostato de comunicación programable
PEV	Vehículos electricos Plug-in
SEP	Smart Energy Profile
SRS	Especificación de requerimientos del sistema
TOU	Tiempo de uso

Tabla 3 Siglas y Abreviaturas

3.1.5 Definiciones

Esta sección provee las definiciones de los términos utilizados en este capítulo.

Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)	Se refiere al sistema que mide, recolecta y analiza el uso de energía de dispositivos avanzados (por ej. medidores de electricidad, gas y/o agua), a través de varios medios de comunicación. Esta infraestructura incluye hardware, software, comunicaciones sistemas de servicio al cliente, software de gestión de datos medidores, sistema de medición, sistemas de red de distribución, interfaces de servicios de empresas de servicios públicos, etc. En algunas jurisdicciones esto puede ser llamado Sistema de Medición Avanzado (AMS).
Consumidor	<p>Una persona que consume electricidad, gas natural o agua y que tiene el mayor potencial para conservar y gestionar el consumo de los servicios públicos. El consumidor puede participar en programas del proveedor de servicios (por ejemplo, respuesta a la demanda, respuesta a los precios, programas PEV, prepago, precios, etc.)</p> <p>Los consumidores también pueden administrar los eventos y la respuesta a la demanda y el uso diario por el control de dispositivos de HAN, manualmente o por medio de otros dispositivos (por ejemplo, EMS, etc.).</p>
Respuesta a la demanda	Un cambio temporal en el consumo de electricidad por una demanda recursos (por ejemplo, PCT, electrodomésticos inteligentes, bomba de la piscina, PEV, etc.) en respuesta a una señal de control que emitida. Para efectos de este capítulo, respuesta a la demanda no incluye eficiencia energética o reducción de carga permanente.

Control de carga directa / Control de carga remota	Una actividad de respuesta a la demanda mediante el cual el proveedor de servicios remotamente apaga, establece los ciclos, o reduce la carga de los dispositivos HAN inscritos (por ejemplo, aire acondicionado, calentador de agua, electrodomésticos inteligentes, etc.)
Recursos distribuidos de energía (DER)	Tecnologías modulares de generación y almacenamiento de pequeñas cantidades de energía eléctrica. También se le conoce como generación distribuida.
Sistema de gestión de energía (EMS)	Una aplicación que se utiliza para el control de energía de múltiples dispositivos (por ejemplo, sistemas HVAC, interruptores de luz, carga de PEV, etc.) Esta aplicación puede residir en un dispositivo HAN. Esta aplicación también puede controlar otros dispositivos o sistemas en el hogar proporcionando servicios automatizados para el consumidor.
Interfaz de Servicios de energía (ESI)	Una interfaz segura unida a los equipos de red de comunicaciones HAN que facilita las aplicaciones pertinentes de la energía (por ejemplo, control remoto de carga, respuesta de la demanda, monitoreo y control del DER, lectura de contadores energéticos y no energéticos, carga de PEV e integración con los sistemas de gestión de energía, etc.), proporciona funciones de auditoría / logueo que registren las transacciones desde y hacia dispositivos HAN.
Unidad de suministro de energía (ESU)	Un dispositivo de almacenamiento de energía (por ejemplo una batería de almacenamiento, las baterías de un vehículo eléctrico) capaz de proveer potencia a los dispositivos de usuario o a la grilla eléctrica.
Interfaz externa	Provee a la red HAN con acceso a la red de comunicación externa. Un ESI de la empresa de servicios, ESI de terceros y Gateways que conectan a las redes de comunicación externas (por ejemplo la red de comunicación AMI de la empresa de servicios públicos, Internet, red de telefonía celular, etc.) son ejemplos de interfaces externas.

Dispositivos HAN fijos con capacidades de medición	Un dispositivos HAN sin movilidad (es decir, DER) y que posee capacidades de medición.
Home Area Network (HAN)	Dentro del alcance de este SRS, una HAN es una red relacionada con la grilla eléctrica que se utiliza para la comunicación con dispositivos del cliente. LA red HAN no necesariamente requiere de las premisas externas, pero puede estar conectada a una o más redes de comunicación externas (por ejemplo AMI de la empresa de servicios, Internet, red celular, etc.) empleando interfaces externas.
Dispositivos HAN	Dentro del alcance de esta especificación, cualquier dispositivo que se comunique con la red HAN.
Sistema HAN	Una colección de dispositivos, acciones, capacidades de comunicación y procesos que habiliten a una red HAN a operar en las premisas del usuario.
Medidor	Un dispositivo cuya función principal es medir, registrar y comunicar el uso y/o producción de un commodity (por ejemplo electricidad, agua, gas, etc.) de un dispositivo individual o de las instalaciones del cliente.
Gestión de red	La habilidad de diagnosticar componentes del sistema, monitorear y controlar los sistemas de comunicación.
Vehículos eléctricos Plug-in (PEV)	Un vehículo potenciado por energía eléctrica que obtiene toda o una porción de la energía requerida para propulsión de la grilla eléctrica. Un PEV puede ser capaz de comunicarse y llegar a ser un miembro de una red HAN.
Premisas	Una localización geográfica (por ejemplo una casa, apartamento, edificio, etc.) con el cual el medidor está asociado permanentemente.
Proveedor de servicios	Una entidad (por ejemplo empresa de servicios públicos, minorista, proveedor eléctrico, agregador de respuesta a la demanda, etc.) que provee servicios de energía a los consumidores.

Electrodomésticos inteligentes	Dispositivos eléctricos del hogar que poseen capacidad de comunicación con la red HAN y que son capaces de recibir señales de terceros autorizados (por ejemplo empresas de servicios públicos, proveedor de servicios, EMS, consumidor, etc.) y de ajustar su modo de operación basado en las preferencias del consumidor (por ejemplo modo de ahorro de energía, apagado / encendido programado, etc.).
Tiempo de Uso TOU	Cargos de energía variables que están basados en horarios predeterminados de horas del día y días de la semana.
Empresa de servicios públicos	El proveedor de servicios eléctricos, que como mínimo, es responsable por la lectura del medidor eléctrico, habilitando a la red HAN para acceder al medidor y entregando energía al consumidor. Esta puede estar integrada a una red eléctrica o a una red de transmisión y distribución.
Sistema de empresa de servicios públicos	Incluye el sistema de infraestructura de medición avanzada, automatización distribuida y todas las demás tecnologías que habiliten la operación de la empresa de servicios públicos
Interfaz del sistema de empresa de servicios públicos	Una ESI propietaria de la empresa de servicios públicos, que habilita la interacción segura entre dispositivos HAN registrados en su red y la red AMI de la empresa de servicios públicos. La funcionalidad de la ESI de la empresa de servicios públicos puede residir en el medidor del AMI.

Tabla 4 Definiciones

3.1.6 Otras consideraciones y referencias

Existen varias fuentes de información potenciales que se puede utilizar para identificar los requerimientos base para las redes HAN para interoperar con los demás subsistemas de Smart Grid. Para el análisis de estas interacciones, varios grupos de la industria están trabajando activamente en el desarrollo de los requerimientos funcionales para la comunicación de la red Smart Grid con la red

HAN del cliente. Entre los grupos mas representativos en este desarrollo se encuentran el GridWise Architecture Council / NIST, el Home-to-Grid Domain Expert Working Group y el grupo OpenHAN Task Force (McNaughton, G. & Saint, R., 2010).

Otra posible fuente de información son los estándares para los dispositivos de comunicaciones HAN. Aunque un número potencial de protocolos de la red en el hogar han sido identificados en (McNaughton, G. & Saint, R., 2010), Según el NIST, los dos principales candidatos son ZigBee de la ZigBee Alliance, para las comunicaciones inalámbricas y HomePlug de Powerline Alliance, para las comunicaciones por medio de la línea eléctrica. Las dos organizaciones acordaron recientemente unir esfuerzos y han publicado conjuntamente la documentación de requerimientos para redes HAN en Smart Energy. A continuación se describe brevemente las fuentes de información más relevantes usadas para identificar el conjunto de requerimientos:

GridWise Architecture Council / NIST: El Consejo de arquitectura GridWise y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) han conformado varios Domain Expert Work Group (DEWGs) para elaborar un informe para el Congreso de los Estados Unidos sobre el estado de los estándares para Smart Grid. El Home to grid DEWG (H2G DEWG) está investigando las comunicaciones entre las empresas de servicios públicos y los dispositivos para el hogar para facilitar los programas de respuesta a la demanda que implementen gestión de energía.

El DEWG H2G nombró una subcomisión para especificar los requerimientos para los sistemas de respuesta a la demanda residencial. El Subcomité comenzó con un material procedente de la especificación de requerimientos del sistema "UtilityAMI 2008 Home Area Network System Requirements", publicado por la Asociación Internacional de Usuarios UCA. El documento completo esta disponible en [Wacks, 2009]

UtilityAMI 2008 SRS HAN: Es un foro para definir la especificación de requisitos de mantenimiento, seguridad e interoperabilidad de la infraestructura de medición avanzada (AMI) y la infraestructura de respuesta a la Demanda (DRI) desde una perspectiva HAN. Además, desarrolla declaraciones de políticas de alto nivel que se puedan utilizar para facilitar la especificación de los requisitos de eficiencia y desarrollo utilizando un lenguaje común que minimice la confusión entre los proveedores de servicios y fabricantes. El documento completo esta disponible en (OpenHAN Task Force of the UtilityAMI Working Group, 2008)

OpenHAN Task Force: El OpenHAN Task Force es un grupo de trabajo dentro del Comité técnico Open Smart Grid y forma parte del Grupo Internacional de Usuarios de la UCA. Su objetivo es definir los casos de uso de alto nivel y los requisitos que deben ser adoptados por las empresas, las organizaciones de estandarización, y los implementadores de sistemas y dispositivos de redes HAN.

También ha tomado un papel activo en el proceso de especificación de requerimientos OpenHAN 2.0 [OpenHAN Task Force of the SG Systems Working Group, 2010], en la revisión de los cambios propuestos y proporcionar actualizaciones a los contenidos y el lenguaje para la próxima especificación de requerimientos.

ZigBee Smart Energy + HomePlug: La unión entre el Smart Energy Profile (SEP) ZigBee + HomePlug fue elegido por el NIST (Smart Grid Interoperability Standards Framework and Roadmap) como modelo de Comunicación e Información para dispositivos HAN. En el SEP se esbozan las definiciones detalladas de los mensajes para el intercambio de información entre (i) los medidores y los dispositivos gateway denominados Portales de Servicio de Energía (ESP) y (ii) entre el ESP y los dispositivos de HAN. [McNaughton& Saint, 2010]. El Marketing Working Group ZigBee + HomePlug ha desarrollado unos requerimientos para el SEP con el fin de mejorar aún más especificaciones iniciales HAN para las empresas de servicios públicos y los fabricantes de productos y asegurar un enfoque coherente, sólido, y lograr una experiencia del cliente exitosa. [ZBHP_SE, 2009].

3.1.7 Consideraciones y Referencias de Seguridad en el ámbito HAN

La red inteligente permite el flujo bidireccional de información entre dispositivos en las premisas del cliente, las cuales están conectadas a una red HAN, y a la red de un proveedor de servicios. Este tipo de comunicación está siendo introducido por Smart Grid a través del despliegue de sistemas AMI, incluyendo medidores inteligentes y dispositivos HAN.

Dado que la comunicación bidireccional con dispositivos HAN implica el flujo de información a través de varias redes, es necesario contar con medidas adecuadas de seguridad para reducir el riesgo de intrusiones, espionaje, y la transmisión de contenidos no deseados. Además, cada dispositivo HAN, es un nodo en la red, que tiene el potencial para albergar, transmitir y recibir contenido indeseado. La seguridad en la red HAN es un balance entre el aseguramiento de las comunicaciones bidireccionales, protegiendo la privacidad del consumidor mientras permite el acceso a los entes interesados y a los dispositivos HAN rentables. Los vectores emergentes de amenazas y ataques hacen que la ciberseguridad siempre esté en constante evolución. Debido a la naturaleza cambiante de la ciberseguridad, es necesario revisar y modificar regularmente los estándares y controles. Para efectos de este trabajo de grado no se tendrá en cuenta la seguridad ya que la mayoría de los dispositivos en donde se implementa

smart grid para redes HAN como Zigbee, Wi-Fi o Power Line ya cuentan con los protocolos apropiados de seguridad.

3.2 Descripción General y Principios de Diseño

Los principios de diseño representan las expectativas de alto nivel para regir y enmarcar el desarrollo de los requerimientos funcionales y técnicos en este documento. Estas expectativas son las capacidades necesarias para soportar los objetivos, interoperabilidad y funcionalidad de Smart Grid. Los principios permiten también, definir el punto de partida y las características funcionales que son la base de la especificación de requerimientos de la red HAN. A continuación se presentan los seis principios de diseño empleados para el presente trabajo basados en el Marco referencial del NIST:

- ✓ Soportar Comunicación Bidireccional entre los dispositivos HAN y el Proveedor de Servicios
- ✓ El sistema debe permitir la interactividad del usuario con la grilla y proporcionar información tiempo real y en cualquier momento, por medio de dispositivos como los IHD, sobre cómo, cuándo y cuanta energía consume el usuario final.
- ✓ Soportar la Integración de Servicios de Control de Carga
- ✓ La red HAN del usuario debe soportar aplicaciones de precios variables y de diferentes proveedores de servicios de energía.
- ✓ La empresa proveedora de servicios públicos debe poder acceder a los datos de consumo de energía de un usuario específico a través de la interfaz
- ✓ Integración de Recursos Energéticos Distribuidos y Medición en el usuario final

3.2.2 Consideraciones de Arquitectura

Esta sección del capítulo proporciona un contexto para las consideraciones de arquitectura teniendo en cuenta algunos elementos identificados en el capítulo 2 (Marco Referencial) y proporciona mayor claridad y contexto. A continuación se describen los elementos principales identificados en los modelos conceptuales

3.2.2.1 Interfaz de servicios de Energía (ESI)

Una interfaz ESI proporciona una función lógica especial en la red HAN. Es una interfaz que permite la comunicación segura entre la red HAN y las empresas proveedoras de servicios (por ejemplo, la empresa de servicios públicos, los consumidores, los proveedores de servicios diferentes a la empresa pública, EMS, etc.) y todos los dispositivos HAN que se han registrado a ella. La arquitectura HAN soporta más de una interfaz ESI en las instalaciones del consumidor, así que cada interfaz ESI debe crear una segmentación lógica independiente dentro de las instalaciones del usuario. Esta segmentación lógica puede ser vista como redes independientes, cada una con su propia seguridad. Los dispositivos HAN (por ejemplo, EMS, Gateway, etc.), los cuales están activos en múltiples redes, deben tener una separación lógica entre dichas redes. Esto no impide la aplicación de múltiples redes lógicas en una única red física común.

Una interfaz ESI importante es la de la empresa de servicios, que permite una interacción segura entre los dispositivos registrados en la red HAN y el AMI de la empresa de servicios. Esta interfaz ESI es la única que proporciona información del consumo de energía en tiempo real de los dispositivos medidores AMI a los dispositivos HAN. La comunicación con los dispositivos registrados en la red HAN a cargo de esas interfaces ESI puede ser a través de redes de comunicación alternativas (por ejemplo, Internet, red de telefonía celular, EMS, etc.)

3.2.2.2 Vehicle-to-Grid (V2G) PHEV

En el futuro más y más fuentes de energía intermitentes como la eólica y solar deberán sustituir a los combustibles fósiles, el papel de V2G se vuelve aún más importante, ya que pueden proporcionar un respaldo a tales fuentes de energía cuando su producción no sea estable. Además, cuando la cantidad de energía (renovable) generada es demasiado alta respecto a la consumida, la energía excedente a menudo se desperdicia. Con la integración de la tecnología V2G y PHEVs el exceso de energía se podría almacenar y más tarde ser suministrada a la red cuando sea necesario. En dos situaciones o aspectos

1. En este caso varios PHEV se pueden emplear como un sistema almacenamiento de energía distribuida. Dicha la capacidad permite alimentar de nuevo a la red puede ser rentable tanto para los propietarios de PHEV como para las empresas de servicios públicos.

2. Algunas otras aplicaciones potenciales para el concepto V2G y PHEV: si la demanda de energía en la red es superior a la oferta durante las horas pico, los PHEVs podrían suministrar la energía almacenada durante ese tiempo. Además, cuando hay una falla del sistema de energía, los PHEVs pueden abastecer la red por un tiempo corto y sustituir las costosas plantas de alimentación redundantes.

3.2.2.3 Sistema de Gestión Energética (EMS)

En este SRS HAN, un EMS es un componente lógico para administrar el consumo de energía en las instalaciones del usuario. Físicamente, este puede residir en otro dispositivo hardware (como las pantallas dentro del hogar IHD, computadoras, set-top box, etc.) o puede ser un dispositivo independiente. En su forma más simple, el EMS puede gestionar algunos dispositivos basados en reglas simples o permitir al consumidor acceder a los dispositivos en las instalaciones del usuario de forma remota desde teléfonos móviles.

Un EMS más complejo puede optimizar el uso de energía o los costos de los dispositivos dentro de las instalaciones empleando algoritmos que reciben como entradas muchos valores y aspectos de la situación actual de la red y las instalaciones del usuario. Estos EMS también tendrán una amplia gama de capacidades de comunicación: algunos, podrán comunicarse al exterior de las instalaciones de usuario, otros intercambiarán información de mensajes de control con una o más interfaces ESI en las instalaciones del usuario, también podrán controlar dispositivos HAN que estén inscritos en los programas de los proveedores de servicios.

3.2.2.4 Recursos Energéticos Distribuidos (DER)

Los recursos energéticos distribuidos (DER) son tecnologías de generación y almacenamiento de energía pequeñas y modulares, que se encuentran en las instalaciones de usuario. Los DER generan electricidad la cual puede proveer toda o una porción de la energía en las instalaciones del usuario. Un DER puede estar interconectado con el sistema de suministro de distribución eléctrica y cualquier flujo de energía neto que pase a través de la red eléctrica puede ser registrado en un canal separado en los medidores de la red AMI. Para los efectos del HAN SRS,

un DER es un dispositivo HAN con la funcionalidad de medir y comunicar la producción total de energía. La producción del DER también puede ser administrada por un EMS que optimice el consumo de energía en las instalaciones del usuario.

3.3 Requerimientos del Sistema HAN

Los requerimientos del sistema HAN son el punto principal de este trabajo y proporcionan la información más importante a los diferentes stakeholders en la red HAN. Los requerimientos de la red HAN se definen para habilitar ciertas funcionalidades teniendo en cuenta los consumidores, empresas de servicios públicos y proveedores de servicios.

3.3.1 marco de Requerimientos

Para la especificación de los requerimientos se definen tres grandes categorías: aplicaciones, comunicaciones y potencia. Dicha división agrupa los principios guía de diseño que se definieron en la sección 3.2, enmarcado en el modelo conceptual del NITS.

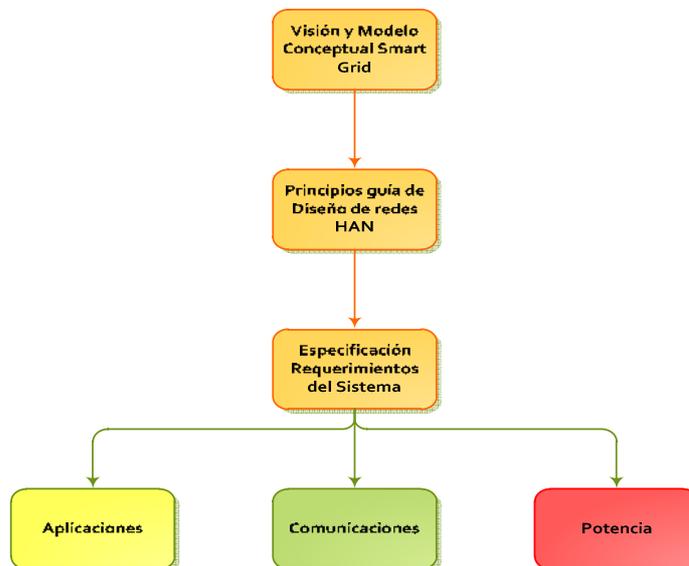


Figura 9 Categorías de los Requerimientos red HAN

El modelo funcional simplificado de smart grid se muestra en la figura 11. Donde se detallan las relaciones existentes entre las diferentes categorías definidas para los requerimientos de las redes HAN.

Categoría Red de Potencia:

- El Dominio de la grilla eléctrica: funciones de la grilla de potencia
- Medición inteligente: funciones de medidor inteligente que es el elemento intermediario entre el dominio del cliente y la red del proveedor.
- Dominio del cliente: funciones que permiten gestionar los recursos de generación y almacenamiento junto con la integración de los PHEV.

Categoría Red de comunicaciones: Define las telecomunicaciones, incluyendo las redes basadas en IP, funciones de red y la compatibilidad de la red HAN con la NAN que son básicamente con redes AMI.

Categoría Dominio Servicios/Aplicaciones: funciones de aplicación para prestar servicios de respuesta a la demanda a través de señales de precio variable enviadas por el proveedor de servicios. Servicios de Facturación y aplicaciones que permitan al usuario gestionar y monitorear los datos de consumo de cada uno de los dispositivos inteligentes dentro del hogar.

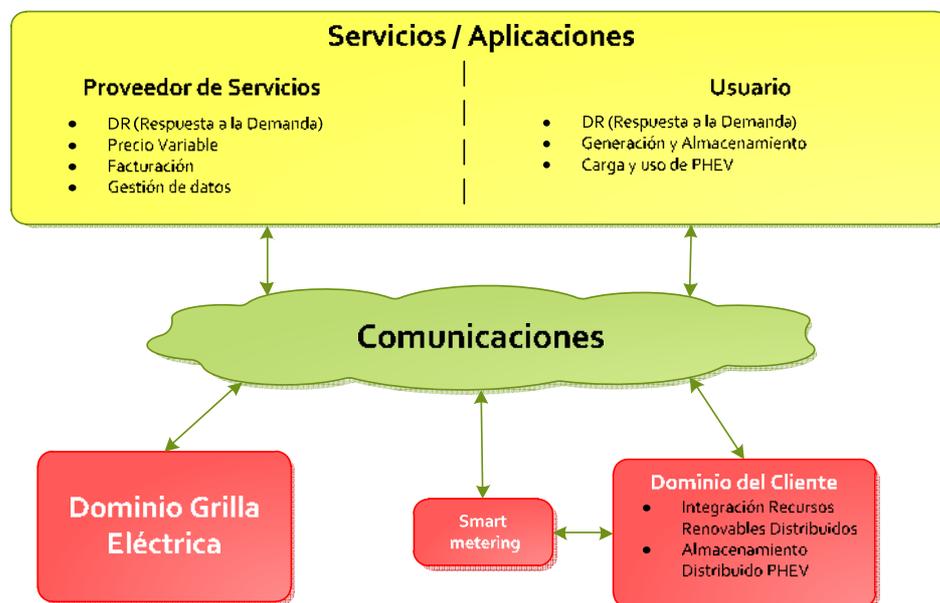


Figura 10 Modelo simplificado del dominio Smart grid en perspectiva TIC (Adaptado Yoshihiro & Tsuyoshi, 2011. Pag 5)

3.3.3.1 Aplicaciones

Las aplicaciones HAN son una de las categorías más importantes para la empresa de servicios públicos, los proveedores de servicios, al permitir una interactividad del consumidor con los servicios de energía eléctrica. Cualquier aplicación que se activa a través de las redes HAN puede tener una o más de las siguientes características: Control, Medición y Monitoreo, Procesamiento, e interfaces hombre-máquina.

Las **aplicaciones de control** responden a señales de control e información de precios, desde el control directo, que enciende o apaga las cargas hasta el control cíclico que encienden o apagan la carga a intervalos de tiempo configurables. Existen además, aplicaciones de control más sofisticados que pueden limitar la carga de un dispositivo teniendo como base umbrales configurables. Estas acciones pueden ser iniciadas por una señal de control discreta que define el tipo específico de acción a tomar. También puede ser iniciado por una señal de precios que es interpretada por la aplicación de control de un dispositivo HAN o EMS para hacer un tipo de acción deseable. El control también puede ser ejercido dentro de la red HAN para cumplir los objetivos de consumo (por ejemplo, manual, EMS, etc.) o fuera de esta por medio de la Internet.

Las **aplicaciones de medición y monitoreo** generalmente proporcionan los datos internos y el estado. Estas aplicaciones incluyen la funcionalidad de DER donde la entrada y la salida de energía local son medidas y monitoreadas. También puede medir y monitorear el consumo específico de energía o la producción de un dispositivo en particular. Las aplicaciones pueden ser tan simples como medir y monitorear el estado ambiental o si un dispositivo está encendido o apagado.

Las **aplicaciones de procesamiento** consumen, procesan y actúan sobre datos internos y externos. Estas aplicaciones aceptan los datos de sistemas externos y aplicaciones de medición y monitoreo HAN. Las aplicaciones con capacidad de procesamiento en general son más complejas y costosas como por ejemplo calcular el costo, el consumo y la producción de la energía

Interfaces Hombre-Máquina (HMI): La mayoría de las aplicaciones se necesitarán un HMI con el fin de proporcionar información al usuario. Estas aplicaciones ofrecen a los consumidores un medio para introducir datos en una aplicación (por ejemplo, la pantalla táctil, un teclado, un teléfono celular, computador, etc.), pero además proporciona un medio para enviar datos a los

mismos consumidores (por ejemplo, mensajes, navegador, teléfono celular, pantalla, etc.)

3.3.3.2 Comunicaciones

Las comunicaciones es una de las categorías más difíciles para la red HAN. La OpenHAN TF ha identificado criterios de comunicación para la puesta en marcha y control.

La puesta en marcha es el proceso de la red para la adición de un dispositivo HAN en la red HAN para permitir que el dispositivo se comunice con otros dispositivos. Este proceso se desacopla de la inscripción y los procesos de inscripción. La puesta en marcha consiste en lo siguiente:

- El escaneo de red - Identificación de las redes candidatas que el dispositivo podría optar para unirse.
- Selección de red - Selección de la red a la dispositivo intentará unirse.
- Admisión a la red - la inclusión del dispositivo en una de las redes candidata. Dichas redes podrían incluir una clave de red.
- Configuración de la red - El establecimiento de parámetros de red de dispositivos específicos (por ejemplo, ID de red, la ruta inicial, fijaciones)

El control de un nodo es activado por la tecnología específica de la plataforma e involucra:

- Auto-organización - la red debe ser auto-formada y auto-organizada
- Optimización - Selección de Ruta
- Mitigación - Capacidad de adaptación y trabajo en respuesta a las limitaciones de interferencia o rango.

3.3.3.3 Potencia

En esta área cubre las funciones de distribución y consumo de energía eléctrica, además de la integración de los recursos energéticos renovables. Está conformada por los dominios del cliente (Electrodomésticos inteligentes, vehículos eléctricos y redes del usuario) y la medición inteligente por parte de las empresas proveedoras de energía.

Dentro de las funciones principales para la gestión eficiente de la generación, transmisión y distribución, así como los recursos energéticos distribuidos (DER) se encuentran:

Funciones DER: permite que los dispositivos de generación y almacenamiento asociados a las funciones DER, se puedan agregar a los sistemas de transmisión / distribución o a las micro redes de los usuarios. También permite a los usuarios industriales integrar su producción de energía y almacenamiento dentro de la red.

Función de monitoreo y medición: Esta función se ejecuta por medio de los dispositivos de monitoreo y medición localizados dentro de la red HAN incluyendo el smart meter.

3.4 Supuestos en los Requerimientos

Esta sección documenta los supuestos en los que se basan los requerimientos. Será muy útil para referirse a estos en el resto de la especificación.

1. Se asume que la comunicación y las aplicaciones del ESI de la empresa de servicios ya se encuentran implementadas y son compatibles con los dispositivos y el ESI de la red HAN del usuario.
2. El consumidor le ha otorgado a los proveedores de servicios, derechos de acceso a los dispositivos HAN en las instalaciones del consumidor, para servicios de DR.
3. La red HAN proporciona una comunicación segura entre múltiples dispositivos HAN y dispositivos externos pertenecientes al proveedor de servicios eléctricos e ISP. Los dispositivos dentro de la red HAN ya han pasado por el proceso de autenticación.
4. Los dispositivos HAN tienen configuraciones predeterminadas que permiten a los consumidores utilizar el dispositivo HAN después de la instalación (por

ejemplo, electrodomésticos inteligentes que funcionen incluso si no están registrados en un programa de DR, etc.).

3.5 Lista de Requerimientos Funcionales según aspectos claves

De los aspectos claves de diseño descritos en la sección 3.2 se puede identificar y listar los siguientes 4 requerimientos base para las redes HAN en el contexto de smart grid.

No Ref	Descripción del Requerimiento
R01	La red HAN debe soportar la comunicación bidireccional entre los dispositivos HAN y el proveedor de servicios. Además el sistema debe permitir la interactividad del usuario con la grilla y proporcionar información sobre cómo, cuándo y cuanta energía consume el usuario final, de manera que este uso se ajuste a sus preferencias individuales de presupuesto y concientización sobre el impacto en el medio ambiente. La red HAN del usuario debe permitir visualizar en tiempo real y en cualquier momento, la información de consumo de los usuarios por medio de dispositivos como los IHD.
R02	La red HAN debe soportar el flujo de energía bidireccional, es decir, desde el proveedor de servicios hacia el cliente final y desde el cliente hacia la red eléctrica, entregando el exceso de la energía generada a través de fuentes renovables y/o la que se encuentra almacenada en las baterías de los vehículos PHEV.
R03	Debe soportar servicios de respuesta a la demanda (DR) y de control de carga ya sea desde la red HAN del usuario y/o desde la red de distribución de la empresa de servicios públicos. La red HAN del usuario debe permitir a los proveedores de servicios de energía, la implementación de servicios de precios variables
R04	La red HAN debe permitir la agregación a la red eléctrica de los recursos energéticos distribuidos obtenidos de tecnologías de generación y almacenamiento de energía renovable (solar y eólica) para el consumo local

Tabla 5. Lista de requerimientos clave para las redes HAN dentro de Smart grid.

Para cada uno de los requerimientos generales de la tabla 5, se realiza una descripción con un nivel mayor de detalle:

Requerimiento R01:

La red HAN debe soportar la comunicación bidireccional entre los dispositivos HAN y el proveedor de servicios. Además el sistema debe permitir la interactividad del usuario con la grilla y proporcionar información sobre cómo, cuándo y cuanta energía consume el usuario final, de manera que este uso se ajuste a sus preferencias individuales de presupuesto y concientización sobre el impacto en el medio ambiente. La red HAN del usuario debe permitir visualizar en tiempo real y en cualquier momento, la información de consumo de los usuarios por medio de dispositivos como los IHD.

La comunicación de dos vías es necesaria entre el medidor inteligente (Smart Meter) del consumidor y la empresa de servicios públicos para soportar la gestión remota de los electrodomésticos inteligentes de la red HAN del usuario, así como la conexión y la desconexión del servicio remotamente desde el proveedor, como un método de respuesta a la demanda. Dicha comunicación también permitirá el envío de datos a la red del cliente. Esta comunicación puede realizarse a través del AMI de la empresa de servicios que está conectada a la red HAN o por medio de redes externas como la internet. Además, la red de comunicaciones debe ser compatible con los protocolos y aplicaciones que no están relacionados directamente con la medición. Por lo tanto, como se propone en Flynn (2007), de implementar un esquema de comunicación basado en el protocolo IP que sirva como capa de unificación de todos los segmentos de Smart Grid, incluidas las redes de AMI y sus dispositivos finales.

La red HAN permitirá a los usuarios lecturas sobre consumo, consiguiendo con ello la posibilidad de gestionar sus hábitos de consumo por medio de los pantallas en el hogar IHD (In-Home Display) o sobre pantallas de otro tipo de dispositivos como equipos móviles. Los medidores inteligentes deben proporcionar información en tiempo real de cuanta energía es usada dentro del hogar, qué costos de uso tienen y posiblemente mostrar el impacto que su uso tiene sobre el medio ambiente.

Los usuarios podrán gestionar sus consumos interactivamente o ajustar sus preferencias para que las empresas de servicios públicos las programe automáticamente con base a sus elecciones. Además, debe permitir a los usuarios agregar a sus redes HAN electrodomésticos inteligentes, controles de temperatura, sistemas de seguridad y dispositivos electrónicos que sean capaces de comunicarse con la red eléctrica e intercambiar información para el consumidor. Además, también podrán ser capaces de gestionar remotamente esas aplicaciones por medio de redes externas como la Internet. Al final con el despliegue de la información de las pantallas de los dispositivos conectados a la

redes de HAN podrá ayudar a los consumidores a tomar decisiones sobre su consumo de energía que pueda resultar en ahorros significativos de energía.

Requerimiento R02:

La red HAN debe soportar el flujo de energía bidireccional, es decir, desde el proveedor de servicios hacia el cliente final y desde el cliente hacia la red eléctrica, entregando el exceso de la energía generada a través de fuentes renovables y/o la que se encuentra almacenada en las baterías de los vehículos PHEV.

El nuevo esquema de distribución de energía bidireccional no sólo debe permitir habilitar a los usuarios de la empresa de servicios públicos gestionar mejor su consumo, reducir la demanda y ayudar al medio ambiente, sino que, a través de la generación distribuida pueda ser productores de energía eléctrica por medio de tecnologías de generación renovable como la eólica y solar. Para ello la red HAN debe poseer unos componentes que tengan funciones de Gateway y sean intermediarios entre la empresa de servicios públicos y la red del usuario, debe comunicarse a través de una interface AMI, que junto a los medidores inteligentes y el ESI (Interfaz de Gestión de Energía), proporcionan los elementos necesarios para que el flujo de energía pueda ir en ambas direcciones. Con esta combinación de elementos, a la red eléctrica se le permite controlar el flujo bidireccional de la energía y monitorear, gestionar y soportar esos recursos distribuidos en las instalaciones del cliente.

Debido a las características intermitentes de las fuentes renovables en la tecnología DER (Recursos Energéticos Distribuidos) es necesario que se tenga un método de almacenamiento para poder hacer este modelo más viable y hacer que se puedan integrar a la grilla eléctrica y adaptarse mejor a las dinámicas de la generación distribuida. En este trabajo, como recursos de almacenamiento distribuido se usa los bancos de baterías y la tecnología V2G de los vehículos híbridos fotovoltaicos PHEV.

Requerimiento R03:

Debe soportar servicios de respuesta a la demanda (DR) y de control de carga ya sea desde la red HAN del usuario y/o desde la red de distribución de la empresa de servicios públicos. La red HAN del usuario debe permitir a los proveedores de servicios de energía, la implementación de servicios de precios variables

Para el control de carga Directo, la red HAN debe mostrar al usuario la información proporcionada por la empresa de servicios públicos y mostrar los perfiles de carga obtenidos de los datos en los medidores inteligentes, con ello se busca que los consumidores se concienticen y cambien su consumo a horas no pico o que reduzcan su consumo en horas pico. Esto lo pueden realizar a través del ajuste de las temperaturas de los calentadores de agua y o aires acondicionados y apagando las luces u otros dispositivos que no estén en uso.

Por otro lado para el control por medio de los precios variables, la red HAN debe entregar información a los consumidores a través de los IHD, sobre los precios por franjas horarias, y permitir al usuario gestionar los electrodomésticos inteligentes e integración de la generación y el almacenamiento distribuido en la red eléctrica de la empresa de servicios públicos, permitiendo una mejor planeación y gestión de su consumo de energía. Para que el control por medio de los precios variables sea efectivo, la red HAN debe permitir al usuario conceder el permiso a los proveedores para el control automático de carga o hacerlo de forma manual.

Requerimiento R04:

La red HAN debe permitir la agregación a la red eléctrica de los recursos energéticos distribuidos obtenidos de tecnologías de generación y almacenamiento de energía renovable (solar y eólica) para el consumo local.

La red HAN debe poder integrar la generación distribuida proporcionada por las fuentes renovables como la eólica o la solar. Debido a la naturaleza intermitente de dichos sistemas de generación, es necesario proporcionar almacenamiento eléctrico para permitir el incremento en el uso de dichas energías renovables y elevar el porcentaje de generación. Cuando la producción de las fuentes renovables supera la demanda interna del hogar o negocio, el excedente puede ser almacenado en las baterías de los vehículos híbridos PHEV, para luego proporcionar electricidad a la red cuando los operadores así lo soliciten, principalmente en horas pico.

La red HAN debe soportar la integración de los vehículos eléctricos y en particular los vehículos híbridos PHEV del usuario. Específicamente, con la energía almacenada en las baterías de estos vehículos se puede abastecer los hogares de los usuarios cuando la empresa de servicios públicos así lo solicite.

3.6 Particionamiento en subsistemas arquitectura red HAN:

Dado las características propias de la red HAN y teniendo en cuenta los principios guía de diseño expuestos en la secciones anteriores, la red inteligente puede ser vista como un gran sistema de sistemas, donde cada uno de los siete dominios definidos por el NIST se puede mapear a tres dominios fundamentales: APLICACIÓN, COMUNICACIONES y POTENCIA, y dichos dominios se descomponen en un siguiente nivel en seis subsistemas, ver figura 11:

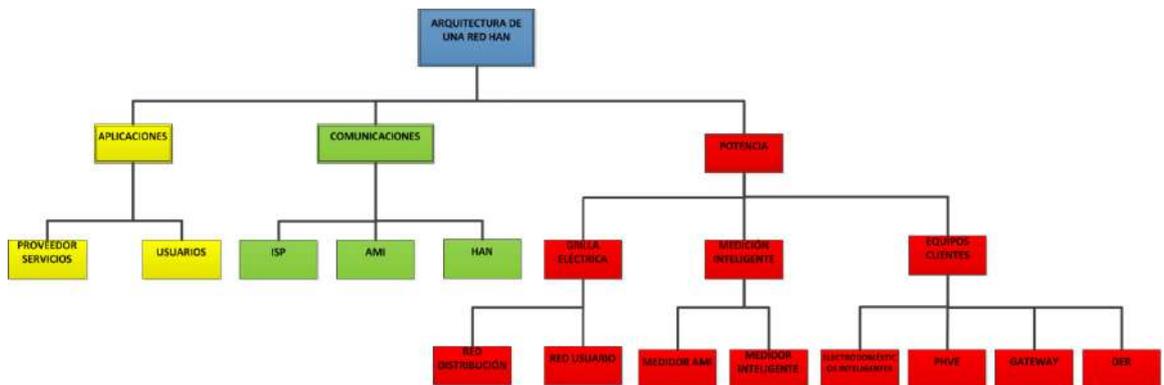


Figura 11. Particionamiento por subsistemas para la Arquitectura de la red HAN

Luego de definir el Particionamiento se mapea los cuatro requerimientos sobre los componentes y dispositivos, indicando el nivel de pertenencia e importancia para cumplir cada uno de los requerimientos, el resultado se consigna en la tabla 6.

SISTEMA DE REQUERIMIENTOS	APLICACIONES		COMUNICACIONES			POTENCIA							
	Proveedor de Servicios PROVSERV	Usuarios USER	COMUNICACIONES			GRILLA ELÉCTRICA		MEDICIÓN INTELIGENTE		EQUIPOS CLIENTES			
			ISP	AMI	HAN	Red de distribución REDDIST	Red potencia Usuario REDPOTUS	Medidor AMI MEDAMI	Smart meter SMET	Electrodomésticos Inteligentes EI	PHEV	Gate way	DER
La red HAN debe soportar la comunicación bidireccional entre los dispositivos HAN y el proveedor de servicios. Debe permitir la interactividad del usuario con la grilla. La red HAN debe permitir visualizar en tiempo real y en cualquier momento, la información de consumo de los usuarios por medio de dispositivos como los IHD.			X	X	X								
La red HAN debe soportar el flujo de energía bidireccional, para entregar el exceso de la energía generada a través de fuentes renovables y/o la que se encuentra almacenada en las baterías de los vehículos PHEV.						X	X	X	X		X	X	X
Debe soportar servicios de respuesta a la demanda (DR) con un esquema de precios variables y de control de carga ya sea desde la red HAN del usuario y/o desde la red de distribución de la empresa de servicios públicos.	X	X	X	X	X			X	X	X		X	
La red HAN debe permitir la agregación a la red eléctrica de los recursos de generación y almacenamiento de energía renovable (solar y eólica) para el consumo local.					X		X		X		X	X	X

Tabla 6 Mapeo Requerimientos clave sobre dispositivos Lógicos

SISTEMA DE REQUERIMIENTOS	APLICACIONES		COMUNICACIONES			POTENCIA							
	Proveedor de Servicios PROVSERV	Usuarios USER	COMUNICACIONES			GRILLA ELÉCTRICA		MEDICIÓN INTELIGENTE		EQUIPOS CLIENTES			
			ISP	AMI	HAN	Red de distribución REDDIST	Red potencia Usuario POTUS	Medidor AMI MEDAMI	Smart meter SMET	Electrodo métricos Inteligentes EI	PHEV PHEV	Gateway GW	DER DER
R01			R01ISP01	R01AMI01	R01HAN01								
R02						R02REDDIST01	R02POTUS01	R02MEDAMI01	R02SMET01		R02PHEV01	R02GW01	R02DER01
R03	R03PROVSERV01	R03USER01	R03ISP01	R03AMI01	R03HAN01			R03MEDAMI01	R03SMET01	R03EI01		R03GW01	
R04					R04HAN01		R04POTUS01		R04SMET01		R04PHEV01	R04GW01	R04DER01

Tabla 7: Etiquetas a los diferentes requerimientos obtenidos en el mapeo.

Al final en la tabla 8, se reescriben y definen la lista de 25 requerimientos para el diseño de la red HAN obtenida en el proceso de SRS.

R01ISP01	La red HAN debe permitir la interactividad del usuario con el proveedor de servicios por medio de redes externas como la internet, para poder acceder a los datos de consumo o para el envío de comandos de control.
R01AMI01	La red HAN debe poder soportar la comunicación bidireccional entre el usuario y el proveedor de servicios por medio de la infraestructura de medición avanzada AMI, para poder realizar medición de consumos, toma de muestras y el envío de comandos de control.
R01HAN01	La red HAN debe permitir visualizar en tiempo real y bajo demanda, información de consumo de los usuarios por medio de dispositivos como los IHD, además de permitir la creación de perfiles de usuario, y el control interno de los dispositivos inteligentes.
R02REDDIST01	La red de distribución del proveedor debe estar en capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional ya sea la producida en las grandes centrales de generación hacia las instalaciones del usuario o la generada por medio de fuentes renovables en las instalaciones del usuario hacia la red de distribución.
R02POTUS01:	La red HAN del usuario debe estar en capacidad de recibir la energía suministrada por la empresa de servicios públicos o la generada en sus propias instalaciones por medio de Fuentes renovables como la solar o la eólica.
R02MEDAMI01	El medidor AMI debe poder medir la energía suministrada por la empresa de servicios públicos, así como la generada por el usuario por medio de fuentes de generación renovable como la solar o la eólica.
R02SMET01	El medidor inteligente que se encuentra en la red HAN del usuario debe poder medir la energía suministrada por la empresa de servicios públicos así como la generada por los usuarios por medio de Fuentes renovables.
R02PHEV01	La red HAN del usuario debe permitir el intercambio de energía almacenada en las baterías de los vehículos PHEV tanto para uso doméstico así como para entregar el exceso a la red de distribución de la empresa de servicios públicos.
R02GW01	El Gateway en la red HAN del usuario debe poder gestionar el consumo de energía en las premisas de usuario, así como la energía generada localmente como la suministrada por la empresa de servicios públicos.
R02DER01	La red HAN del usuario debe permitir la integración de tecnologías de generación DER para abastecer su consumo interno, así como para poder entregar el exceso a la red de distribución del proveedor de servicios.

R03PROVSERV01	El proveedor de servicios debe estar en capacidad de soportar programas de respuesta a la demanda como el control directo de carga, planeación del suministro de energía por medio de perfiles de carga de los usuarios o precios variables.
R03USER01	la red HAN del usuario debe poder estar en capacidad de soportar programas de respuesta a la demanda (DR) suministrados por la empresa de servicios públicos, así como el control directo de los electrodomésticos inteligentes conectados a su red.
R03ISP01	La red HAN del usuario debe poder soportar el control directo de sus dispositivos instalados por medio de redes externas como la internet.
R03AMI01	La red AMI debe permitir el control directo de los dispositivos inteligentes conectados en la red HAN del usuario, así como la toma de información para la creación de perfiles o informar sobre los precios de la energía en horas pico o el precio en horas normales.
R03HAN01	La red HAN del usuario debe soportar programas de respuesta a la demanda desde el proveedor de servicios ya sea por medio de la infraestructura de medición avanzada AMI o desde redes externas como la internet.
R03MEDAMI01	El medidor AMI debe estar en capacidad de monitorear en tiempo real el consumo de potencia de los usuarios y enviar esos datos al proveedor de servicios para la creación de perfiles de carga, necesarios para la planeación de la generación de energía, así como para informar sobre eventos de respuesta a la demanda como precios dinámicos y control directo.
R03SMET01	El medidor inteligente en las instalaciones del usuario debe poder aceptar y mostrar por medio de dispositivos IHD, programas de respuesta a la demanda como precios dinámicos y control directo, así como la medición del consumo interno de energía para efectos de reducción en las facturas de servicio.
R03EI01	Los electrodomésticos inteligentes deben permitir el envío de información de consumo al medidor inteligente para efectos de respuesta a la demanda, así como también debe aceptar comandos remotos para desconexión y/o reducción de su consumo en horas pico. Estos electrodomésticos deben soportar direccionamiento IPv4 o IPv6 con el fin de ser direccionables desde el controlador central o Gateway.
R03GW01	El Gateway debe servir como interfaz entre la red AMI del proveedor y la red HAN del usuario con el fin de implementar estrategias de respuesta a la demanda. Esto con el fin de poder soportar el intercambio de señales y mensajes de la red AMI del proveedor con la red HAN del usuario.
R04HAN01	La red HAN del usuario debe soportar la integración de recursos energéticos distribuidos como los sistemas de generación de energía a partir de fuentes renovables como las solares o las eólicas.
R04POTUS01	La red de potencia del usuario conectada a la red HAN debe soportar la integración de tecnologías DER para abastecer la demanda interna del usuario.
R04SMET01	El medidor inteligente conectado a la red HAN del usuario debe poder medir la energía generada por las tecnologías DER como la solar o la eólica.

R04PHEV01	La red HAN del usuario debe poder integrar los vehículos PHEV a la red de potencia y emplear sus baterías para almacenar la energía generada por las fuentes renovables.
R04GW01	El Gateway de la red HAN del usuario debe poder controlar los dispositivos de generación DER, así como gestionar el consumo de energía y optimizar los costos de la energía dentro de las instalaciones del usuario.
R04DER01	Las tecnologías DER deben poder integrarse a la red HAN del usuario como medios de generación de energía para consumo local.

Tabla 8: Lista de requerimientos obtenida de SRS para la red HAN

En una primera aproximación para proponer la arquitectura de la red HAN en un entorno de Smart grid, se toma en cuenta los componentes básicos de un sistema de comunicaciones de extremo a extremo, que se describió en la sección 2.5, arquitectura de comunicaciones. En la figura 12 aparece un diagrama simplificado de dicha arquitectura con los tres dominios bien definidos, WAN (empresa de servicios públicos), NAN (que es la infraestructura AMI) y la red HAN (dominio del cliente).

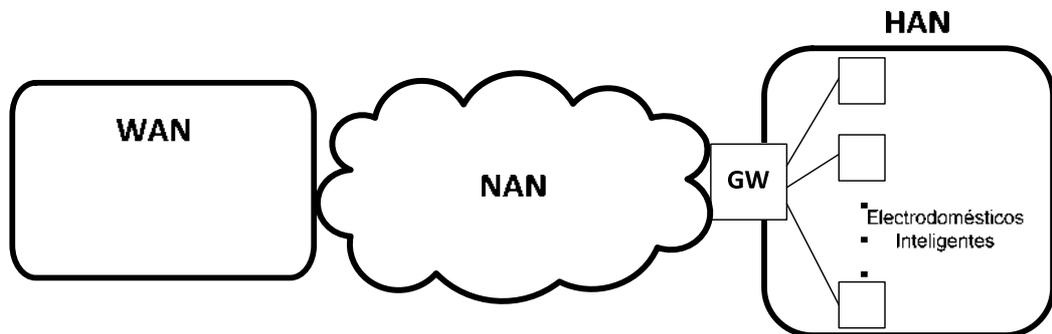


Figura 12 Componentes básicos arquitectura de comunicaciones para Smart grid

Otro aspecto importante de la arquitectura como se muestra en la figura 13, es que hay dos posibles rutas de acceso de información desde un cliente HAN a la empresa de servicios: una directamente a través de la infraestructura de medición AMI, y la otra sobre un enlace de Internet, posiblemente a través de un proveedor ISP, con ello se cumple con uno de los principios arquitectónicos descritos en la sección 2.7.

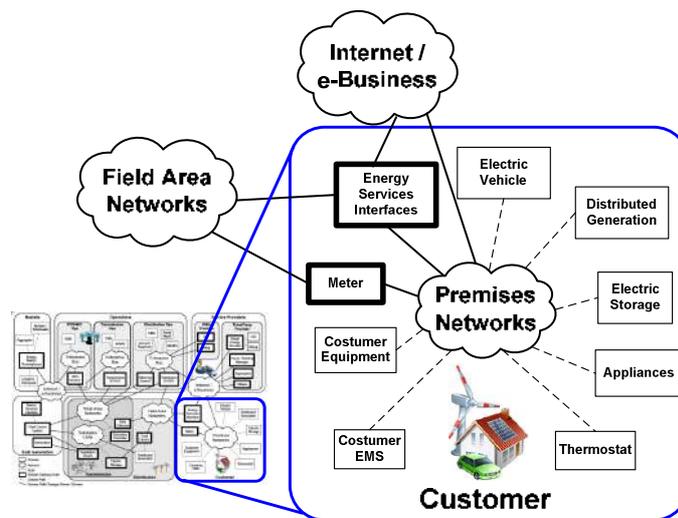


Figura 13: Dominio del Cliente, visión del NIST.

De acuerdo con la lista de requerimientos obtenida y mostrada en la tabla 8, y teniendo en cuenta los dominios de las redes de comunicaciones, y los principios arquitectónicos de la sección 2.7, finalmente en la figura 14 se muestra la arquitectura propuesta.

Unos de los Aspectos claves en la arquitectura, es que en el dominio del cliente se debe definir una plataforma centralizada para implementar las funciones de gestión de energía

en el hogar. Su papel principal es la supervisión automática de la energía consumida por los electrodomésticos inteligentes y diferentes cargas en la red eléctrica del usuario, además, de los pequeños centros de generación de energía renovable ubicados alrededor de la casa, así como la integración de los vehículos PEV.

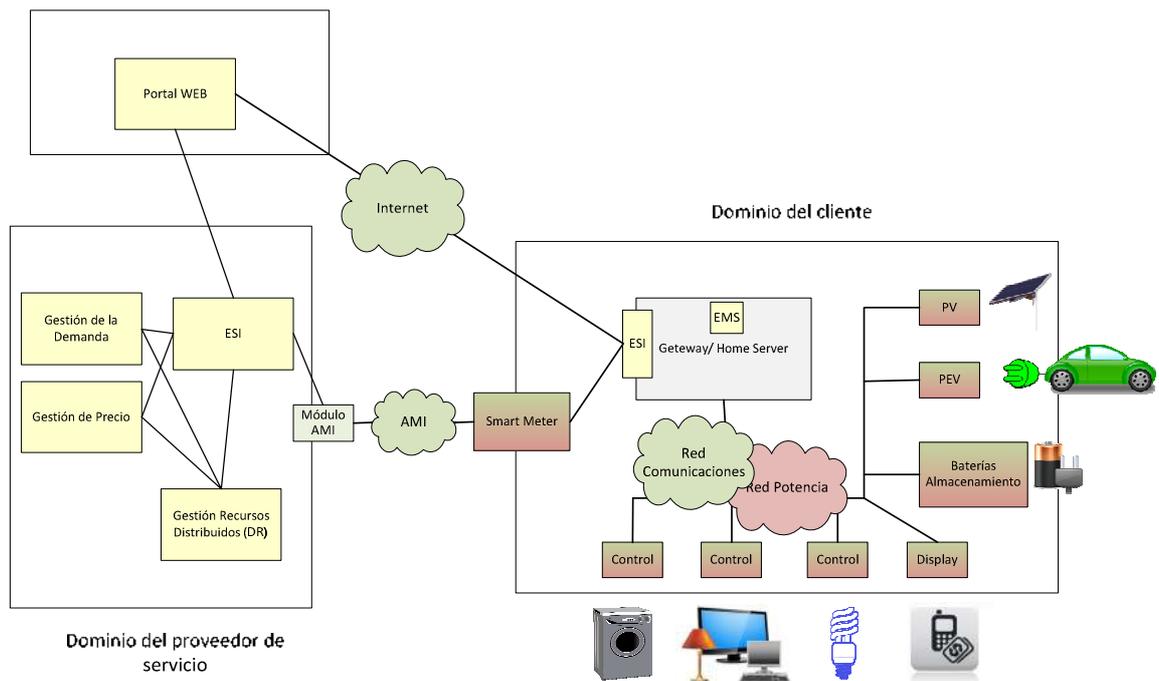


Figura 14. . Diagrama de bloques arquitectura propuesta de la red HAN para de Smart Grid.

El dispositivo de control central tiene embebida la tarea de Gateway para servir de interfaz con la red AMI del proveedor y la red HAN propiamente (que puede ser una red inalámbrica o cableada), esto, con el fin de implementar estrategias de respuesta a la demanda. Según los requerimientos, los electrodomésticos inteligentes deben ser direccionables y controlables por medio de un direccionamiento IP y ser capaces de comunicarse con el centro de control de la red HAN.

Capítulo 4: Validación de la arquitectura propuesta

4.1 Contextualización del problema

En resumen, lo que se ha discutido en los capítulos anteriores, es que la red HAN dentro del contexto de Smart Grid, estará interconectada por nuevas arquitecturas de comunicaciones y que en conjunto ayuda de la integración de nuevas tecnologías clave, como la generación de energía renovable, programas de respuesta a la demanda (DR) (habilitado por una Infraestructura AMI), los vehículos PHVE, entre otros, todo ello con el fin de lograr los objetivos principales de Smart Grid, objetivos ya discutidos a lo largo del documento. Pero el interés más sobresaliente es la reducción del consumo en el lado de la demanda durante los periodos de carga máxima. Para lograrlo es necesaria una participación más activa de los dispositivos inteligentes de la red HAN y de los mismos consumidores. Desde el punto de vista del ahorro y eficiencia energética en los hogares inteligentes, se propone una arquitectura de la red HAN basada en un controlador central capaz de supervisar automáticamente la energía de los electrodomésticos inteligentes, los centros de micro-generación de energía renovable y los vehículos PHVE alrededor de las casas y que coopera también con la infraestructura AMI del proveedor de servicios para intercambiar mensajes y señales para implementar programas de respuesta a la demanda.

Dentro de una visión a futuro de Smart Grid y en una primera fase, EMCALI (Empresas Municipales de la ciudad de Cali) a través del proyecto AMI, implementó en sus redes energéticas un sistema AMI TWACS. Los objetivos principales del proyecto es solucionar los problemas de recaudo y la reducción de pérdidas no técnicas. Dentro de las prestaciones básicas de su sistema AMI también incluye la lectura de sus 35.000 (año 2011) medidores inteligentes ya instalados. El medidor es capaz de almacenar los datos de consumo tomando muestras cada 5 minutos y enviarlas al centro de control. Precisamente usando los datos recolectados por algunos de dichos medidores, se puede analizar con mayor detalle el problema de los picos de carga que se enfrenta cualquier empresa de servicios eléctricos. En la figura 15 se muestra los perfiles de carga de 6 usuarios perteneciente a la red de EMCALI y que fueron tomados por los medidores y enviados al centro de control, los ejemplos hacen referencia a casos puntuales de usuarios residenciales en cada uno de los seis estratos. Los datos son cortesía de un ingeniero líder del proyecto.

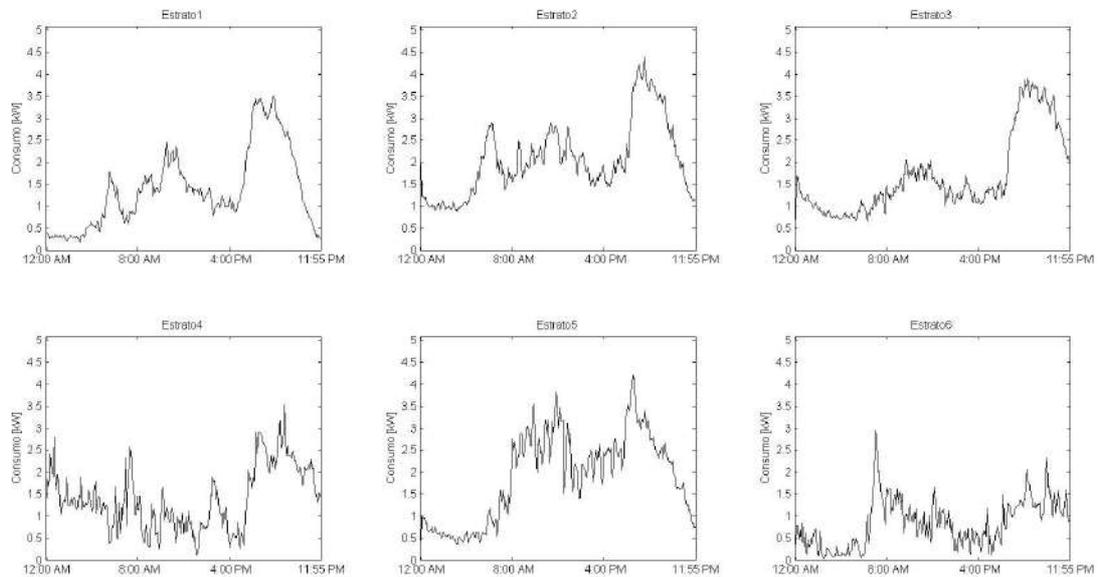


Figura 15. Ejemplo de perfiles de carga de usuarios red EMCALI en los 6 estratos.

En la mayoría de los perfiles de carga se puede apreciar las franjas horarias de mayor consumo, en la figura 16 se traza una curva correspondiente al promedio de la carga diaria de los seis usuarios residenciales de ejemplo. El periodo de menor demanda es alrededor de las 3:00am, y los picos máximos de carga aparecen entre las 7:00 y 9:00 pm.

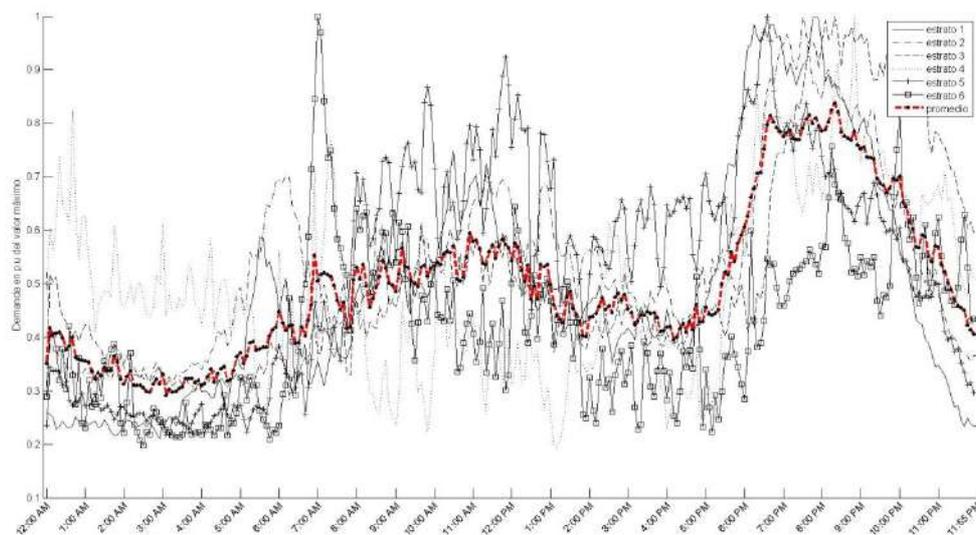


Figura 16. Perfil de demanda diaria promedio de electricidad

4.2 Entornos de Simulación

Uno de los aspectos importantes de estas nuevas redes HAN, es que estarán fuertemente basadas en el control de los dispositivos inteligentes para lograr una reducción en los precios en horas pico y estabilizar los costos cuando la oferta es limitada, así como también permitir la integración de elementos activos como los vehículos eléctricos, la generación distribuida y las fuentes de energía alternativas, todo ello de acuerdo a los requerimientos definidos en el capítulo 3.

Por tal razón, es esencial que el diseño propuesto se evalúe cuidadosamente antes de la implementación y el despliegue a gran escala y así tener una mejor base para medir el impacto y la eficacia de las redes HAN, y en este punto la simulación es un elemento clave. Por un lado, tanto las redes de comunicación, algoritmos de la capa de aplicación y parámetros de las redes de potencia han sido ampliamente simuladas. Para el caso de las redes inteligentes específicamente las redes HAN, se hace necesario un acoplamiento de varios dominios para lo cual, se requieren de herramientas de simulación flexibles.

El entorno de simulación utilizado para probar algoritmos de aplicación y modelamientos de los sistemas de potencia es MATLAB®. Los simuladores frecuentemente también son usados en el contexto de la investigación en las tecnologías de la información y las comunicaciones como ns-2 y OMNeT++, que presentan una buena escalabilidad. Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el entorno de simulación modular basado en OMNeT++, donde se hace uso de los modelos existentes de la red de comunicaciones de la extensión INET y MiXim, y se implementa los algoritmos de la red inteligente en MATLAB®. y se modela la parte de potencia en un componente de MATLAB® llamado MatPower, más detalles de dicho componente se encuentra en Zimmerman (2010).

4.3 Diseño del Entorno de simulación

El entorno de simulación de la arquitectura propuesta está diseñado como una arquitectura en niveles en la que se definen tres bloques: aplicación, comunicaciones y potencia. El modelo se ilustra en la figura 17.

La capa de aplicación está compuesta de aplicaciones de servicios, principalmente algoritmos de respuesta a la demanda, requiriendo otros servicios como lectura de contadores o mensajes de precios, entre otros. Los servicios de la capa de aplicación hacen uso de una capa de soporte, compuesta principalmente por la red de comunicaciones, la cual incluye una interfaz que se puede emplear por cualquier servicio para enviar mensajes entre componentes independientes de la tecnología de red que se va a simular, (ZigBee o PLC, TCP o UDP), como también el descubrimiento de dispositivos o servicios, etc. El objetivo de esta capa de red

es soportar una amplia gama de aplicaciones, reduciendo al mínimo el esfuerzo necesario para desarrollar estos servicios de aplicación, los insumos con los que se alimentan la simulación son los perfiles de carga de los usuarios y varios escenarios que se explicarán más adelante, un diagrama del uso de los entornos de simulación es mostrado en la figura 18.



Figura 17. Modelo de Simulación visto por capas

La comunicación entre servicios es simulada por el componente de red, el cual ofrece modelos de simulación para diferentes tipos de medios físicos y protocolos de comunicación.

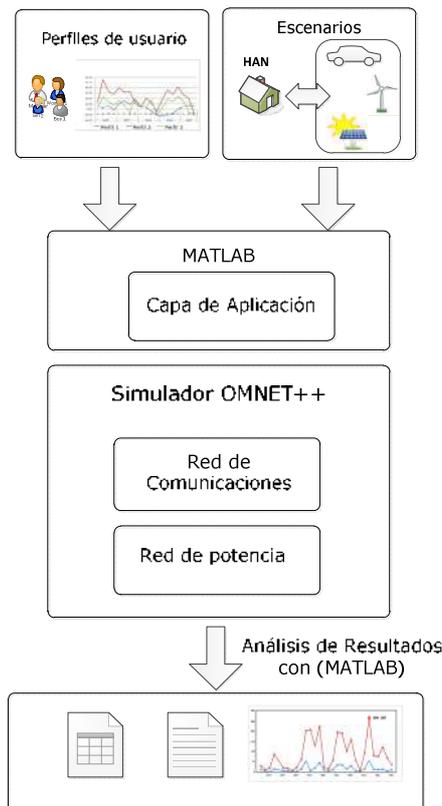


Figura 18 Entornos de Simulación en el Modelo de Simulación

La simulación para arquitectura de comunicaciones propuesta, estará formada por bloques de construcción principales denominados Módulos o Nodos, que pueden modelar tanto componentes eléctricos como de comunicaciones. Dichos módulos están desarrollados en OMNET++ y son los encargados de la configuración de las capas con base en los parámetros de los archivos de configuración .ini. Desde la capa de aplicación desarrollada en MATLAB®, se importan los perfiles de carga y preferencias del usuario que están definidos en archivos de Excel.

4.2.1. MATLAB

MATLAB® es un sistema computacional basado en matrices para cálculos científicos y de ingeniería. También se puede considerar como un entorno matemático de simulación que puede emplearse para modelar y analizar sistemas. Es muy útil para estudiar sistemas continuos, discretos, lineales y no lineales. (MathWorks, s.f)

MATLAB es un entorno abierto para el cual se han desarrollado varios paquetes adicionales. Tales paquetes están constituidos por un conjunto de funciones que pueden ser llamados desde el programa y por medio de los cuales se pueden realizar una gran cantidad de análisis. En el presente trabajo se utiliza para dos tareas principalmente: Por un lado, implementar los algoritmos de respuesta a la demanda e integración DER. Y segundo, para la parte de análisis y visualización de resultados.

4.2.2. OMNET++

OMNeT++ es un simulador modular de eventos discretos de redes orientado a objetos, usado para modelar el tráfico de redes de telecomunicaciones, protocolos, sistemas multiprocesadores y distribuidos, validación de arquitecturas hardware, evaluación del rendimiento de sistemas software y, en general, cualquier sistema que pueda simularse con eventos discretos.

Esta herramienta está disponible tanto para sistemas operativos basados en UNIX como para Windows y se distribuye bajo la Licencia Pública Académica. (OpenSim Ltd., 2011)

Cualquier sistema que se desee simular en OMNeT++ requiere básicamente los siguientes elementos:

4.2.2.1 Módulos simples y compuestos

Módulos simples y compuestos. Son las estructuras de datos escritas en lenguaje topológico NED y entre los que existe una relación jerárquica. Por un lado, van a describir a los distintos elementos integrantes del sistema y por otro van a diseñar las topologías de red para la simulación. Una de las principales características de los módulos, es que pueden contener parámetros que son usados principalmente para pasar datos de configuración a módulos simples y ayudar así a definir la topología del modelo. Ver figura 12.

Los módulos son los elementos activos en un modelo y son por tanto, los elementos mas simples dentro de un módulo jerárquico: ellos a su vez no a pueden ser divididos, pero si se pueden agrupar dos o más módulos simples y/o compuestos, permitiendo obtener un sistema de niveles jerárquicos ilimitado hasta definir el de máximo nivel que es la propia red de simulación. (Varga, 2010)

4.2.2.2 Objetos e instancias C++

Objetos e instancias C++ de los módulos simples que van a hacer uso de la librería de simulación de OMNeT. La implementación la funcionalidad de un módulo simple se realiza por medio de los métodos heredados de la clase `cSimpleModule`. Las rutinas básicas que van a aparecer en todo módulo simple son el método de inicialización `initialize()` que se encarga de inicializar todas las variables y parámetros del módulo, el método de tratamiento de mensajes `handleMessage()` el cual es la rutina más importante y es donde va toda la funcionalidad del módulo y por último el método de finalización `finish()` que es opcional y se invoca cuando las simulaciones han finalizado exitosamente y se emplea para recopilar resultados en un archivo. (Varga, 2010)

4.2.2.3 Mensajes.

Son estructuras de datos codificadas en archivos `.msg` que posteriormente a serán convertidos a clases C++. Los mensajes pueden ser mensajes externos, los cuales se usan para intercambiar datos entre los distintos módulos simples como tramas de usuarios y mensajes internos (`selfMessages`) que se emplean para temporizadores. (Varga, 2010)

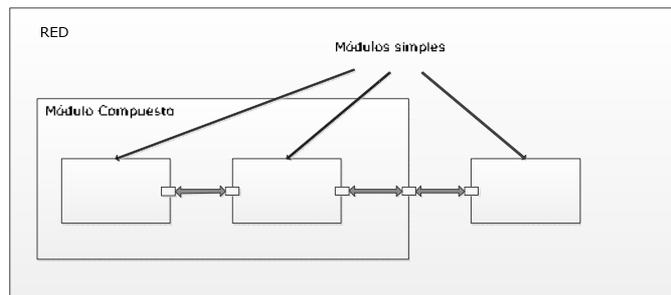


Figura 19 La estructura del modelo en OMNeT ++

4.3 Modelado de la capa de aplicación en Matlab

4.3.1 Descripción de la estrategia propuesta de Respuesta a la Demanda.

La filosofía general de la gestión de carga en el lado de la demanda lo que busca es balancear la oferta de energía con la demanda y reducir los picos en periodos de máxima carga. En este sentido, la empresa de servicios de energía eléctrica pueden desarrollar diferentes estrategias para el control de carga, tales como: el control local, el control directo y de control distribuido. Se debe tener en cuenta que dichas estrategias necesitan acceso en tiempo real a la información de consumo de los aparatos dentro del hogar.

En general la empresa de servicios implementa la respuesta de la demanda para mantener la demanda de electricidad por debajo de un cierto nivel. De acuerdo a lo observado en los diferentes perfiles de carga de la sección 4.1, debe haber varias formas de determinar los valores límite de demanda para asignarlos a los diferentes hogares en periodos específicos del día. Además dichos niveles límite de demanda puede ser flexibles y puede cambiar en tiempo real en función de las señales de precios de la electricidad u otros factores definidos por la empresa de servicios. En la validación presentada en el presente trabajo, se considera un esquema de precio de la electricidad variable. Entonces la red HAN, periódicamente debe recibir desde el centro de control de la empresa de servicios información de una variable de costo de la electricidad que debe ser proporcional a la demanda para lograr un factor de penalización en el uso de la electricidad en los periodos picos y dar prioridad a las horas de menor carga. Con un simple proceso de “cuantización” efectuado a los datos históricos de consumo diario, el centro de control de la empresa de servicios puede estimar el costo de la electricidad para cada periodo de tiempo.

En la figura 20 se muestra que la estrategia de asignación de precios se puede realizar a nivel de usuario individual. Pero también se realiza teniendo en cuenta la demanda agregada de varias residencias en un sector o pertenecientes a una misma subestación y entonces definir a nivel global dichos costos (ver figura 18).

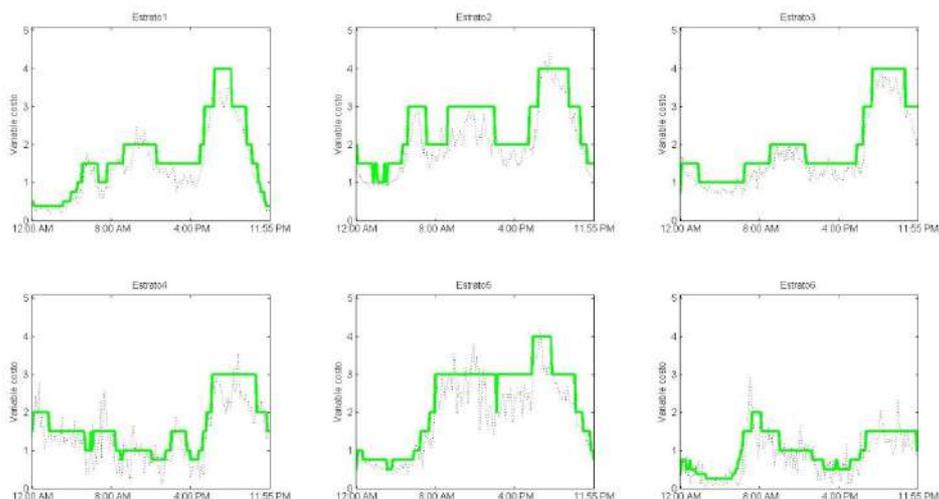


Figura 20. Curvas de costo variable para diferentes perfiles de carga.

Cabe resaltar que los valores que toma la variable costo puede o no corresponder al precio real en pesos del kWh de la energía consumida que cobra la empresa de servicios. El rango puede variar pero la forma de la curva sería similar, los cambios de rango de dichos valores se hacen para efectos del algoritmo de control de carga que se explica en la sección siguiente.

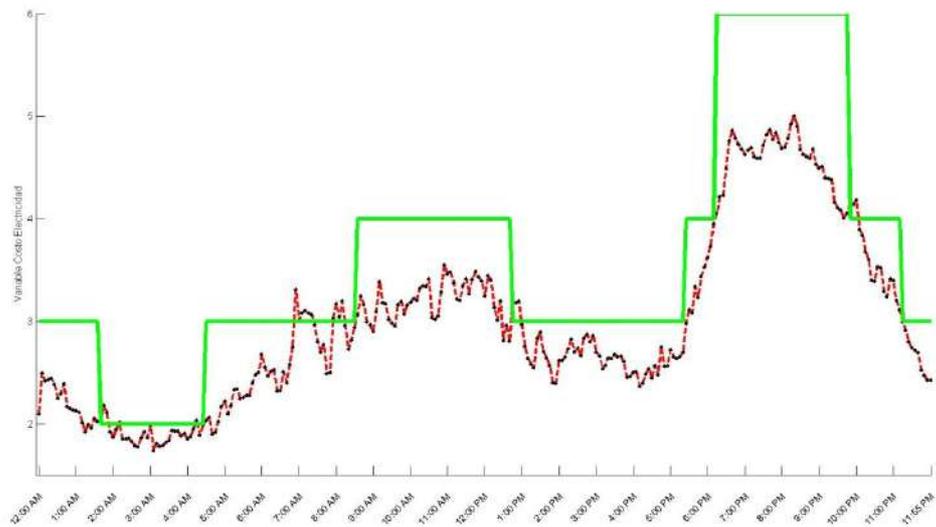


Figura 21. Curva diaria de precio variable para demanda agregada.

Una vez que el control central (Gateway) HAN recibe esta señal de precios variables, la respuesta de la demanda se realiza a nivel de los dispositivos inteligentes, reprogramando la hora de inicio de algunos aparatos teniendo en cuenta las preferencias de usuario, prioridad de carga y factores de confort preestablecidos como se describe más adelante.

La capacidad de la toma de decisiones del Controlador Central HAN reside en su algoritmo de programación que automáticamente programa las tareas diarias de los usuarios de acuerdo a los precios de la electricidad para intervalos regulares del día y que son enviadas por el proveedor. Las actividades diarias de un hogar pueden ser caracterizadas por una lista de tareas para ser programadas en intervalos de tiempo de preferencia dado por el usuario. Algunas de estas tareas son persistentes, es decir que consumen electricidad durante todo el día (por ejemplo, el refrigerador), mientras que otros permiten algo más de flexibilidad en un intervalo de tiempo razonable (por ejemplo, lavadora / secadora).

En el programa que implementa el algoritmo de programación, una tarea se define como la demanda de energía de una carga específica, dicha tarea se representa como una estructura de datos con campos para la hora de inicio, hora de finalización, potencia de consumo por periodos del día y la duración total de la tarea. En la tabla 9, se muestra los campos de información para 14 tipos de carga ejemplo que se usarán para comprobar el algoritmo.

Tabla 9: Caracterización de la información cargas para el algoritmo de programación

	Nevera	Iluminación zona 1	Iluminación zona 2	Iluminación zona 3	Televisión 1	Televisión 2	E. Cómputo	Horno Microondas	Lavadora	Acondicionad	Ducha Eléctrica	Plancha	Ventilador	Carga PHEV	Otras Cargas
Pot Nom [W]	61	110	260	114	40	58	254	120	220	500	1500	900	89	200	223
time slot inicio	1	33	34	36	14	37	37	22	14	20	13	16	36	1	1
time slot final	48	43	45	46	26	48	43	26	42	32	15	24	46	48	48
duración	48	10	11	10	12	11	6	1	2	9	1	4	10	10	48
programa inicio	1	12	34	36	14	37	37	23	38	22	13	20	36	35	1

Para el escenario de un típico cliente residencial algunos valores de carga nominal se tomaron de acuerdo a la tabla 10.

Tabla 10 Consumo promedio mensual de energía en los estratos 1, 2 y 3. (UNAL, 2006, página 34)

Equipo	Consumo kWh/mes/hogar en cada ciudad			
	Bogotá	Medellín	Barranquilla	Pasto
Iluminación	36.2	25.0	24.8	34.3
Televisor	8.2	7.8	11.7	6.9
Nevera	44.1	55.0	60.0	29.0
Plancha	10.7	9.4	9.0	7.7
Licuadaora	1.2	1.0	1.9	1.7
Lavadora	12.7	12.7	3.8	5.2
Ducha electrica	63.1			62.8
Ventilador			42.7	
Total	176.2	111.0	153.9	147.6

La figura 22 se ilustra la misma información mostrando la programación de tareas para los diferentes tipos cargas. El objetivo es encontrar una asignación óptima de tareas a intervalos de tiempo tal que se minimice la demanda en los periodos picos de carga haciendo un desplazamiento a periodos de no picos, esta programación se hace sobre las cargas no persistentes.

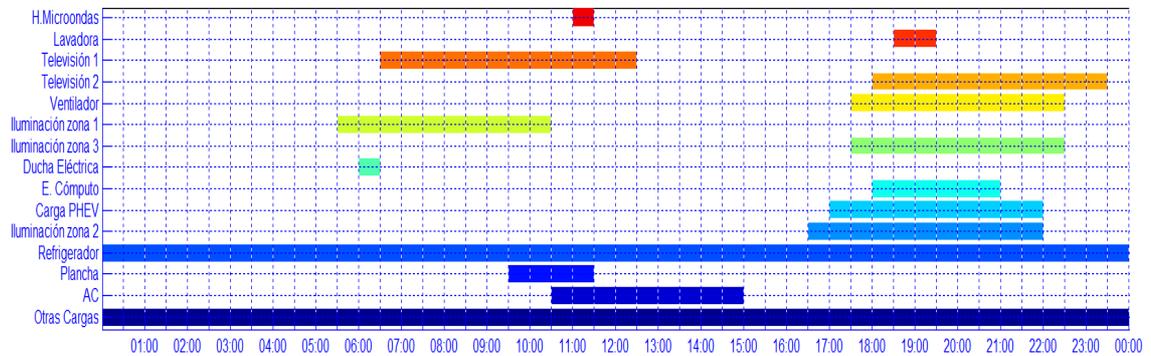


Figura 22: Asignación de cargas por time slot

Para resolver el problema de asignación óptima se consideró la generalización del clásico problema de P||Cmax (asignar n tareas a m procesadores idénticos en paralelo, reduciendo al mínimo la carga de cada procesador) que surge cuando el número de tareas que se pueden asignar a cada procesador no puede exceder un entero k dado. El problema se basó en el algoritmo de optimización de Greedy (Dell'Amico, 2004). El cual consiste en el conocido algoritmo LPT (Longest processing time).

Denotamos $N = \{1, \dots, n\}$ como el conjunto de electrodomésticos a programar, y $M = \{1, \dots, m\}$ como el conjunto de intervalos de tiempo.

En el algoritmo, primero se define una matriz X_{ij} , $i \in N$, $j \in M$, que es una variable que representa el estado de activación del electrodoméstico i en el intervalo j con valores 0 o 1, representado el estado inactivo y activo respectivamente. Como se definió al inicio de esta sección, se define una función de costo C_j de la energía, que representa las señales de precio que envía el la empresa de servicio.

Entonces el costo del electrodoméstico i para operar en el intervalo j se define como $F_{ij} = P_i C_j$. En esencia el algoritmo de programación busca desplazar las cagas a otros intervalos de tiempo de tal manera que minimice los picos de carga, es decir un clásico problema minimax:

$$\min (\max \sum_{i,j} F_{ij} X_{ij})$$

Pero con varias restricciones de optimización, como por ejemplo que los intervalos asignados a un electrodoméstico deben ser continuos, además tener en cuenta las franjas de preferencia del usuario y los dispositivos persistentes como se mencionó al inicio, por tal razón se aplica una variante del algoritmo. En el anexo

Se proporciona el script de Matlab que implementa el algoritmo en mención. (*AlgoritmoProgramacionCargas_greedy.m*).

A continuación se muestra el algoritmo de optimización utilizado, el cual inicialmente organiza n trabajos en orden descendente del tiempo de procesamiento y entonces corre el algoritmo programación de la lista de tareas. Es decir que el balanceo de carga consiste en programar N electrodomésticos en M intervalos de tiempo de igual tamaño. En esta solución se toma intervalos de 30 minutos.

```

Lista de programación LPT ( $m, n, t_1, t_2, \dots, t_n$ ) {
    Organizar cargas de manera descendente  $t_1 \geq t_2 \geq \dots \geq t_n$ 
    For  $i = 1$  to  $M$  {
         $L_i \leftarrow 0$       ← Carga eléctrica sobre el intervalo de tiempo  $i$ 
         $J(i) \leftarrow \emptyset$  ← Cantidad de electrodomésticos asignados al intervalo  $i$ 
    }
    For  $j = 1$  to  $N$  {
         $i = \operatorname{argmax}_k L_k$  ← Intervalo de tiempo con la mayor carga
         $J(i) \leftarrow J(i) \cup \{j\}$  ← Asignar carga del electrodoméstico al intervalo  $i$ 
         $L_i \leftarrow L_i + t_j$       ← Actualizar carga eléctrica  $i$ 
    }
}

```

En el contexto de control de la demanda en el lado del cliente, las n tareas correspondería a n electrodomésticos inteligentes para ser programados. Los m procesadores se reemplaza por m intervalos de tiempo correspondiente a las horas del día. En la figura 23 aparece la programación inicial de las tareas para los diferentes electrodomésticos donde se observa que la mayoría de las cargas se concentran en los intervalos de hora pico. El propósito del algoritmo es obtener una nueva programación óptima de las tareas con el objetivo de minimizar los picos de carga acumulada.

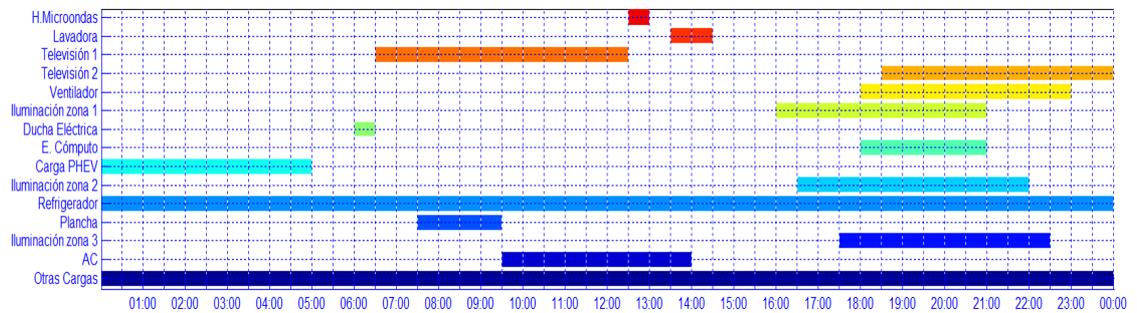
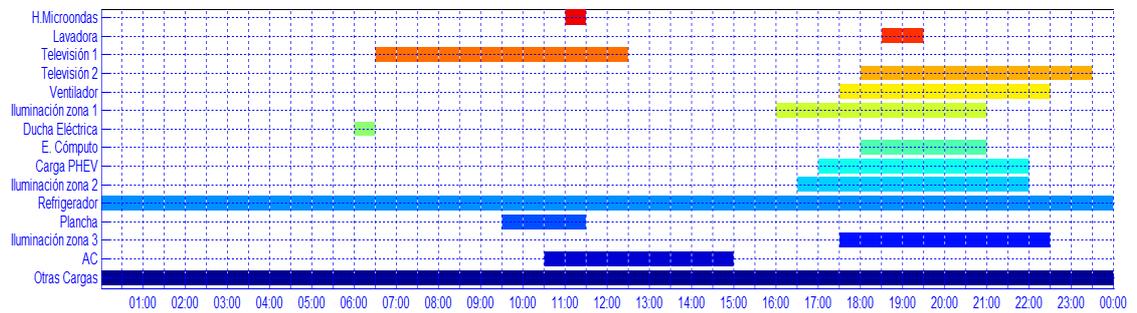


Figura 23. Resultado del control de la demanda usando el algoritmo de programación de tareas

En la figura 24 y 25 se contrasta el perfil de carga inicial con el obtenido aplicando el algoritmo de programación. Se observa que los dos picos de carga se reducen, el primero que parece entre las 11:00am y 12:00m se reduce en un 42%. La segunda franja pico entre las 6:30 p.m. y 8:00 p.m. se reduce en un 22%. Esta tendencia se debe principalmente a los efectos de la función de costo donde el precio de la energía es muy alto en las franjas de demanda pico, en este ejemplo esta entre las 7:00 p.m y 10:00 p.m. En la misma figura se puede observar la curva de función de costo, teniendo en cuenta que las unidades son diferentes para efectos de visualización.

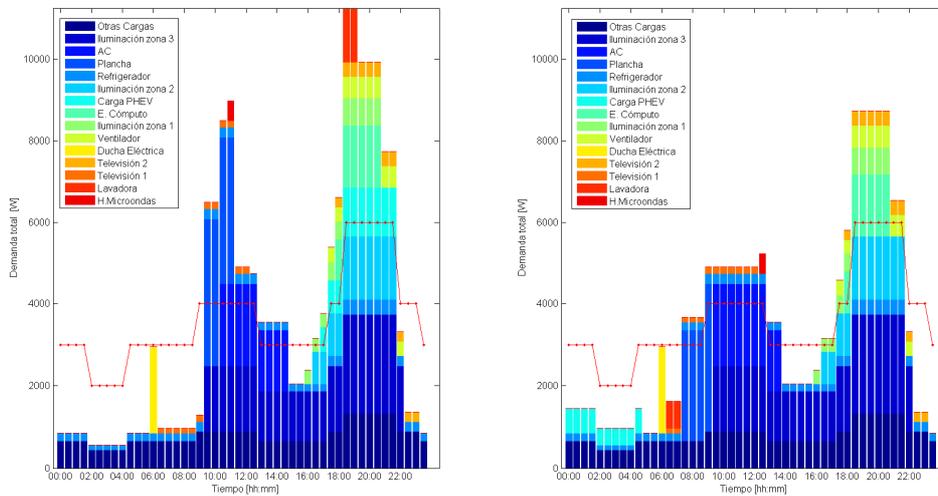


Figura 24 Efecto de la señal de costo en el desplazamiento automático de cargas

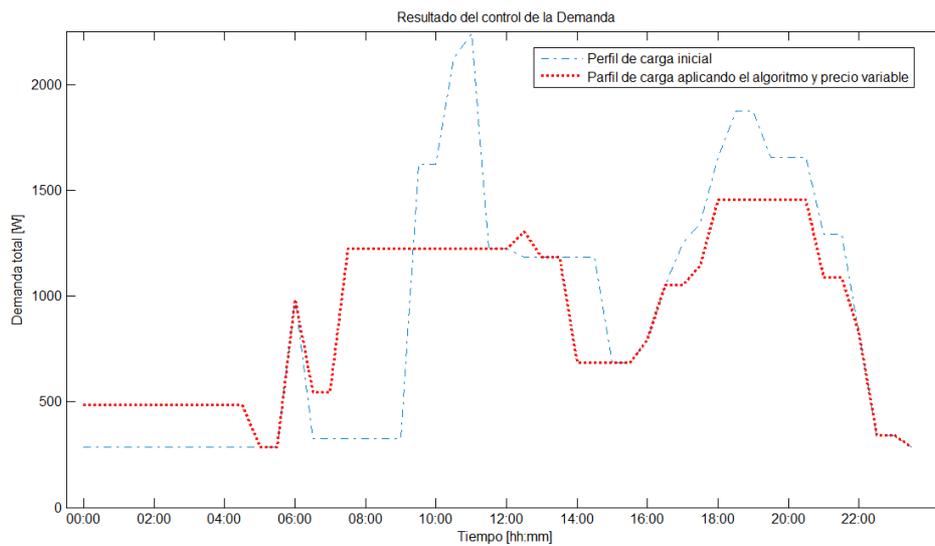


Figura 25: Reducción de los picos de demanda. Perfiles de carga resultante después de aplicar el algoritmo de programación de cargas por precio variable.

En la figura 26 se muestra un segundo ejemplo de programación basándose en la lista de programación inicial pero con otro perfil de preferencias de usuario.

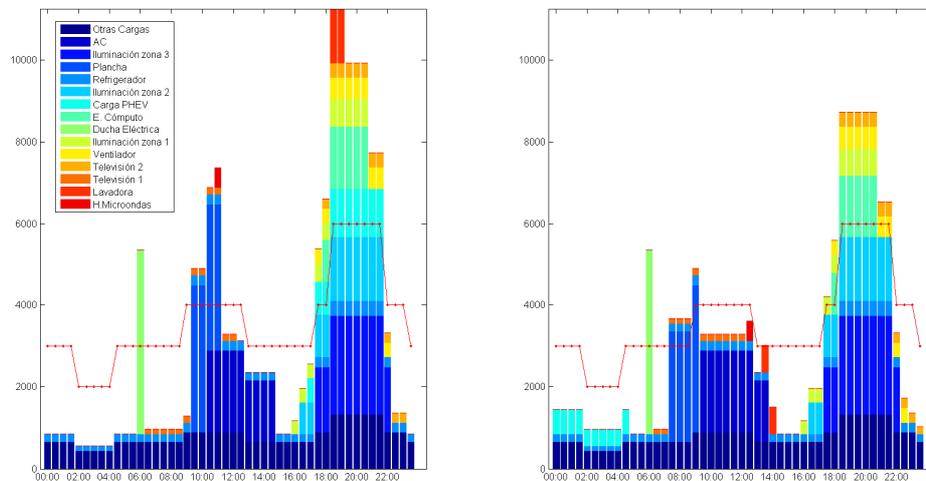


Figura 26 Ejemplo 2, efecto de suavizado de los periodos de carga máxima por desplazamiento de carga.

4.3.2 Integración de sistemas de Generación Distribuida.

En la generación distribuida se pueden identificar cuatro tipos de aplicaciones básicas definidas como: generación para carga base, generación para carga en picos, generación aislada y generación para soporte de la red de distribución (colombiainteligente, 2007, página 100). En el contexto de este trabajo se realiza la simulación para evaluar el impacto de la integración de las fuentes renovables a la red HAN usando la estrategia de generación para reducir los picos de carga. Este método se aplica sobre el perfil de carga mejorado obtenido en la sección 4.2.

El modelo de simulación usado para calcular la cantidad de energía que se puede utilizar en la residencia o que es almacenado en las baterías para uso posterior, especialmente en los picos de carga, se explica en el anexo 3. A continuación se explica brevemente los componentes del modelo de simulación

Modelo del sistema Fotovoltaico

La radiación solar estimada varía para cada día y depende además de la posición del sol y de factores ambientales. Los datos de radiación solar en la ciudad de Cali se obtuvieron a través de una herramienta software, HOMER¹ (Energy

Modeling Software for Hybrid Renewable Energy Systems) que se utiliza para el diseño y análisis de sistemas de energía híbridos, los cuales contienen una mezcla de los generadores de energía convencionales, combinados con fuentes de energía renovable como turbinas eólicas y energía solar fotovoltaica entre otros.

En la figura 27 aparece una impresión de pantalla de la ventana de determinación de fuentes solares, allí permite determinar la ubicación (latitud y longitud) de la zona geográfica en la cual se realizará la implementación del sistema de paneles solares fotovoltaicos.

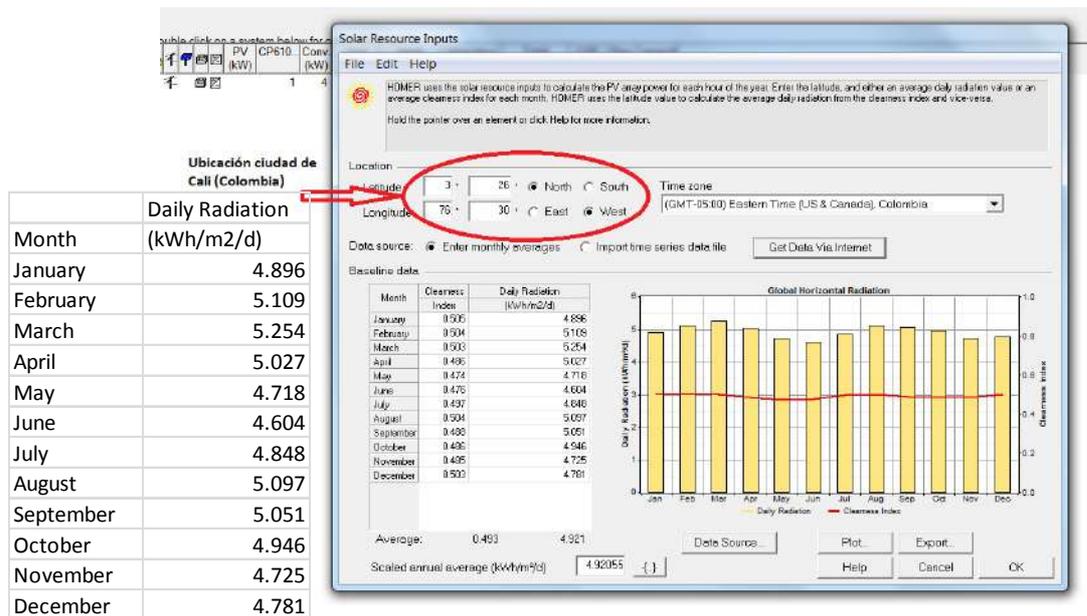


Figura 27 Información de radiación solar en la ciudad de Cali

La radiación entregada por la herramienta en unidades de kWh/m2/d en intervalos de una hora necesita ser convertida, esta conversión se realiza en el script de Matlab, a continuación en la figura 28, se da un ejemplo tomando el valor promedio del mes de julio que es 4.848 kWh/m2/d:

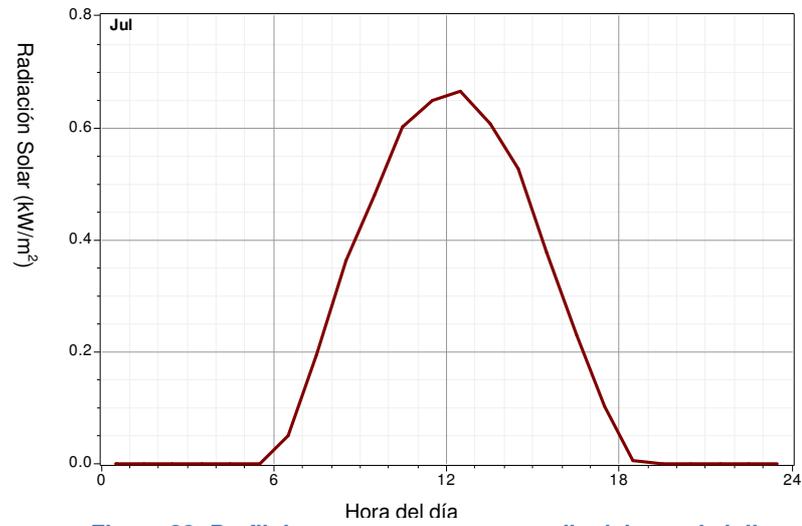


Figura 28: Perfil de radiación solar promedio del mes de julio.

En la figura 29 se muestra los perfiles de radiación promedio para los diferentes meses del año.

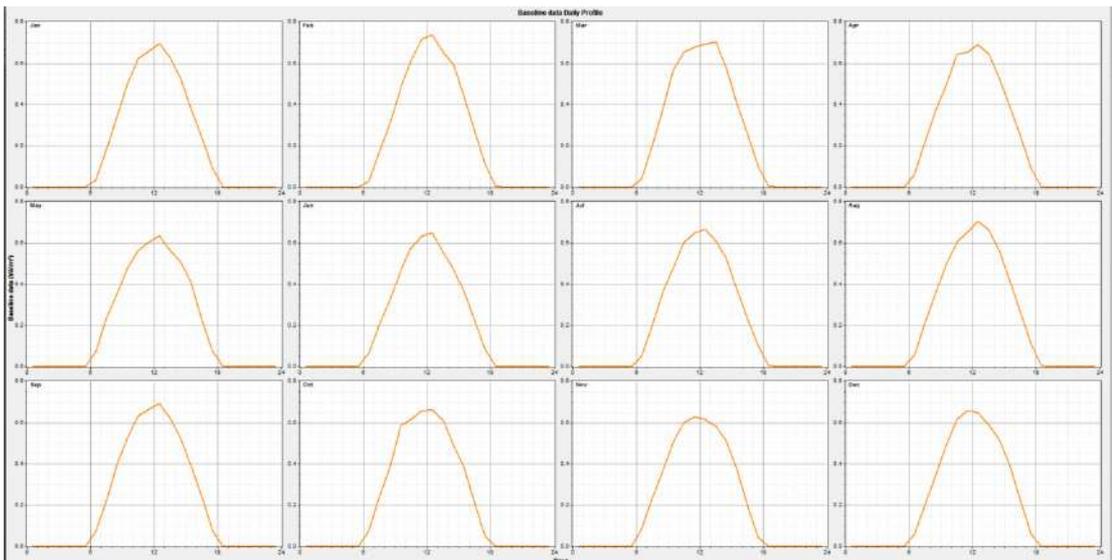


Figura 29. Perfiles de radiación solar diaria promedio meses del año

La potencia total del panel solar (en Watts) está dada por la siguiente expresión

$$P = A_{PV} \cdot I_S \cdot M_f \cdot \eta_{PV}$$

Donde

A_{PV} Área total de las celdas en m^2 ($20 m^2$)

I_s Radiación solar en W/m^2 (ejemplo figura 1)

M_f Factor debido al ángulo del montaje de los paneles (0.9)

η_{PV} Coeficiente de eficiencia del panel solar (0.12)

Aplicando la ecuación anterior se obtiene un curva típica calcula para la potencia entregada por arreglo de paneles solares se muestra en la figura 30.

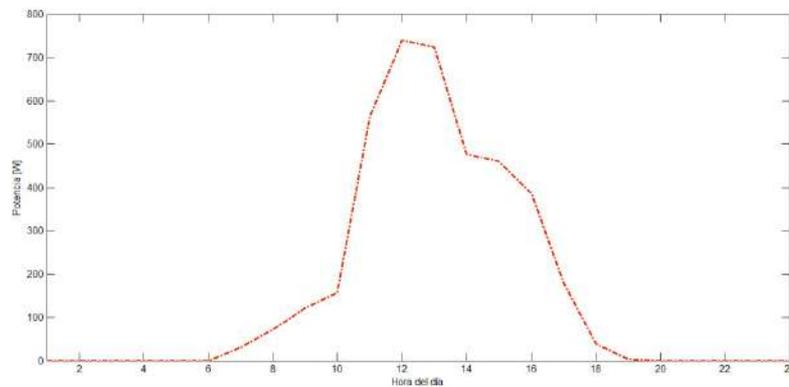


Figura 30 Curva típica de salida de un Panel Solar

Se basa en un modelo para el sistema de almacenamiento de energía, que incluye las baterías teniendo en cuenta el factor de carga y descarga.

Basándose en los resultados obtenidos en el algoritmo de desplazamiento de carga presentado en la sección 4.2, se realiza luego un ajuste para que el controlador central de la HAN realice la gestión de la energía. Para ello determina el total de energía consumida por los electrodomésticos, el total de energía renovable disponible, la función de costo (precio variable) y la energía almacenada en las baterías.

En la figura se muestra el resultado de incluir a la red HAN el esquema de generación distribuida y la energía almacenada en las baterías.

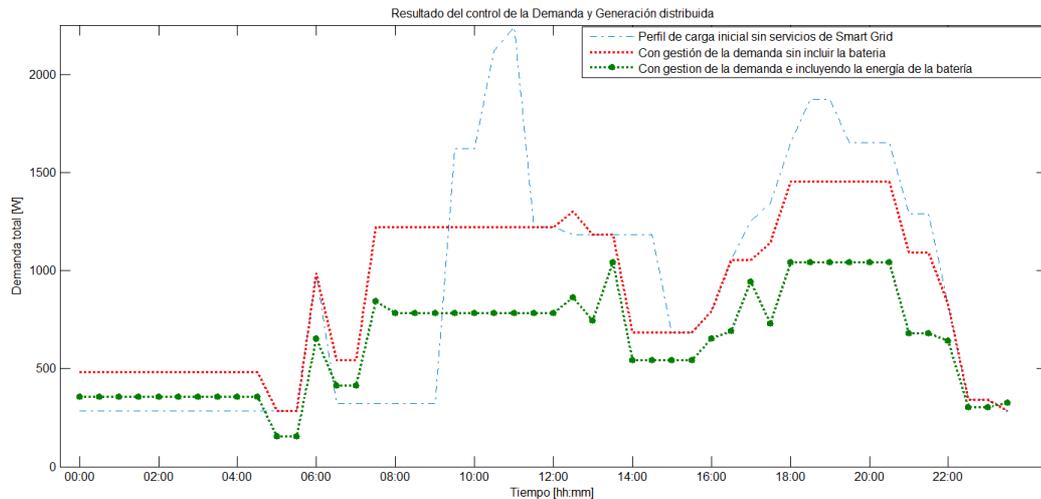


Figura 31 Resultado de reducción de los picos de carga por el control de la demanda y generación distribuida

Se observa las tres curvas de carga. El perfil de carga inicial sin servicios de smart grid (línea punteada azul), luego la curva (de color rojo) al aplicar solamente el algoritmo de desplazamiento de carga, donde se obtiene un aplanamiento de la curva, es decir, una reducción de los picos de demanda, pero los resultados son mejores cuando además se incluye la energía almacenada en las baterías, las cuales fueron cargadas usando el sistema foto voltaico. Comparando la primera y última curva (línea verde) se obtiene una reducción del pico de entre el 18% y el 40%. Si se implementa ésta técnica en la mayoría de los usuarios, el control de la demanda significaría un gran ahorro para los consumidores, pero además una reducción de los picos de carga acarreado los beneficios ya discutidos respecto a smart grid.

4.4 Modelado del dominio de Red de Comunicaciones

Existen varias librerías disponibles que sirven como extensiones de OMNeT++ y que adicionan modelos de simulación para protocolos de redes cableadas e inalámbricas. En la fase de simulación se usó el framework de INET y el de Miximes. Por un lado INET es una librerías que ofrece varios modelos para simulación de protocolos de red, entre los que se incluyen redes ad-hoc inalámbricas y por cable (LAN, WAN), 802.11, UDP, TCP, IP, IPv6, Ethernet, OSPF, MPLS, RSVP, etc. Los protocolos de INET están representados por módulos simples OMNeT++ que se pueden combinar para formar Hosts y otros

dispositivos de red (routers, Access points). (INET Framework, s.f). Por otro lado Mixim [4], combina diversos marcos de simulación desarrollados para la evaluación de redes móviles e inalámbricas en OMNeT++. Este framework proporciona modelos y protocolos detallados, así como soportes de infraestructura. Mixim está diseñado para soportar la simulación de redes con más de 1000 nodos de bajo consumo de memoria y potencia con una estructura modular que permite agruparlos en capas, y asignar valores a sus parámetros.

4.4.1 Descripción Módulos de simulación

La figura 32 muestra la red HAN propuesta para la simulación. A grandes rasgos, se puede observar lo siguientes módulos: Un modelo ambiental que se encuentra contenido en el módulo utility del mundo (world), que se utiliza principalmente para recoger los parámetros globales, como las dimensiones de la red (zona de incidencia), ya sea en 2D o 3D, etc. En la figura también se muestra un etherhost, un wlanhost y varios 802.15.4host .

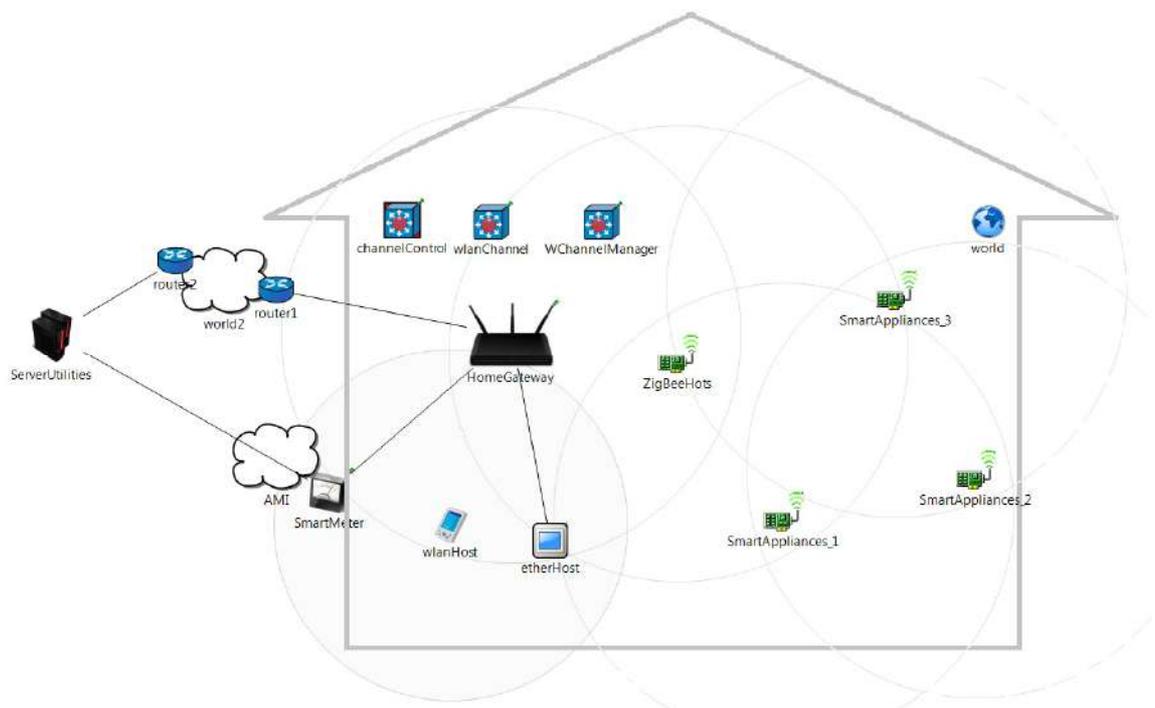


Figura 32: Red HAN propuesta en el entorno OMNET++

En la parte superior aparecen tres módulos de tipo “ConnectionManager” que son los encargados de administrar de forma dinámica las conexiones entre los nodos de una tecnología específica. Este módulo conoce la posición de todos los nodos y se puede consultar las posiciones de los objetos desde el ObjectManager. En el diseño se soporta tres de estos administradores de conexión, ya que existen diferentes tipos de redes a través de medios guiados y no guiados. Es decir que dentro de la red HAN, el controlador central, propiamente el Gateway, es el intermediario de tres tipos de redes da acceso: conexiones WLAN, Ethernet y 802.15.4.

Finalmente, una red también contiene nodos, es decir, entidades que deseen comunicarse entre sí. Existe nodos como el controlador central que puede tener diferentes capacidades de comunicación, como por ejemplo IEEE 802.15.11 e IEEE 802.15.4 pero además otros nodos más simples con una sola interfaz de acceso, como los host WLAN , Ethernet y nodos 802.15.4.

4.4.1.1 Los módulos de nodo IEEE 802.15.4

Para explicar cómo es la estructura interna de un módulo nodo IEEE 802.15.4 en OMNET, puede verse la Figura 33a. El modelo muestra las capas básicas de acuerdo con el esquema de TCP/IP, es decir, la capa de aplicación (app), la capa de red (net), la capa MAC (mac), y la capa física (phy). La capa física es la encargada de la recepción y manipulación de colisiones. Las capas adyacentes están conectadas por medio de compuertas OMNeT++. Por medio de estas compuertas se pasa los mensajes de datos de arriba y abajo como en una red real, incluyendo los mensajes de control entre los nodos. Estas compuertas también se utilizan para intercambiar mensajes de control entre las mismas capas, necesarias para soportar el control de la comunicación.

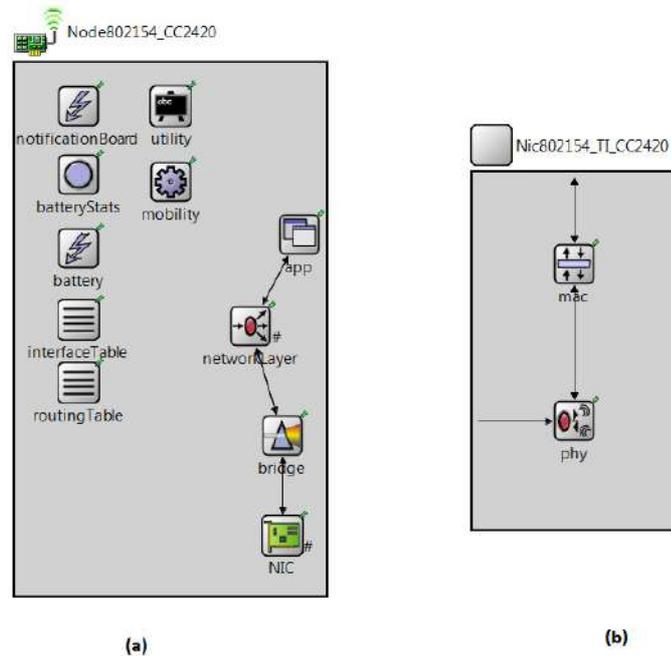


Figura 33: (a) Nodo base de IEEE 802.15.4 (b) Tarjeta NIC base de un nodo 802.15.4

Teniendo en cuenta que la capa física y la capa MAC se agrupan en un módulo de tarjeta de interfaz de red (NIC) (Figura 27 b). El diseño de la capa física y MAC suele estar fuertemente acoplados y es muy específico para las diferentes técnicas de comunicación. Aunque sólo se muestra una NIC en la Figura 33a, un nodo puede tener varias tarjetas de red. Por ejemplo., el módulo “Controlador central” de la red de la figura 34, es modelado con tarjetas de red diferentes, como Ethernet, IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4.

El módulo mobility es el responsable de los movimientos de un nodo o un objeto. Los detalles del modelamiento de la movilidad y la implementación básica en (ANEXO 2). El módulo battery es usado para temas relacionados con la energía. Para un nodo sensor, por ejemplo, sirve para simular la descarga de la batería debido a la comunicación y el procesamiento. El módulo ARP se encarga del protocolo de resolución de direcciones (ARP), es decir, la traducción entre direcciones de red y MAC.

El módulo utility posee dos tareas principales: proporciona una interfaz general para la recolección de datos estadísticos de una simulación y mantiene parámetros que deben ser consultados por más de un módulo dentro de un nodo.

Un ejemplo es la posición de un nodo, que se calcula y se actualiza por el módulo mobility.

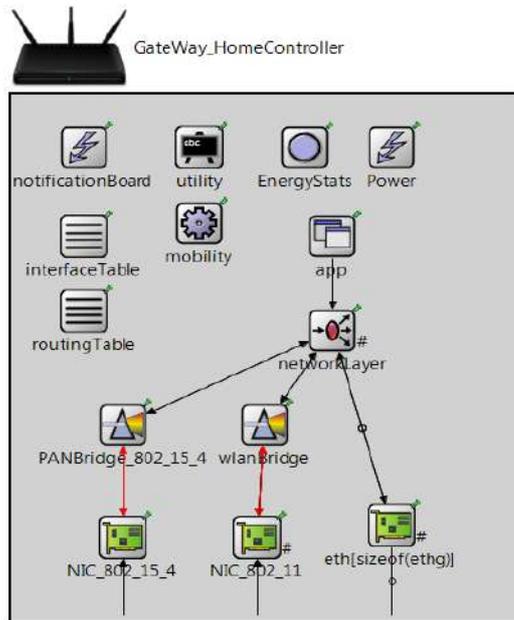


Figura 34. Modelo del Controlador central HAN (Gateway)

El notification Board es una entidad que permite la comunicación entre capas y/o procesos. Este recopila información relevante del nodo hosts como posición, potencia de transmisión y la pone accesible para los demás módulos. Cada módulo es capaz de publicar información en el notification Board.

4.4.1.1 Los módulos de nodo IEEE 802.15.4

En la figura 35 se muestra la captura de pantalla del módulo IEEE 802.15.4 usado en la simulación. La capa física es la parte central de un nodo inalámbrico. Es la responsable del envío y la recepción de mensajes, detección de colisiones, y el cálculo de bit error rate. Además, es responsable de la aplicación de los modelos de canales utilizados en la simulación.

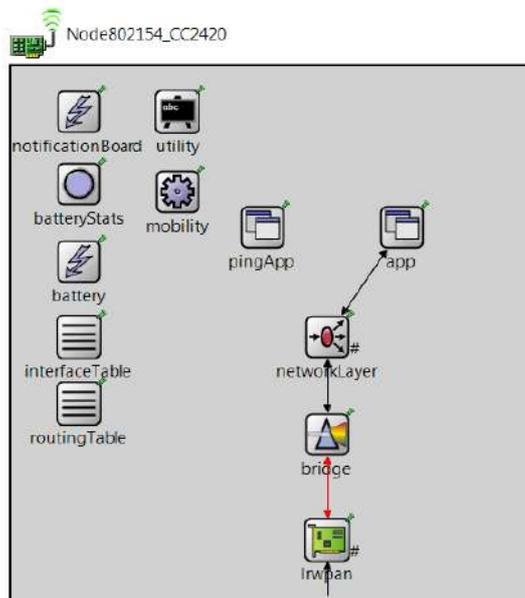


Figura 35. Nodo basado en IEEE 802.15.4 con direccionamiento IP.

La capa física se divide en tres partes, la Base-PhyLayer que proporciona las interfaces a la capa MAC y a las capas físicas de otros nodos. Los AnalogueModels son los encargados de simular la atenuación (efecto sombra, el desvanecimiento y el path loss) de una señal recibida. Por último, el decider es el responsable de la evaluación (clasificación como ruido o señal) y la demodulación (cálculo de errores de bits) de los mensajes recibidos.

4.4.1.2 Los módulos de nodo TCP/IP del framework INET.

El INET framework que implementa gran parte de los protocolos usados en redes TCP/IP, dentro de la red HAN se utiliza dos módulos, el StandardHost y el Ieee80211Host, ambos pueden ser conectados a otros nodos a través de una interface Ethernet. El Ieee80211Host tiene una NIC IEEE 802.11 para conectividad inalámbrica. Como se observa en la figura 36 y 37, los módulos pueden soportar direccionamiento IPv4 con el fin de ser direccionables desde el controlador central o Gateway o desde las interfaces de la empresa de servicios de energía. En el mismo framework de INET hay módulos que soportan IPv6.

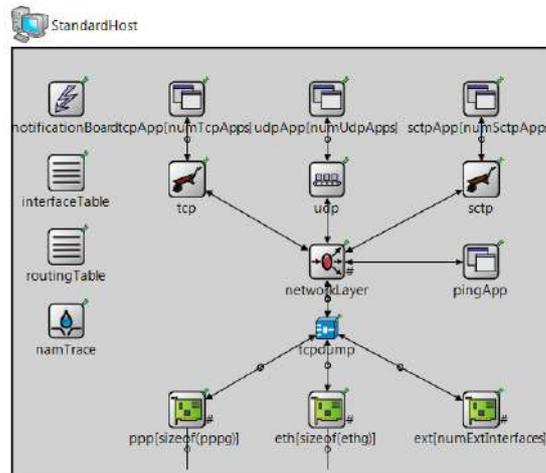


Figura 36. Módulo de INET con la pila TCP/IP y NIC ethernet

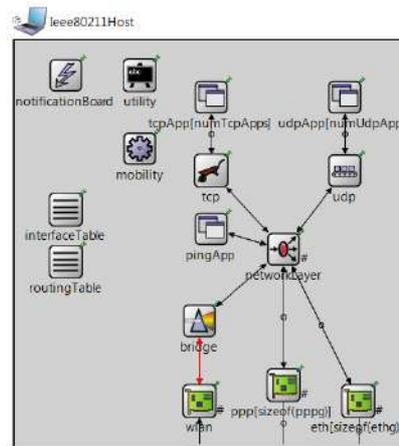


Figura 37. Módulo de INET con la pila TCP/IP y NIC WLAN

4.4.2 Simulación y análisis de resultados de la red de comunicaciones

En esta sección se analizan los resultados de las simulaciones que se efectuaron para los diferentes escenarios con el propósito de evaluar el rendimiento de la red propuesta y determinar cómo los factores dinámicos influyen en el modelo de trabajo en red en términos de indicadores de desempeño orientados hacia la aplicación. Además, la configuración del entorno de simulación con respecto a la organización de los nodos en la red híbrida y los parámetros relacionados con la red se resumen brevemente a continuación, en donde se destacan el diseño, los pasos de configuración y otros parámetros destinados a los diversos escenarios.

En esta sección se realizará un análisis del desempeño de la red HAN propuesta y para ello el análisis se divide en dos partes. La primera se centra específicamente en la red IEEE 802.15.4 que es el estándar que se propone para la interconexión de los dispositivos inteligentes (Smart appliances) y los módulos de energía renovable con el controlador central. Aunque cabe resaltar que no es la única tecnología disponible, en (ZBHP_SE, 2009) el NIST a identificado como prometedora además de IEEE 802.15.4 (ZigBee energy) la especificación Home-Plug que se basa en PLC (Power line Communication). La segunda parte se realiza un análisis de coexistencia de las redes inalámbricas que hacen parte del esquema híbrido propuesto, estas son la red IEEE 802.15.4 y la red WLAN (IEEE 802.11a/g) que trabajan en la banda de 2.4GHz. Dicho análisis de desempeño se realizará a través de una prueba en campo.

4.4.2.1 Análisis de desempeño de la red IEEE 802.15.4

El objetivo del análisis de los escenarios en la simulación es evaluar el impacto sobre la red HAN al variar la cantidad de nodos y la organización de los mismos dentro de la red IEEE 802.15.4. Se ha evaluado el desempeño del protocolo en una topología en estrella, donde los nodos transmiten los datos directamente al coordinador (figura 38).

Para este escenario se ha considerado el canal inalámbrico sin interferencias, lo que quiere decir que cada nodo es capaz de escuchar las transmisiones de todos los demás nodos. En la prueba, cada sensor envía 1000 mensajes al coordinador.

En este escenario, los sensores generan mensajes de 108 bytes cada 50 ms. Estos mensajes están compuestos de 80 bytes de datos, 2 bytes de control añadido por el solicitante, la cabecera ZigBee es igual a 20 bytes y 9 bytes corresponden a la cabecera del protocolo 802.15.4. Estos tamaños son escogidos de acuerdo un ejemplo de trama de la especificación ZigBee Smart Energy.

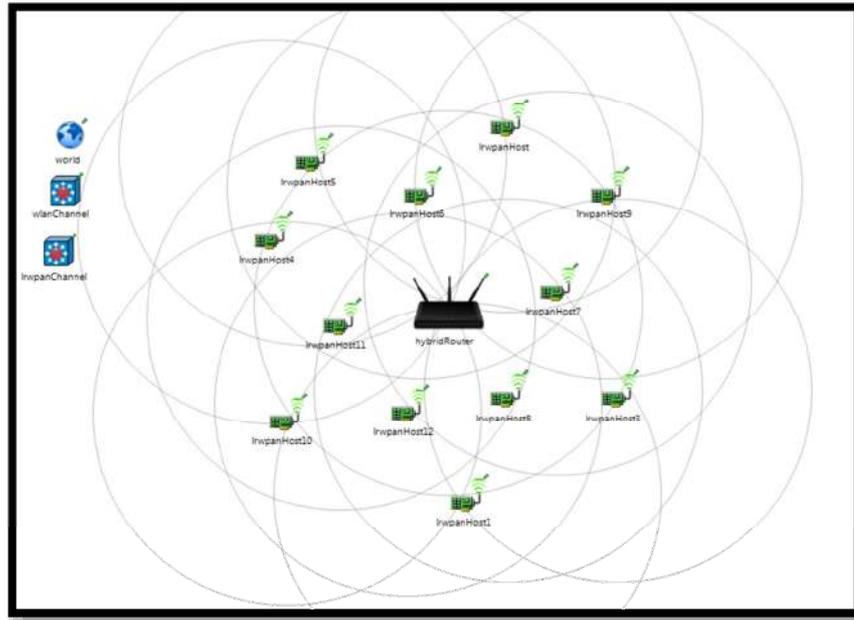


Figura 38 Ambiente de simulación topología estrella

La norma IEEE 802.15.4 tiene establecidas unas variables que controlan el funcionamiento de las capas físicas PHY y de control de acceso al medio MAC. Durante la realización de la simulación como el de la prueba en campo se han empleado los valores por defecto estipulados en dicha norma. En OMNET, todas estas variables se pueden modificar a través del archivo omnetpp.ini. Todos los parámetros correspondientes al tráfico de red se han configurado a través de un archivo xml (IrwpanConfig.xml; Nic802154_TI_CC2420_Decider.xml), el cual se ha relacionado dentro del archivo omnetpp.ini. En la tabla 11 se han reagrupado los parámetros utilizados durante la simulación de la capa física y MAC del módulo Nic802154_TI_CC2420.

Tabla 11 Resumen parámetros de la simulación

Parámetros para la capa Phy de 802.15.4	
Sensibilidad de la antena	-95dBm
Potencia de transmisión de la antena	1.0mW (0dBm)
Parámetros para la capa MAC de 802.15.4	
macMinBE	2
macMaxBE	6
macMaxCSMABackoffs	10
macAckWaitDuration	0.000864s

CCADetectionTime	120 μ s
aUnitBackoffPeriod	320 μ s
Datos de Consumo de la Batería	
Estado	consumo (mA)
Idle	0.37
Recepción	19.47
Sleep	0.02
Transmisión	16.24

Métricas para el Análisis de Desempeño

Varias métricas pueden usarse para examinar y analizar el rendimiento de una red IEEE 802.15.4. En (Raj Jain, 1991) se encuentra una extensa lista de parámetros de rendimiento de uso común, los parámetros considerados son los siguientes:

- *El Goodput*: se calcula como la relación entre los paquetes recibidos correctamente y el número total de paquetes transmitidos. El número de paquetes perdidos no tienen en cuenta las retransmisiones. Los bits que se consideran son sólo carga útil, ya que el encabezado de protocolo y tramas de control no se incluyen en el cálculo

- *Latencia*: es igual al tiempo de llegada del mensaje menos el tiempo de creación del mensaje. Es un indicador fundamental para evaluar el rendimiento en tiempo real de las redes. Como las simulaciones se llevan a cabo con una topología de red en estrella, en la cual, el mecanismo de enrutamiento ha sido desactivado. Por lo tanto, el término latencia se puede intercambiar por retardo. Se calcula como la diferencia de tiempo entre el momento que un paquete es generado en el End Device (transmisor) y cuando el paquete es recibido por el coordinador de red (receptor).

- *PER (Packet Error Rate)*: es el número de paquetes de datos recibidos de manera incorrecta, con errores, dividido el número total de paquetes recibidos.

Escenarios de simulación

4.4.2.1 Escenario1: Variación del número de nodos.

En este escenario (topología en estrella, un coordinador y n nodos), en primer lugar se deja fijo el número de nodos y se calcula el goodput y la latencia. Luego,

se cambia el número de nodos y se repite el mismo proceso. Se fijó la tasa de transmisión a 250 Kbps. En la figuras 39, 40 y 41 se ilustran los resultados de las simulaciones correspondientes a este escenario.

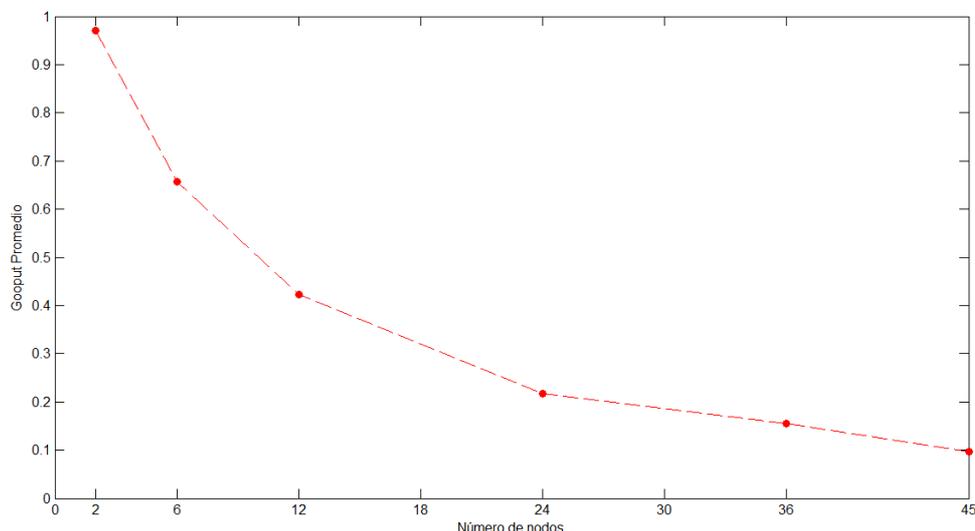


Figura 39 Impacto del número de nodos sobre el valor del Goodput

En la gráfica se puede observar que a medida que se va incrementado el número de nodos el goodput va decreciendo. Esto se puede evidenciar el goodput cuando se tiene solo dos nodos el es cercano al 97% y a medida que aumenta el número de nodos hasta llegar a un total de 45 nodos el goodput disminuye considerablemente hasta un 10% del aprovechamiento del canal de Tx. Esta disminución del aprovechamiento del canal se puede deber a la saturación del controlador central ocasionando múltiples colisiones cuando el número de nodos se va incrementando. Es importante resaltar que para 12 nodos, que es el número de electrodomésticos inteligentes promedio dentro de un hogar, el goodput está por encima del 45%. Lo cual permitiría velocidades de transmisión cercanas a 125 Kbps lo cual es aceptable para las aplicaciones promedio que se pueden tener en una red HAN dentro de Smart Grid.

En la Figura 40 se ilustra la variación en el tiempo de la latencia de acuerdo con el tiempo de simulación en este caso se calcula en un ambiente con 12 nodos. En estas condiciones se obtiene un valor promedio de latencia de 0.32 segundos.

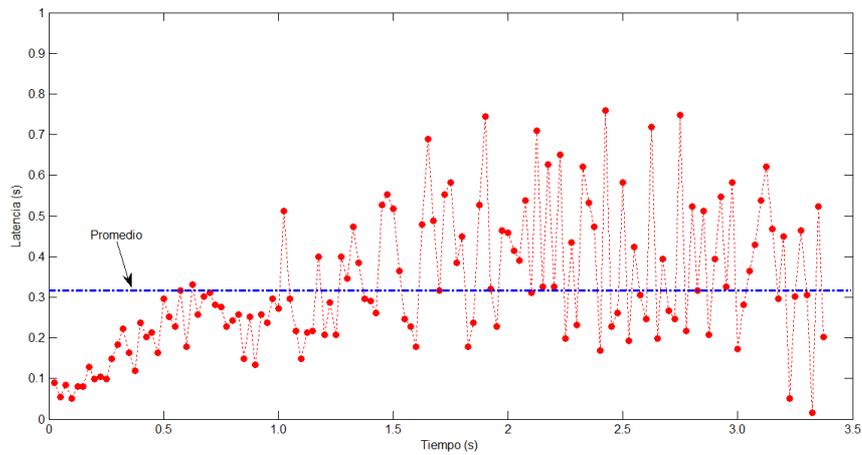


Figura 40 Variación de la latencia durante el tiempo de simulación. Número de nodos =12.

Se puede observar en la gráfica que para 12 nodos y teniendo un tiempo de simulación de 3.5 segundos la latencia promedio es de 0,32 s. lo cual para las aplicaciones más importantes de Smart Grid dentro de la red HAN, como el monitoreo y el control o el despliegue de información en los IHD, es muy bueno ya que según publicaciones como UCAIug (OpenHAN, 2010) estos se pueden realizar en intervalos de muestreo entre 5 y 15 minutos.

El procedimiento anterior se repite para diferente cantidad de nodos IEEE 802.15.4 en la red. En la figura 41 se muestra en contraste con promedio de la latencia.

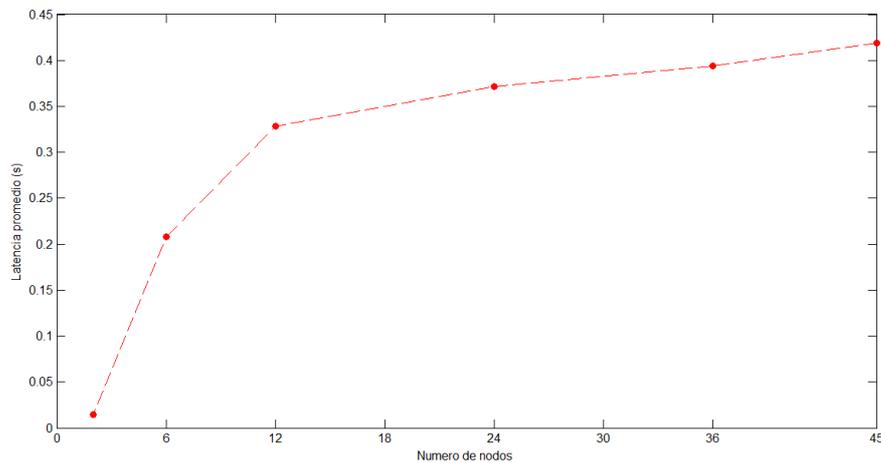


Figura 41 Variación de la latencia promedio respecto a la cantidad de nodos.

Para el número de nodos igual a 2, el tiempo de latencia es 23 ms. En la gráfica se muestra que cuando se incrementa el número de nodos la latencia va aumentando a tal punto que cuando se tienen 45 nodos la latencia es de 0,42 s. comparada con un valor cercano a cero cuando se tiene sólo dos nodos. Este aumento puede ser ocasionado por la saturación del controlador central cuando el número de nodos aumenta. Aunque la latencia aumenta considerablemente cuando se llega a 45 nodos este valor sigue siendo muy bajo y se ajusta a los requerimientos mínimos de tiempo de respuesta dentro de Smart Grid.

En los servicios de la red HAN una de las aplicaciones que exige un tiempo de respuesta es el monitoreo de las variables eléctricas de los electrodomésticos inteligentes. La red HAN respecto al requerimiento R01HAN01 de visualización en tiempo real de la información de consumo lo cumpliría.

4.4.2.1.2 Escenario 2: Análisis del tamaño de carga útil

En este escenario, se han analizado el desempeño IEEE 802.15.4 utilizando también una topología en estrella para diferentes tamaños de carga útil y 12 end device conformando la red. Se han empleado los parámetros de red del escenario anterior. En esta ocasión se configura la NIC 802.15.4 para que trabaje además a una tasa de transmisión de 625 Kbps, esta tasa corresponde a un modo especial que algunos trasreceptores del estándar que se denomina *turbo mode*. Los resultados de las simulaciones, se ilustran respectivamente en las figuras 42 y 43.

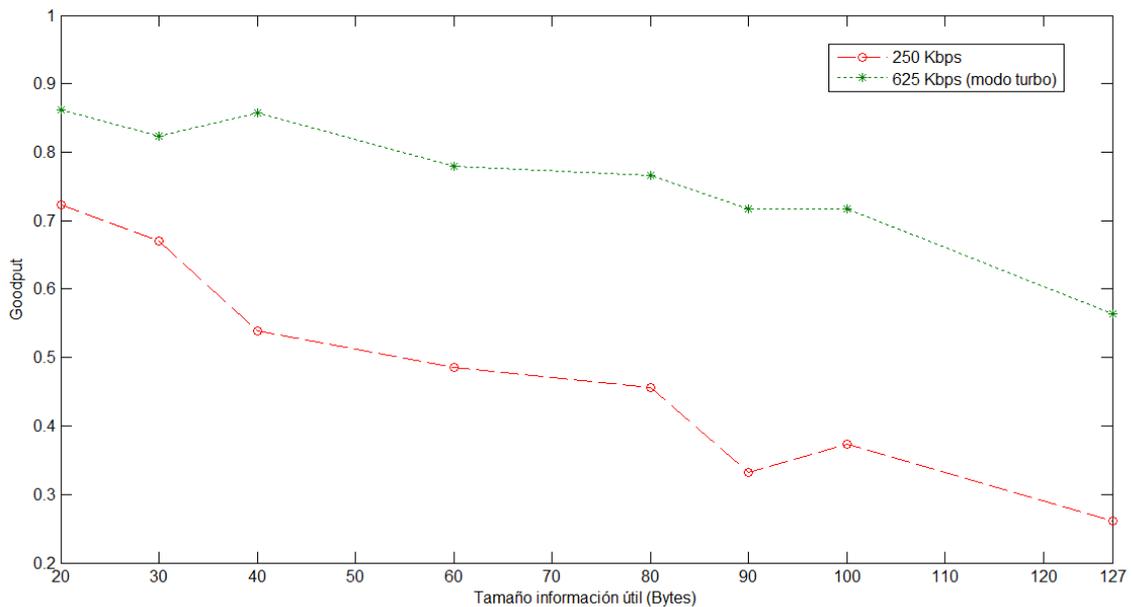


Figura 42 Variación del goodput para diferentes tamaños de carga útil.

Claramente se puede observar en la gráfica que el goodput, en los modos de 250Kbps y 625 Kbps, va disminuyendo a medida que aumenta la carga útil dentro de los paquetes de datos, pero el modo turbo (625 Kbps) a un valor de 127 Bytes logra un aprovechamiento del canal de transmisión cercano al 57% comparado con el 26% de aprovechamiento del modo de 250Kbps. Este aprovechamiento del 57% del canal de transmisión en el modo turbo puede ser porque a mayor velocidad de transmisión, logrando velocidades de transmisión cercanas a los 313 Kbps, menos tiempo de permanencia de los paquetes en el canal de transmisión y por lo tanto menos probabilidad de colisiones y retransmisiones de los mismos.

Al aumentar la tasa de transmisión se obtiene mejores resultados de goodput. Aunque no todos los transreceptores soportan el modo turbo (625 Kbps), la especificación de más reciente aparición, IEEE 802.15.4g -SUN (Smart Utility Networks - IEEE SMARTGRID, 2012) y que garantiza la compatibilidad de medidores inteligentes y redes de sensores inalámbricas, alcanza tasas de hasta 800 K bps. Pero está enfocado para soportar la transferencia de datos en la red AMI, con ello en el ambiente outdoor dichas velocidades pueden garantizar un mejor goodput entre el controlador central (Home Gateway) y las aplicaciones en las subestaciones del proveedor.

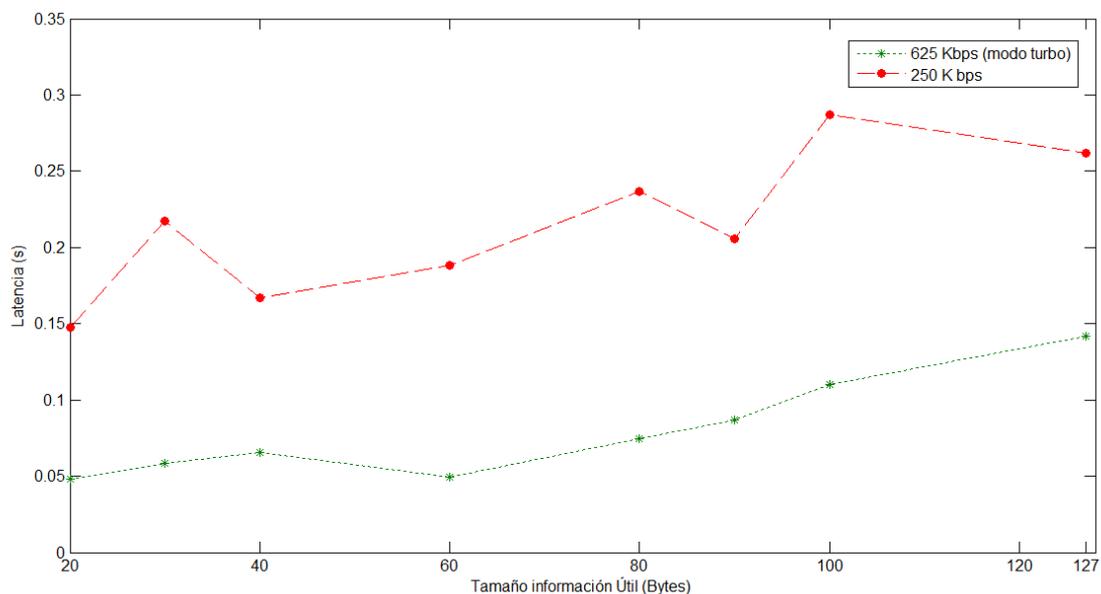


Figura 43 Valor de latencia promedio para diferentes valores de tamaño de información útil.

Al medir la latencia en los dos modos (250 Kbps y 625 Kbps) se puede observar en la gráfica resultante que para ambos la latencia aumenta a medida que se incrementa la carga útil, pero en el modo turbo (625Kbps) esta es cercana a 0,14 segundos, la cual, comparada con los 0,26 segundos del modo de 250 Kbps es mucho mejor. Este incremento de la latencia puede ser ocasionado por la saturación del controlador central al procesar la carga útil de los paquetes lo que ocasiona que se presente más encolamiento y por lo tanto más pérdida de paquetes por el ocupamiento de memoria y por consiguiente más retransmisiones. A pesar que en el modo turbo la latencia es mucho menor, en ambos modos se ajusta perfectamente los requerimientos mínimos de muestreo propuesto por el NIST y el UCAIug que están entre los 5 y 15 minutos

4.4.2.2 Análisis de coexistencia redes 802.15.4 y 802.11 (prueba de campo)

El objetivo de la prueba de campo es analizar como la coexistencia de diferentes redes inalámbricas que operan en la banda ISM 2.4GHz afectan el desempeño de la red IEEE 802.15.4. Específicamente se trabajará con redes IEEE 802.11 presentes en el rango de cobertura, que es un tipo de red muy común en el ambiente residencial. El parámetro a calcular es al PER. La motivación principal para realizar la prueba en campo es valuar la red en un ambiente real considerando el hecho que en el diseño de la red HAN propuesta se tiene una red híbrida siendo el estándar IEEE 802.15.4 y el IEEE 802.11 las representantes de las redes inalámbricas y que ambas trabajan en la banda de 2.4GHz, sumado el hecho que el Home gateway estará operando en un ambiente donde tendrá que coexistir con otras redes vecinas del mismo tipo. Otra razón, es la poca disponibilidad de modelos de propagación y desvanecimiento que tiene el simulador OMNET++, donde no se considera los tipos de obstáculos en el ambiente indoor.

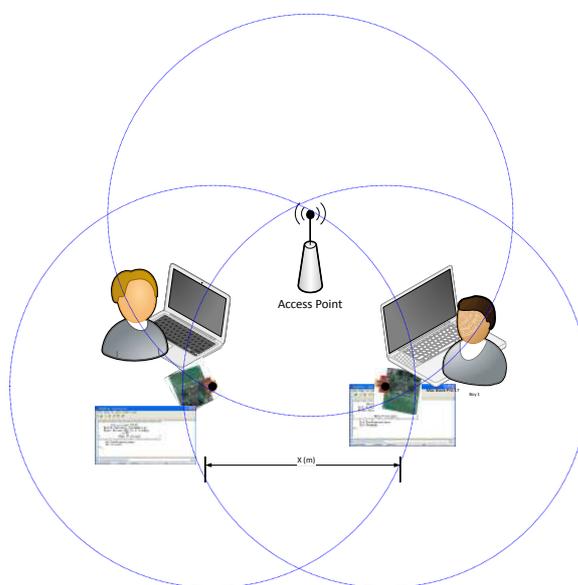


Figura 44 Esquema ambiente del prueba de coexistencia entre redes IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11g.

En la figura 44 se muestra el esquema del montaje a realizar con el fin de medir de la PER y evaluar de esta forma el impacto del el desempeño sobre la red IEEE 801.15.4. Para el montaje se utiliza dos nodos tarjetas de desarrollo PICDEM z que incluye el transreceptor MRJ24L40 que tiene similares características a módulo NIC CC2420 empleado en la simulación en OMNET++. Se configura la tarjeta con los mismos parámetros usados en la simulación y que se mostraron en el tabla la tabla 11, a diferencia de la potencia que no se deja estática en 0dBm, si no que durante la prueba se va cambiando. En la figura 45 se muestra una imagen de una de las tarjetas a usar.

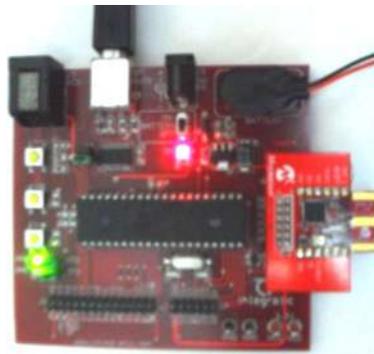


Figura 45 Tarjeta de desarrollo IEEE 802.15.4

Las tarjetas que son basadas en el micro-controlador PIC 18F4620 de 8 bits, fueron reprogramadas con un código que permitiera acceder a las funciones del nivel físico y MAC del transreceptor, como son el cambio de potencia de transmisión, configuración del canal, habilitación del cálculo del RSSI y la aplicación que nos permitiera calcular el PER. Ambos nodos fueron conectados a unos equipos de cómputo a través del puerto USB con una conexión RS232 19200 8 N 1. Por el hyperterminal se envían los comandos para cambiar de configuración y visualizar el conteo de los paquetes enviados y recibidos. La aplicación del nodo envía 1000 paquetes al nodo receptor.

La prueba se realizó en las instalaciones de la universidad bajo la influencia de las redes WiFi que hay disponibles. Lo primero que se hace es fijar la potencia de transmisión en 0 dBm y se selecciona el canal 11 (2405MHz, ver tabla 12), se corre la aplicación sobre el nodo y una vez se indique que los 1000 paquetes fueron enviados se tabula los paquetes recibidos correctamente (La IEEE 802.15.4 define el CRC -16 para el chequeo de errores). Manteniendo el mismo número de canal se disminuye la potencia de transmisión a -2.5, -5, -8.75 y -35.5 dBm, corriendo para cada caso la aplicación PER y se tabula el resultado. Se repite el

paso anterior para el resto de canales. En la tabla 13 se muestra el resultado del de la prueba para los 16 canales.

Tabla 12: Frecuencias centrales correspondiente al número de canal.

Número de canal	Frecuencia central
11	2405MHz
12	2410MHz
13	2415MHz
14	2420MHz
15	2425MHz
16	2430MHz
17	2435MHz
18	2440MHz
19	2445MHz
20	2450MHz
21	2455MHz
22	2460MHz
23	2465MHz
24	2470MHz
25	2475MHz
26	2480MHz

Analizando los resultados del PER en la tabla 13, se observa que ciertos canales tienen un mejor desempeño que otros, y que como se puede esperar, a medida que se disminuye la potencia el PER aumenta. Esto ocurre por el traslape de los lóbulos de potencia entre las dos tecnologías en la banda de 2.4 GHz. En la figura 38 se observa la interferencia existente entre los lóbulos tres redes 802.11b en los canales más comunes que son 1, 6 y 11 y algunos de los canales de 802.15.4. Algunos canales no son afectados por la potencia de WiFi, en este caso los canales 15, 20, 25 y 26.

Tabla 13 Resultados medición PER para los 16 canales en la banda de 2.4 GHz y diferentes valores de potencia de transmisión.

IEEE 802.15.4		Potencia [dBm]					Paquetes recibidos				
Canal	Potencia [dBm]	-32.5	-8.75	-5	-2.5	0	-32.5	-8.75	-5	-2.5	0
11	PER [%]	99,40%	2,90%	7,30%	1,20%	1,80%	6	971	927	988	982
	PER [%]	90,20%	14,50%	4,70%	0,40%	0,00%	98	855	953	996	1000
12	PER [%]	17,20%	16,60%	24,70%	21,90%	2,30%	828	834	753	781	977
	PER [%]	21,20%	11,10%	20,10%	22,20%	3,70%	788	889	799	778	963
13	PER [%]	89,90%	34,50%	20,10%	0,00%	0,00%	101	655	799	1000	1000
	PER [%]	75,30%	15,40%	0,30%	0,00%	0,00%	247	846	997	1000	1000
14	PER [%]	89,90%	37,50%	22,00%	0,00%	0,00%	101	625	780	1000	1000
	PER [%]	97,60%	15,10%	1,90%	0,00%	0,00%	24	849	981	1000	1000
15	PER [%]	17,30%	1,50%	1,80%	3,00%	3,60%	827	985	982	970	964
	PER [%]	20,10%	1,80%	0,50%	3,10%	2,70%	799	982	995	969	973
16	PER [%]	68,70%	7,00%	11,40%	1,70%	1,40%	313	930	886	983	986
	PER [%]	67,50%	6,70%	5,50%	3,50%	3,00%	325	933	945	965	970
17	PER [%]	96,60%	43,40%	69,10%	60,60%	21,60%	34	566	309	394	784
	PER [%]	95,60%	42,90%	62,60%	76,80%	47,10%	44	571	374	232	529
18	PER [%]	99,90%	58,20%	50,80%	41,70%	34,50%	1	418	492	583	655
	PER [%]	92,20%	9,50%	5,50%	0,90%	0,00%	78	905	945	991	1000
19	PER [%]	92,20%	9,50%	5,50%	0,90%	0,00%	78	905	945	991	1000
	PER [%]	31,40%	12,10%	14,70%	21,00%	1,70%	686	879	853	790	983
20	PER [%]	80,40%	0,10%	0,10%	0,00%	0,00%	196	999	999	1000	1000
	PER [%]	25,90%	0,80%	1,20%	1,50%	3,10%	741	992	988	985	969
21	PER [%]	100,00%	5,90%	0,00%	5,70%	2,20%	0	941	1000	943	978
	PER [%]	100,00%	5,90%	0,00%	5,70%	3,30%	0	941	1000	943	967
22	PER [%]	97,00%	80,40%	75,00%	48,80%	29,90%	30	196	250	512	701
	PER [%]	96,50%	79,20%	68,10%	63,80%	39,20%	35	208	319	362	608
23	PER [%]	97,00%	80,40%	75,00%	37,70%	37,50%	30	196	250	623	625
	PER [%]	96,50%	31,00%	40,00%	31,10%	39,20%	35	690	600	689	608
24	PER [%]	52,20%	28,80%	20,60%	2,40%	10,00%	478	712	794	976	900
	PER [%]	32,70%	3,40%	0,30%	0,00%	0,00%	673	966	997	1000	1000
25	PER [%]	15,10%	10,00%	10,10%	0,00%	0,00%	849	900	899	1000	1000
	PER [%]	29,90%	12,60%	2,10%	0,10%	0,00%	701	874	979	999	1000
26	PER [%]	98,20%	0,50%	8,60%	6,50%	0,30%	18	995	914	935	997
	PER [%]	100,00%	8,20%	0,50%	0,60%	1,30%	0	918	995	994	987

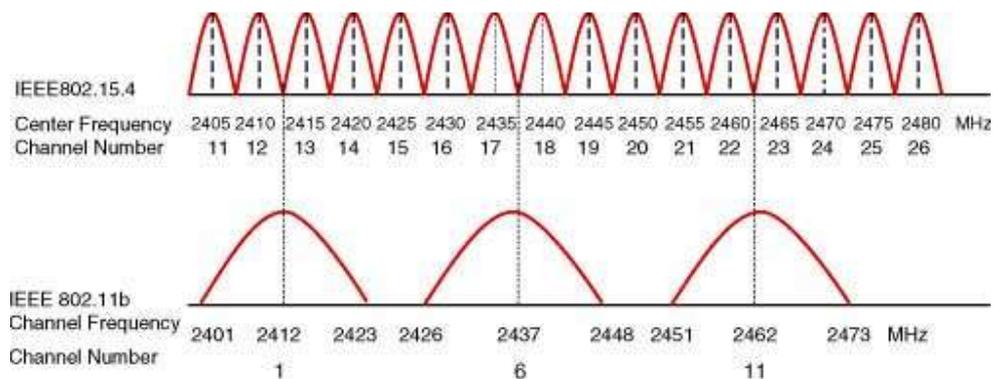


Figura 46. Interferencia entre canales IEEE 802.15.4 y IEEE 802.11b

Como criterio de configuración y diseño del Home gateway, específicamente el coordinador de la red 802.15.4, se debe iniciar la red en los canales libres aplicando una función del nivel físico de Energy detection. Al mismo tiempo el Home Gateway debe configurar la red WiFi en un canal diferente a la de la red

802.15.4. Esto deja el desempeño de la red de sensores dependiente de la coexistencia y cercanía de las redes vecinas, ya sea de la misma tecnología u otras redes que operen en la misma banda. Otro criterio de diseño del controlador central del Home Gateway sería la evaluación continua de la calidad del enlace y poder automáticamente cambiar de canal cuando el desempeño disminuya a umbrales de calidad del servicio.

Capítulo 6: Conclusiones y Trabajo Futuro

Para analizar con el trabajo desarrollado en el proyecto, en este último capítulo se recogen las conclusiones finales que se pueden desprender del estudio e simulaciones realizados.

Conclusiones finales

- I. Las metodologías (SRS y análisis de Dorfman), incluyendo los modelos de referencia de Smart Grid, permitieron proponer una arquitectura de diseño de una red HAN, donde se resaltó los componentes de aplicación y de comunicaciones. Se realizó la simulación del servicio de respuesta a la demanda usando la estrategia de control por precio variable de la electricidad. Se avalúo el impacto de la integración de los sistemas de generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía sobre la reducción de los picos de carga.
- II. La simulación es una opción que revela ciertos aspectos claves de diseño antes de llegar a la implementación permitiendo además evaluar componentes de un proyecto que por diferentes razones no se pueden llevar a cabo en el corto plazo como por ejemplo limitantes presupuestales o restricciones de ley.
- III. A la hora de simular un determinado sistema o entorno, como las redes HAN, es necesario que las herramientas utilizadas sean lo suficientemente realistas para asegurar que los resultados alcanzados sean válidos. Esto se consigue hasta cierto punto con un ajuste o calibración de los parámetros de los simuladores para conseguir una mayor similitud con la realidad. Esto es válido en la mayoría de las redes cableadas, pero ciertos aspectos como los modelos de propagación y cálculos de atenuación de las señales inalámbricas, donde se considere los obstáculos en el ambiente del hogar son difíciles de modelar y el entorno de OMNET es muy limitado en dicho aspecto.
- IV. Para la validación de aspectos de propagación y coexistencias de las redes inalámbricas como las basadas en la especificación IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11x y que son usadas como parte de la red HAN, se recomienda realizar validaciones de la arquitectura con pruebas de campo en escenarios reales con presencia de obstáculos, ya que los modelos de propagación y los modelos de ambiente en el simulador OMNET no contempla factores de interferencia inter-redes, orientación de antenas y modelos de propagación acertados. Los resultados basadas en pruebas

experimentales reales permiten ajustar los parámetros de los modelos usados por los simuladores.

- V. Se pudo mostrar que la arquitectura propuesta cumple con los requerimientos mínimos de desempeño propuestos por el NIST y el UCAlug, ya que aunque cuando es llevada al límite de carga útil y/o número de nodos estos varían considerablemente. Los valores de goodput y latencia para 12 nodos, que son el número de electrodomésticos inteligentes promedio que se pueden encontrar en un hogar, se encuentran dentro del rango propuesto por el NIST y el UCAlug para funciones de interactividad, monitoreo y control.

Trabajo Futuro

Las redes HAN en el marco de Smart Grid es un campo que está creciendo y evolucionando y donde hay amplio material, tanto para la investigación, como para el desarrollo de productos, cómo trabajo futuro se propone lo siguiente:

- I. Como trabajo futuro se propone evaluar un aspecto de mucha importancia, la ciber-seguridad y como un primer paso contra las violaciones de seguridad se debe realizar un análisis de riesgos respecto a la privacidad de los datos de usuarios y manipulación de algunos equipos dentro de la HAN.
- II. Aunque en el presente trabajo, dentro de la red HAN, se usó un esquema de enrutamiento IPv4, se propone diseñar y evaluar diferentes algoritmos de enrutamiento que se adecuen e éste tipo de redes y trabajando de una vez sobre el marco IPv6.

ANEXO I Código Fuente

```
%Version 4B, se agrega POver Rate para cada electrodoméstico inteligente
clc
clear
NumTimeSlots=24;
close all

[r textdata colheaders]=import_XLS_file('PerfilesDeCarga.xlsx','loads');

[bt textdata2 colheaders2]=import_XLS_file('PerfilesDeCarga.xlsx','PV'); %Energia
almacenada en al bateria

[ct_value textdata3 colheaders3]=import_XLS_file('PerfilesDeCarga.xlsx','costo');
%costo energía
ct_value=ct_value(1:end-1)';
%-----
%so=[1.00      01.00   11.00      01.00   18.00   08.00   06.00 ] ;
so=[1.00      09.00   06.00      11.00   05.00   07.00   10.00 13.00 ] ;
%fo=[24.0     24.00   24.00      24.00   24.00   14.00   09.00 ] ;
fo=[24.0     11.00   9.00       13.00   24.00   21.00   24.00 20.00 ] ;

lo=      [20 02 03 2 04 06 1 2];

releaseo=[01 09 09 11 05 06 10 13];

do=      [100 80 250 600 230 400 1000 900];

n=NumTimeSlots; %numero de time slots
m=size(so,2); %numero de loads

ro=zeros(m,n);
Ro=zeros(m,n);

for i=1:m
    Ro(i,releaseo(i):releaseo(i)+lo(i)-1)=do(i);
    ro(i,1:lo(i))=do(i); %esto lo cambio luego con r, cargas reales
end

Co=zeros(m,n);

mapColor=colormap();
Ncolor=length(mapColor);
deltaColor=floor(Ncolor/m+1);

ColorsBarsOrigin=mapColor(1:deltaColor:Ncolor,:);
%ColorsBarsOrigin=[0 0 1;1 0 0;1 1 0];
```

```

function TaskBar= Plot_TaskVSTime(R,colorBarTask,colheaders)
%colorBarTask=ColorsBarsOrigin;
guia=1;
tamTimeSlot=50;
Hbar=30;
ColorFondo=1;
SpaceBar=2;
m=size(R,1);
n=size(R,2);
%TaskBar=ones(m*Hbar+2*SpaceBar,n*tamTimeSlot+2*SpaceBar,3);
TaskBar=ones(m*Hbar,n*tamTimeSlot,3);
x=SpaceBar;
y=SpaceBar;
for i=1:m %numero de appliances
    for j=1:n

        if(R(i,j))
            TaskBar(x:x+Hbar,y:y+tamTimeSlot-1,1)=colorBarTask(i,1);
            TaskBar(x:x+Hbar,y:y+tamTimeSlot-1,2)=colorBarTask(i,2);
            TaskBar(x:x+Hbar,y:y+tamTimeSlot-1,3)=colorBarTask(i,3);

        else

        end

            y=j*tamTimeSlot;

    end

        y=SpaceBar;
        y=1;
        TaskBar(x:x+SpaceBar,1:n*tamTimeSlot,:)=1;
        TaskBar(x+SpaceBar:x+SpaceBar+1,1:n*tamTimeSlot,1:3)=guia; %linea
gris
        TaskBar(x+SpaceBar+1:x+2*SpaceBar+1,1:n*tamTimeSlot,:)=1;

        x=i*Hbar+SpaceBar;

    end

y=SpaceBar;

        TaskBar(SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y,1)=guia; %1era lineas
verticales
        TaskBar(SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y,2)=guia;
        TaskBar(SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y,3)=guia;
        hold on

for j=1:n
        TaskBar(1+SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y+tamTimeSlot,1)=guia;
%lineas verticales
        TaskBar(1+SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y+tamTimeSlot,2)=guia;
        TaskBar(1+SpaceBar:m*Hbar+SpaceBar,y+tamTimeSlot,3)=guia;

```

ANEXO II Framework INET y Mixim

A1 Framework base y las bibliotecas de protocolos

Lógicamente, Mixim se puede dividir en dos partes: el marco base y la biblioteca de protocolos. El marco base proporciona la funcionalidad necesaria en general para casi cualquier simulación inalámbrica, tales como la gestión de conexiones, la movilidad, y el modelado de canal inalámbrico. La biblioteca de protocolos complementa el marco base con un amplio conjunto de protocolos estándar, incluidos los modelos de movilidad.

Con el fin de tener claramente definidas las interfaces entre el marco base y la biblioteca de protocolos, Mixim e INET proporciona un módulo base para cada módulo OMNeT++ usados en la simulación. Siguiendo este concepto hace que sea fácil de implementar nuevos protocolos al tiempo que facilita su reutilización.

A2. Modelos base de MIXIM

La simulación de sistemas de comunicación inalámbricos requiere una abstracción adecuada del medio ambiente, los canales de radio, y la capa física. Para estas partes del escenario, el Mixim ofrece un marco de modelamiento. En esta sección, se discuten los enfoques de modelamiento básicos, los supuestos detrás de estos enfoques y los aspectos de aplicación pertinentes, tales como nivel de abstracción del modelo y soporte del modelo para tratar la imprecisión y la complejidad de cálculo.

A2.1 Modelo del Medio Ambiente

Las simulaciones se realizan normalmente en un área limitada, una zona de incidencia, en la que los nodos y los objetos son ubicados. Los nodos representan los dispositivos inalámbricos con su pila de protocolos y se modelan como radiadores isotrópicos que no tienen ninguna dimensión física. Un objeto, por el contrario, es algo con una dimensión física que reside en el entorno de propagación y, posiblemente, pueden atenuar una señal inalámbrica. Ambos, tanto los objetos y los nodos pueden ser móviles. Los nodos incluso se pueden combinar con objetos, por ejemplo, para modelar un nodo sensor ubicado en un vehículo. De aquí en adelante, se utilizará el término entidad para referirse a ambos, tanto a los nodos como a los objetos.

Dependiendo del escenario a investigar, el área limitada de la zona de incidencia puede causar efectos de bordes no deseados, lo que podría alterar los resultados de la simulación.

A2.2 Modelamiento de las conexiones

En contraste con las simulaciones por cable, el modelado de la conectividad es una tarea difícil en las simulaciones inalámbricas. En las simulaciones por cable, dos nodos están conectados por cables, que pueden ser fácilmente modelados (por ejemplo, en OMNeT++ por medio de conexiones). En las simulaciones inalámbricas, sin embargo, el "canal" entre dos nodos es el aire, que es un medio de difusión y no pueden ser fácilmente representados por una conexión. En Mixim se decide dividir el modelado en dos partes. La primera parte es el canal inalámbrico y su propiedad de atenuación, que se describe en detalle en la (Mixim 3).

Teóricamente, una señal enviada por un nodo afecta a todos los otros nodos en la simulación (si se opera en el mismo rango de frecuencias). Sin embargo, la señal se atenúa, de modo que la potencia recibida en los nodos muy lejanos del nodo emisor puede ser tan baja que es insignificante. Con el fin de reducir la complejidad computacional en Mixim, los nodos están conectados sólo cuando están dentro de la distancia máxima de interferencia. La distancia máxima de interferencia es un borde conservador vinculado a la distancia máxima a la que un nodo todavía puede posiblemente perturbar la comunicación de un nodo vecino.

Teniendo en cuenta que la distancia máxima de interferencia no se especifica la distancia máxima a la cual los mensajes pueden ser (correctamente) recibidos. Una conexión Mixim es probablemente mejor definida por su complemento: Todos los nodos que no están conectados, definitivamente no interfieran entre sí. Siguiendo este concepto, un nodo que quiere recibir un mensaje de un interlocutor de comunicación, también recibe todas las señales (interferencia) y puede, por tanto, decidir sobre el nivel de interferencia y los bits errados que puedan resultar.

Referencias bibliográficas

- Basso, T. & DeBlasio, R. (s.f). *Advancing Smart Grid Interoperability and Implementing NIST's Interoperability Roadmap: IEEE P2030TM Initiative and IEEE 1547TM Interconnection Standards*. Recuperado de: http://www.gridwiseac.org/pdfs/forum_papers09/basso.pdf
- Basso, T. (2009, Julio). *IEEE SCC21 P2030TM Standard development Smart Grid Interoperability*. Recuperado de: <http://sites.energetics.com/madri/pdfs/P2030-MADRI-20090701-Basso.pdf>
- Basso, T. (2011, Abril) *IEEE Standards Coordinating Committee 21 (SCC21) 1547TM Interconnection and P2030TM Smart Grid Interoperability Series of Standards. ANSI Workshop: Standards and Codes for Electric Drive Vehicles*. Recuperado de: <http://publicaa.ansi.org/sites/apdl/Documents/Meetings%20and%20Events/EDV%20Workshop/Presentations/Basso-ANSI-EDV-0411.pdf>
- Boal, J. (2010). *Smart grid*. Recuperado de: <http://www.dea.icaei.upco.es/sadot/Comunicaciones/avanzadas/Smart%20grid%20-%20Jaime%20Boal.pdf>
- Boswarthick, D., Elloumi, O, & Ballot, JM (2010, abril). *Smart grids. From the machine to machine perspective*. Presentación realizada en Future Internet Assembly, Valencia, España. Recuperada de: http://www.future-internet.eu/fileadmin/documents/valencia_documents/sessions/smart_energy/5._boswarthick.pdf
- Bullis, k. (2009, Julio). *The Big Smart Grid Challenges*. Recuperado de: http://www.technologyreview.com/printer_friendly_article.aspx?id=23015
- Coll-Mayor, D. (s.f). *Overview of strategies and goals of smargrid in Europe, DER lab*. Recuperado de: <http://www.4thintegrationconference.com/downloads/Strategies%20&%20Goals%20of%20Smartgrid%20in%20Europe.pdf>
- Cupp, J., Be, M. (2008). Implementing Smart Grid Communications: Managing Mountains of Data Opens Up New Challenges for Electric Utilities. *Burns & McDonnell TECHBriefs* (2008) 4. 5-8. Recuperado de: <http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/article-smartgrid-part2-084.pdf>
- De Craemer, K. & Deconinck, G. (s/f). *Analysis of State of the art Smart Metering Communication Standards*. Recuperado de: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/265822/1/SmartMeteringCommStandards.pdf>
- Dell'Amico, M. (2004, Marzo). *Heuristic Algorithms and Scatter Search for the Cardinality Constrained PjCmax Problem*. Recuperado de: www.amsacta.unibo.it/2114/1/Heuristic.pdf
- Department of Energy [DOE 1] (s/f). *How the Smart Grid promotes a greener future*. Recuperado de: http://www.smartgrid.gov/sites/default/files/pdfs/sq_environmental.pdf
- Díaz, E. (s/f) *La Smart Grid y su dimensión TIC*. Recuperado de: <http://www.enerclub.es/files/frontAction.do?action=getFile&fileID=1000073806>
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2009, Junio). *Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap*. Recuperado de: <http://www.nist.gov/smartgrid/upload/InterimSmartGridRoadmapNISTRestructure.pdf>
- Electricity Advisory Committee [EAC] (2008). *Smart grid: enabler of the new energy*. Recuperado de: <http://energy.gov/oe/downloads/smart-grid-enabler-new-energy-economy>
- Environmental Protection Agency [EPA]. (s/f). *Summary of Energy Bill Provisions Affecting CHP*. Recuperado de: http://www.epa.gov/chp/documents/chp_energybill.pdf
- EU Commission Task Force for Smart Grids. (s,f). *Mission for the task force for the implementation of smart grids into the european internal market*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/energy/gas_electricity/smartgrids/doc/mission.pdf
- European SmartGrids Technology Platform (2006). *Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf

- Fehrenbacher, K. (2010, Febrero). *¿Smart Grid Problem?: Smart at the Edge, Dumb In the Middle*. Recuperado de: <http://gigaom.com/cleantech/smart-grid-problem-smart-at-the-edge-dumb-in-the-middle/>
- Flynn, B. (2007, Octubre). What is the real potential of the Smart Grid?. *Autovation 2007 The AMRA International Symposium*. Recuperado de: http://site.ge-energy.com/prod_serv/plants td/en/downloads/real_potential_grid.pdf
- Galvin, R. & Yeager, K.(2008). *Perfect Power: How the Microgrid Revolution Will Unleash Cleaner, Greener, and More Abundant Energy*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Glavitsch, H., Bacher, R. (2010). *OPTIMAL POWER FLOW ALGORITHMS*. Recuperado de: <http://rajanand.blog.com/files/2010/10/OPTIMAL-POWER-FLOW-ALGORITHMS.pdf>
- González, J., Restrepo, H., Isaac, I. & López, G. (2011, Junio). Esquema de incorporación de las Smart Grids en el sistema de potencia colombiano. *Revista Investigaciones Aplicadas. Investigaciones aplicadas. (5)1*. 21-26. Recuperado de: <http://revistas.upb.edu.co/index.php/investigacionesaplicadas/article/viewFile/798/732>
- Gómez, L. (2011, Abril). *¿Qué eso de Smart Grid? La Red Eléctrica Inteligente*. Recuperado de: <http://lynettegomez.wordpress.com/2011/04/25/%C2%BFque-eso-de-smart-grid-la-red-electrica-inteligente/>
- Guidelines for the Use of Wireless Communications Smart Grid Priority Action Plan*. (s/f) Recuperado de: http://www.nist.gov/smartgrid/upload/2-Guidelines_for_Wireless.pdf
- Hart, D.G. (2008, Julio). Using AMI to Realize the Smart Grid. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. Pittsburgh, PA. 1 – 2. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4584435%2F4595968%2F04596961.pdf%3Farnumber%3D4596961&authDecision=-203>
- Hawkins, K. (2010, Agosto). *Smart Grid Problems Revealed: The NERC Study*. Recuperado de: <http://www.masterresource.org/2010/08/smart-grid-nerc/>
- Hiskens, I.A. (2010, July). What's Smart about the Smart Grid? *Design automation conference (DAC), 2010 47th ACM/IEEE*. Anaheim, CA. pp. 937 – 939.
- Hussein, A., Harb, A., Kutkut, S., Shen, N., & Batareseh, J. (2010, Junio). *Design considerations for distributed micro-storage systems in residential applications*. Paper presentado en Telecommunications energy conference (Intelec), IEEE International 32nd. Orlando, FL
- IEEE P2030/D6.0, Draft Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), and End-Use Applications and Loads*. (2011, Julio). Recuperado de: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?reload=true&arnumber=5958567
- IEEE SMART GRID, Approved IEEE Smart Grid Standards. (2012, abril): Recuperado de: <http://smartgrid.ieee.org/standards/approved-ieee-smart-grid-standards/342-802154g-ieee-standard-for-information-technology-telecommunications-and-information-exchange-between-systems-local-and-metropolitan-area-networks-specific-requirements-part-154-wireless-medium-access-control-mac-and-physical-layer-phy-s>
- INET Framework. (s.f). INET Framework for OMNeT++/OMNEST. Recuperado de: <http://inet.omnetpp.org/index.php?n=Main.HomePage>
- Ipakchi, A., & Albuyeh, F. (2009). Grid of the future. *IEEE Power And Energy Magazine*. 7(2), 52-62. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4787536>
- Kaplan, M. (2009). *Smart Grid: Modernizing Electric Power Transmission and Distribution; Energy Independence, Storage and Security; Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA); Improving Electrical Grid Efficiency, Communication, Reliability, and Resiliency; Integrating New and cMAXs*. Alexandria, VA: The Capitol Net Inc.
- Kat, J. (s/f). *Successful Smart Grid Architecture*. Recuperado de: <http://mthink.com/utilities/utilities/successful-smart-grid-architecture>

- Katz, J. (2010). *Successful Smart Grid Architecture*. Recuperado de: <http://mthink.com/utilities/utilities/successful-smart-grid-architecture>
- Katz, J. S. (2010). *Smart Grid Security and Architectural Thinking*. Recuperado de: http://www.ibm.com/smarterplanet/global/files/us_en_us_energy_smartgridsecurity_and_architecturalthinking_katz.pdf
- Kwasinski, A. (2010, Junio) *Implication of Smart-Grids Development for Communication Systems in Normal Operation and During Disasters*. Paper presentado en Telecommunications energy conference (Intelec), IEEE International 32nd. Orlando, FL
- Lima, C. (2011, Abril). *Smart Grids IEEE P2030. IEEE P2030 Smart Grid Communications Architecture SG1 ETSI Workshop - Standards: An Architecture for the Smart Grid*. Francia. Recuperado de: http://docbox.etsi.org/Workshop/2011/201104_SMARTGRIDS/02_STANDARDS/IEEE_LIMA.pdf
- Lindley, D. (2011). *Redes inteligentes: El problema del almacenamiento de la energía*. Recuperado de: <http://www.npgiberoamerica.com/union-fenosa/redes-inteligentes-el-problema-del-almacenamiento-de-la-en.html>
- Mahmood, A. Aamir, M. & Anis, M.I. (2008, Octubre). Design and Implementation of AMR Smart Grid System. *Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE*. Canada. Vancouver, BC. pp 1 – 6. Recuperado de: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4749248%2F4763280%2F04763340.pdf%3Farnumber%3D4763340&authDecision=-203>
- MathWorks. (s.f). Matlab. Recuperado de: <http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html>
- McDonald, J. (2008). Leader o follower. Developing the smart grid business case. *IEEE power & energy magazine*, 21-24. Recuperado de: http://www.gedigitalenergy.com/multilin/journals/issues/Spring09/Leader_or_follower.pdf
- McNaughton, G. & Saint, R. (Enero, 2010). Enterprise Integration Implications for Home-Area Network Technologies. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. 2010. 1-5. Gaithersburg, MD. Recuperado de: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5434755
- Meier, A. (2006). *ELECTRIC POWER SYSTEMS. A CONCEPTUAL INTRODUCTION*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. IEEE PRESS.
- Metke, A. & Ekl, R. Security Technology for Smart Grid Networks. (2010, Junio). *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 1(1), 99-107. Recuperado de: http://www.ece.mtu.edu/~zhuofeng/EE5970Spring2011_files/Security%20Technology%20for%20Smart%20Grid%20Networks.pdf
- National Institute of Standards and Technology [NIST]. (2010, Enero). *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards*. Recuperado de: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf
- National Institute of Standards and Technology [NIST]. (2010, Octubre). *NIST Identifies Five "Foundational" Smart Grid Standards*. Recuperado de: http://www.nist.gov/public_affairs/releases/smartgrid_100710.cfm
- Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones. (2011, Mayo). *Smart Grids y la evolución de la red eléctrica*. Recuperado de: http://www.mityc.es/industria/observatorios/SectorElectronica/Actividades/2010/Federaci%C3%B3n%20de%20Entidades%20de%20Innovaci%C3%B3n%20y%20Tecnolog%C3%ADa/SMART_GRIDS_Y_EVOLUCI%20ON_DE_LA_RED_ELECTRICA.pdf
- OpenHAN Task Force of the SG Systems Working Group. (2010, Agosto). *UCAIug Home Area Network System Requirements Specification*. Recuperado de: <http://osgug.ucaiug.org/sgstore/Shared%20Documents/UCAIug%20HAN%20SRS%20-%20v2.0.pdf>
- OpenHAN Task Force of the UtilityAMI Working Group. (2008, Agosto). *UtilityAMI 2008 Home Area Network System Requirements Specification*. Recuperado de: <http://www.utilityami.org/docs/UtilityAMI%20HAN%20SRS%20-%20v1.04%20-%20080819-1.pdf>
- OpenSim Ltd. (2011). Omnetpp. Recuperado de: <http://www.omnetpp.org/home/what-is-omnet>.

- Ramos, E. (2010). *El vehículo eléctrico. Su impacto en las redes del futuro*. Recuperado de http://www.asimelec.es/media/Ou1/Curso%20Verano%202010/Las%20TICs%20y%20el%20coche%20el%20C3%A9ctrico_Enrique%20Ramos_Telvent.pdf
- REDORBIT. *Energy Efficiency Technologies Offer Major Savings*. (2009). Recuperado de: http://www.redorbit.com/news/technology/1797363/energy_efficiency_technologies_offer_major_savings
- Revista Electroindustria. (2010) Smart Grids: Incorporando inteligencia en las redes eléctricas. Recuperado de: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1422&tip=9>
- Richards, H.C. (2009, Marzo-Abril). Interoperability. *Intelligent Utility*. Vol 1. Pag. 28- 31. Recuperado de: http://www.nxtbook.com/nxtbooks/energycentral/iu_20090304/#/32
- Solans, J. (2010. Junio). *Vehículo Eléctrico ¿Tan sencillo como Plug & Play?*. Recuperado de: <http://tss10.btec.org/descargas/btec50.pdf>
- Sonoma Innovation. (2009) *Smart Grid Communications Architectural Framework Smart Grid Interoperability Standards IP Protocol & Wireless/AMI*. Recuperado de: <http://www-users.cselabs.umn.edu/classes/Fall-2009/seng5861/project/a1ueNt4L.pdf>
- TechNet. (2009, Diciembre). *New Poll Finds Wide Majority of Americans Support New Technologies for Smart Grid and Improved Home Energy Management*. Recuperado de: <http://www.prnewswire.com/news-releases/new-poll-finds-wide-majority-of-americans-support-new-technologies-for-smart-grid-and-improved-home-energy-management-79818962.html>
- The GridWise Architecture Council. (2008, Marzo). *GridWise Interoperability ContextSetting Framework*. Recuperado de: http://www.gridwiseac.org/pdfs/interopframework_v1_1.pdf
- Torchia, M. (2011, Marzo). *Top 10 Considerations in Selecting a Distribution Area Network for Smart Grids*. IDC Energy Insights. Recuperado de: http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/IDC_Exec_Brief_0311.pdf
- Trilliant (2009). *Empowering the Smart Grid*. Recuperado de: <http://mthink.com/utilities/utilities/trilliant-0>
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL), (2006, Junio). *Determinación de consumo final de energía en los sectores residencial urbano y comercial y determinación de consumos para equipos domésticos de energía eléctrica y gas*. Recuperado de: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Residencial/Consumo_Final_Energia.swf
- Varga, A. (2011). Manual OMNET++. Recuperado de: <http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/Manual.pdf>
- Verschueren, T., Haerick, W., Mets, K., Develder, C., De Turck, F. & Pollet, T. (2010, Abril). *Architectures for smart end-user services in the power grid*. Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP. Osaka. 316 – 322.
- Wacks, K. (2009, Enero). *GridWise Architecture Council / NIST Home-to-Grid Domain Expert Working Group Requirements*. Recuperado de: http://cio.nist.gov/esd/emaildir/lists/h2g_interop/pdf00001.pdf
- Yang, W., Guo, T. & Chen, T. (s/f). *Power Quality monitoring and analysis based on IEEE P2030 Smart Grid Task Force*. Recuperado de: http://www.aesieap0910.org/upload/File/PDF/4-Technical%20Sessions/TS04/TS0401/TS0401_FP%20.pdf
- ZigBee Alliance. (2010, Julio) Smart Grid Insights V2G. Recuperado de: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/10-5873.pdf>
- Yoshihiro, K. Tsuyoshi, M. (2011, Diciembre). Smart Grid Architecture. Recuperado de:
- Zimmerman, D., Murillo-Sánchez, C. & Gan, D. (s.f). (2010) *MATPOWER. A MATLAB Power System Simulation Package*. Recuperado de: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>