

Evaluación del rendimiento de una red de Infraestructura de Medición Avanzada basada en Wimax a través de OPNET para aplicaciones de Smart Grid

Seminario de Redes de Computadores IPD-438

Patricia Franco Troya (382019201)
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
patricia.franco@usm.cl
4/2/2020

Resumen—Una Smart Grid se caracteriza por un flujo bidireccional de información. Como parte de esta red, la Infraestructura de Medición Avanzada (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*), proporciona una serie de nuevos servicios como la fijación de precios (*Princing*), la respuesta a la demanda (*Demand Response, DR*), la medición automatizada, la carga de vehículos eléctricos (*Electric Vehicle, EV*) y la automatización de la distribución (*Distribution Automation, DA*). La simulación de una red AMI para soportar aplicaciones simultáneas de Smart Grid constituye aún un desafío. Para ello se propone un escenario basado en Wimax e implementado en el simulador OPNET.

Index Terms—Smart Grid, Infraestructura de Medición Avanzada, Wimax, OPNET

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de energía desempeñan un papel fundamental en el apoyo a la sociedad industrializada. Estas redes eléctricas fueron diseñadas hace décadas, con el objetivo principal de entregar electricidad desde las grandes centrales eléctricas hasta hogares e industrias. En los últimos años, sin embargo, se han introducido nuevas tecnologías y conceptos que prometen cambiar la forma en que se produce, se gestiona y se consume la electricidad. Es aquí donde aparece la Red Eléctrica Inteligente o Smart Grid, la cual es un sistema que implementa la teoría de las Telecomunicaciones dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia en toda su cadena productiva: Generación, Distribución y Consumo por parte del usuario final. Valiéndose de Internet, usa herramientas informáticas y domóticas, así como el equipamiento más innovador, para dar una respuesta firme a la volátil demanda de electricidad. Es una tecnología de futuro, pues convierte al usuario final en un elemento activo, debido a que se caracteriza por un flujo bidireccional de información, desde las centrales eléctricas hasta los usuarios finales y viceversa, con una entrega de energía automatizada y ampliamente distribuida. En otras palabras, permite gestionar el consumo de energía

más eficientemente y con mayor seguridad. [1]

Una Smart Grid incorpora la Generación Distribuida de Energía, que a través de un nuevo concepto, los Recursos Energéticos Distribuidos (*Distributed Energy Resources, DERs*), permite llevar la energía eléctrica hasta lugares que queden aislados debido a fallas. Estos no son más que fuentes de generación de energía a pequeña escala ubicadas cerca del consumidor final [2]. Esta red eléctrica introduce además el concepto de Red de Área Hogar (*Home Area Network, HAN*), que facilita la comunicación y la interoperabilidad entre los dispositivos digitales presentes en el interior o en las inmediaciones de una casa, mediante el Sistema de Gestión de Energía del Hogar (*Home Energy Management System, HEMS*); lo que posibilita centralizar efectivamente la gestión de los servicios y proporcionar a los clientes un servicio integral para el intercambio de información. Es por ello que, la Smart Grid integra también una plataforma que garantiza el flujo de información entre proveedores y usuarios finales, la **Infraestructura de Medición Avanzada** (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*). Este sistema proporciona una serie de funciones importantes que antes no eran posibles o debían realizarse manualmente, como pueden ser la fijación de precios (*Princing*), facturación, respuesta a la demanda (*Demand Response, DR*), medición automatizada, vehículos eléctricos (*Electric Vehicles, EV*) y automatización de la distribución (*Distribution Automation, DA*) [3]. La clave para implementar exitosamente dichas aplicaciones es escoger apropiadamente una estructura de red que provea tal comunicación bidireccional entre los terminales.

La red de comunicaciones para Smart Grid puede ser descrita como una arquitectura multicapa que incluye una Red de Área Amplia (*Wide Area Network, WAN*), que

actuará como backbone, una Red de Área de Vecindario (*Neighborhood Area Network, NAN*), que interconectará la WAN con una Red de Área Local de Clientes o red local de un hogar, edificio o industria. Entre las tecnologías más populares para la red WAN se encuentran la fibra óptica, las comunicaciones por líneas eléctricas (*Power Lines Communications, PLCs*) y la infraestructura de red celular. En el caso de la red NAN, entre las más implementadas se encuentran Zigbee, Wi-Fi (*Wireless Local Area Network, WLAN*) y RF 900MHz (*Radio frequency*). Cada aplicación de Smart Grid tiene sus propios requerimientos en términos de latencia, tasa de transferencia, fiabilidad, área de cobertura y seguridad. Por tanto, se hace extremadamente importante evaluar las diferentes tecnologías existentes para facilitar la comunicación dentro de la AMI. [1]

Existe una amplia cantidad de trabajos investigativos que se centran en la comparación del rendimiento de las tecnologías antes mencionadas. En [4] los autores comparan diferentes tecnologías (Wi-Fi, Zigbee, Ethernet) y evalúan su sustentabilidad para soportar aplicaciones de Smart Grid, centrándose en la Red de Área Local de los Clientes. Mientras que en [5] proveen un resumen exhaustivo de posibles infraestructuras de red de comunicaciones para la medición basados proyectos reales y analizan sus ventajas y desventajas en términos de costo, rango de comunicaciones y fiabilidad. Por otra parte, en [6] se propone un modelo de red de comunicaciones para Smart Grid considerando los requerimientos de diferentes aplicaciones, capacidad de los enlaces y tráfico. Zaballos *et al.* [7] y Aggarwal *et al.* [8] plantean una arquitectura heterogénea con un detallado análisis de los requerimientos de comunicaciones. Sin embargo, estos trabajos no toman en cuenta la infraestructura ya puesta en práctica. Otros trabajos [9]–[11] describen cómo diferentes aplicaciones (DR, fijación de precios, EV) pueden ser monitoreadas en una red AMI pero no detallan si la actual infraestructura permite la operación simultánea de estos nuevos servicios. En [3] los autores discuten los requerimientos técnicos impuestos por AMI en la red de comunicaciones y discuten cada standard de aplicación encontrado en la literatura basado en estos requerimientos. Este último estudio, sin embargo, no provee simulación alguna de los servicios, ni tiene en cuenta la operación simultánea de los mismos.

La simulación exhaustiva y el análisis de la capacidad de una red AMI para soportar múltiples aplicaciones simultáneas de Smart Grid constituyen aún un desafío, por lo que se convierte en el problema a resolver en este estudio. El software OPNET se presenta como la herramienta idónea para llevarlo a cabo. Basado en lo anterior, las principales contribuciones de este trabajo son:

- Tecnologías populares en el mercado serán simuladas en el software antes mencionado y su rendimiento será evaluado. El estudio se centra en el estándar 802.16: WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave*

Access) combinado con fibra óptica como una primera opción para el backbone de la red (en el futuro se prevee repetir el estudio empleando otras tecnologías para finalmente establecer una comparación).

- El rendimiento de la red será evaluado teniendo en cuenta la operación simultánea de varias aplicaciones.
- Se brindará un análisis de la capacidad de la red AMI para soportar varias aplicaciones de Smart Grid.

El trabajo está dividido en varias secciones. En la sección II se discutirán las estructuras de red para aplicaciones de Smart Grid: las principales tecnologías de comunicación desplegadas y los componentes típicos de una red AMI. En la sección III se presenta el escenario de implementación, así como las aplicaciones y sus requerimientos técnicos. Seguidamente, en la sección IV se describe el algoritmo para la simulación, y se detallan el escenario en OPNET y las asunciones que fueron tomadas para su correcta operación. Por otra parte, en la sección V se introducen los resultados obtenidos, y finalmente, en la sección VI se plantean las conclusiones del trabajo realizado.

II. ESTRUCTURA DE RED PARA APLICACIONES DE SMART GRID

La tecnología AMI es un componente vital dentro de la Smart Grid, ya que proveerá de una considerable cantidad de nueva información tanto a usuarios como a compañías eléctricas. El uso de esta tecnología permitirá eliminar la lectura manual de los contadores, así como los viajes de campo para la conexión y desconexión del sistema, y permitirá a los usuarios finales una mejor gestión de su consumo [3]. Para llevar a cabo este sofisticado flujo de información en dos sentidos es necesario desplegar una red de comunicaciones que facilite el intercambio.

La arquitectura de la red se muestra en la Figura 1. Los medidores inteligentes se conectan a una unidad central, llamada colector de datos o concentrador, formando una red de área de vecindario (NAN). Cada concentrador de datos también se conectará a la red WAN, también llamada *backhaul*, a través de un punto de colección al borde de la WAN que proporciona conexiones y/o consolidación para el acceso a datos de medición [3]. Todos los datos enviados por medidores inteligentes y otros dispositivos de control serán retransmitidos a un servidor central que ejecuta una aplicación de administración ubicada en el centro de control de servicios públicos.

II-A. Tecnologías de comunicación desplegadas en las redes AMI

Con base en proyectos puestos en práctica en Estados Unidos [12], la Figura 2 resume la información relevante acerca de las prestaciones de las redes AMI implementadas, incluyendo el número de medidores y las tecnologías empleadas en el *backhaul* (WAN) y la red de medidores inteligentes (NAN).

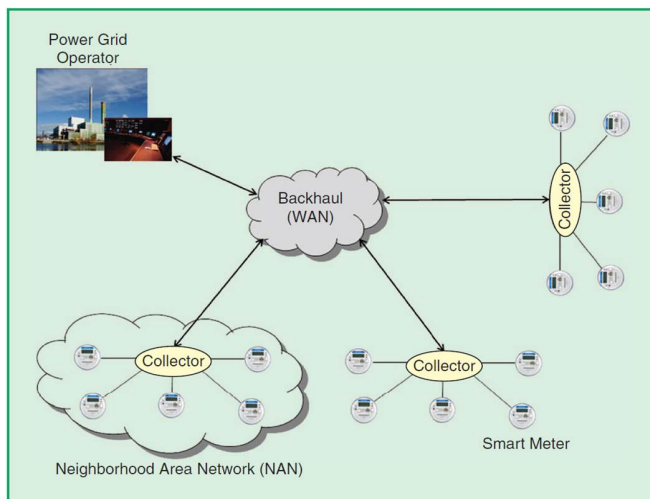


Figura 1. Estructura de red AMI. [3]

Del análisis de la Figura 2, se puede afirmar que WiMAX/LTE (*Long Term Evolution*) son las tecnologías de comunicación más populares para la red troncal AMI. Entre las dos opciones, se encuentra la fibra óptica, que presenta ventajas en cuanto al ancho de banda, siendo este mayor que el de la red celular. Esto se debe a que el ancho de banda de la red WiMAX/LTE necesita ser compartido con otros clientes en la misma red. Además, la fibra óptica puede garantizar un mayor nivel de confiabilidad que 4G/LTE durante condiciones climáticas adversas, pero los costes de implementación son mayores. La red de malla de Radiofrecuencia (RF de 900 MHz) parece ser la elección más popular para soportar comunicaciones en redes de medidores inteligentes. Esto se debe a que garantiza una alta fiabilidad y penetración de la señal.

II-B. Componentes típicos de una red AMI

A partir de lo anterior, es posible afirmar que los componentes típicamente desplegados en una red AMI son:

- **Centro de control:** es el responsable de la gestión de operaciones de la Smart Grid. Automatiza el proceso de recolección de datos, evalúa su calidad, genera estimados de posibles fallas y difunde la información de precios o comandos DR.
- **Estaciones Base:** se comunican inalámbricamente con los medidores inteligentes y demás dispositivos, y usando fibra óptica se conecta al Centro de Control.
- **Colector de datos:** es una combinación de software y hardware que recolecta información desde los medidores inteligentes y la reenvía a la compañía eléctrica. Son especialmente populares en zonas densamente pobladas.

- **Dispositivos de campo:** son dispositivos que permiten el control remoto desde una locación central para la correcta puesta en práctica de algunas aplicaciones como DA (reguladores de voltaje, switches, banco de capacitores).
- **Medidor inteligente:** Metro digital que se usa para registrar el consumo de energía y enviarlo hacia la compañía. Recibe comandos además de señales de precios enviadas a los usuarios.

III. ESCENARIO DE IMPLEMENTACIÓN

La Figura 3 ilustra una estructura de red que soporta diferentes aplicaciones AMI detalladas posteriormente (DR, mediciones, facturación, EV y DA). En esta figura, un grupo de los medidores inteligentes y los dispositivos de campo están conectados a un concentrador de datos, y estos a su vez, al centro de control a través de la estación base. Tener concentradores de datos aumenta la cantidad de medidores inteligentes y dispositivos de campo que pueden ser conectados a una misma estación base. La comunicación entre el centro de control y las estaciones base se basa en fibra óptica, mientras que entre las estaciones base y los concentradores de datos se implementa WiMAX, y entre concentradores y medidores inteligentes, RF 900 MHz.

III-A. Aplicaciones y requerimientos técnicos

Como se adelantaba al inicio de esta sección, son varias las aplicaciones que se pueden implementar en una Smart Grid. En este estudio se tuvieron en cuenta:

- **Distribución automatizada (DA):** es el proceso mediante el cual la recopilación de datos se automatiza y analiza. El control se ejecuta desde las compañías eléctricas. [13]
- **Respuesta a la demanda (DR):** se define como las acciones voluntarias por parte de clientes individuales (sean estos industriales, residenciales o de cualquier otro tipo) que apuntan a reducir o desplazar su consumo dentro de un intervalo de tiempo dado (horas pico) en respuesta a una señal de precio, incentivo financiero, o situación de peligro para la estabilidad del sistema. [14]
- **Fijación de precios:** precios de cada servicio enviado por las compañías a los clientes. En Smart Grid el precio es dinámico: es determinado por el costo de producción en tiempo real, transmisión y distribución, que puede variar mucho durante un día. [1]
- **Mediciones:** visualización del uso de la energía, información de precios, tarifas dinámicas y el control automático de dispositivos eléctricos a través de los

Project name	Number of metres	Backbone network					Smart metre network			
		Fibre	WiMAX/LT E	RF 900 MHz	PLC	Others	WiFi	ZigBee	900 RF	PLC
Knoxville smart grid community project, TN	3393		X					X		
customer driven design of smart grid capabilities, WI	4355		X							X
AMI pilot, LA	4855	X						X		
smart grid modernisation initiative, OH	5033		X					X		
smart grid project, IN	7474	X						X		
AMI and smart grid development programme, LA	10,596	X						X		
connected grid project, OH	12,575	X						X		
Woodruff electric AMI project, AR	14,450					X			X	
Leesburg smart grid investment grant project, FL	16,683	X								X
Connecticut municipal electric energy cooperative project, CT	23,449	X						X		
Pacific NW division smart grid demonstration project, WA	30,722	X			X			X		
smart grid team 2020 programme, MD	38,551	X						X		
AMI/metre data system, CO	44,920		X					X		
Urbank water and power smart grid programme, CA	51,928		X							X
smart grid programme, CA	52,257	X					X			
Lafayette utilities system smart grid project, LA	63,967	X					X	X		
AMI/metre data system, SD	68,980		X					X		
front range smart grid cities, CO	85,328	X	X					X		
AMI smart grid initiative, CA	85,582	X			X			X		
smart grid initiative, FL	124,000			X				X		
smart grid project, NY & NJ	170,000	X					X	X	X	X
IPC smart grid programme, ID	380,928		X						X	
central main power (CMP) AMI project, ME	622,000	X	X					X		
smart currents, MI	688,717		X					X		
smart grid initiative, MD	1.3 million		X					X	X	
smart grid project by Centerpoint energy, TX	2.1 million	X						X		
energy smart Florida, FL	3 million	X	X		X			X		

Figura 2. Selección de redes AMI puestas en práctica. [1]

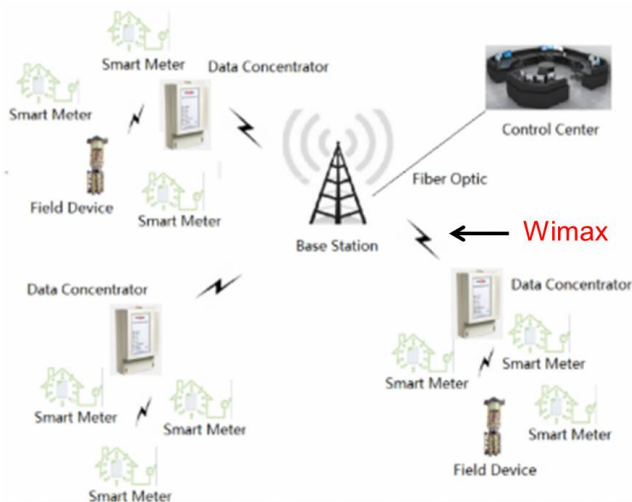


Figura 3. Escenario de implementación. [1]

medidores inteligentes. [1]

- **Vehículos eléctricos (EV):** procesos de control de los niveles de carga a través de los diferentes puntos

	Participation	Operation begin time, min		Operation duration, s
		1st scenario	2nd scenario	
real-time DR	100%	50	20.8	180
metering	100%	1, 16, 31, 46		5
pricing	100%	21.6		5
EV	50%	55		5
DA	5 devices in each cell	45		5

Figura 4. Características de las aplicaciones de Smart Grid. [1]

inteligentes que existen para ello, capaces de transmitir y recibir datos, y responder a señales externas. [15]

Cada una de estas aplicaciones tiene características diferentes en cuanto a tamaño de los datos, frecuencia de muestreo de los datos, latencia y fiabilidad. Por tanto es necesario asegurar su correcta operación. Estas características se resumen en la Figura 4.

Se consideran dos tipos de DR: en demanda (*on-demand*), que programa un reducción de la demanda con al menos dos horas de anterioridad y en tiempo real (*real-time*), que envía

solicitudes de reducción de la demanda a los usuarios en tiempo real. La fijación de precios es un mensaje broadcast a todos los usuarios finales. Igualmente se consideran dos tipos de mediciones: en demanda (*on-demand*), que reúne la información según sea necesario y mediciones en intervalos programados, que captura la información de los usuarios en intervalos convenidos. La función de EV es controlar los niveles de carga de los vehículos. DA incluye la detección de las condiciones de operación de la red de distribución y permite realizar ajustes para mejorar el flujo de potencia general y el rendimiento a nivel de distribución, controlando dispositivos de campo como bancos de condensadores e interruptores.

IV. SIMULACIÓN EN OPNET MODELER 14.5

Para llevar a cabo la simulación se siguió el algoritmo de implementación mostrado en la Figura 5.

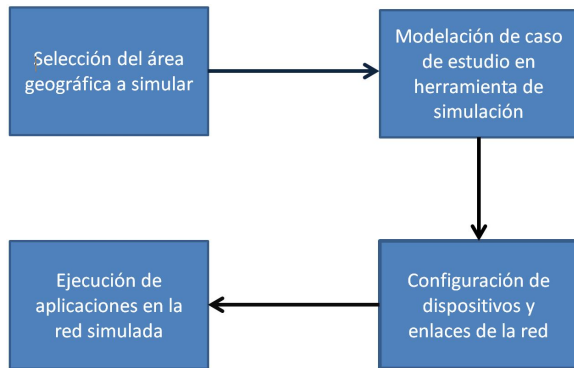


Figura 5. Algoritmo a seguir

Los datos para la simulación tienen base en el despliegue llevado a cabo por CenterPoint Energy (*CenterPoint Energy Smart Grid Project*) [12]. En la Figura 6 se resumen el área de servicio (mi^2), el número de torres WiMAX, concentradores de datos y medidores inteligentes que fueron implementados en este proyecto.

	Reference case
service area (sq. mile)	5000
WiMAX tower	112
data collector	5200
smart metre	2.2 million

Figura 6. Detalles del proyecto AMI desplegado por CenterPoint Energy. [1]

A partir de lo anterior es posible notar que la densidad de medidores inteligentes en el área de servicio es de 440m por milla cuadrada ($2.2 \cdot 10^6 / 5000 mi^2$). La razón de estaciones base a concentradores de datos es de 112:5200 o 1:46, mientras que de los concentradores a los medidores inteligentes 5200:2.2*10⁶ o 1:43, y de las estaciones base a los medidores de 112:2.2*10⁶ o 1:19 642.

De las 5000 mi^2 cubiertas en [12], se escogieron 600 para la simulación. Esta área se muestra en la Figura 7. En ella 15 estaciones base WiMAX dan servicio a 290 000 medidores inteligentes. El área de cobertura (con forma hexagonal) de cada torre es de aproximadamente 40 mi^2 , con un radio (r) de aproximadamente 4mi. [1]

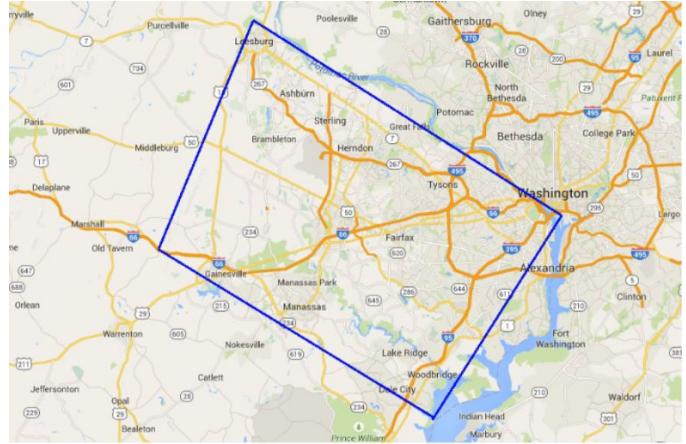


Figura 7. Área de servicio simulada. [1]

Ya que la relación entre estaciones base y concentradores es de 1:46, y entre concentradores y medidores de 1:423, entonces hay 46 concentradores en cada celda y cada uno está conectado a 423 medidores. Esto constituye el escenario crítico de implementación, puesto que como se puede observar en la Figura 2, la cantidad de medidores inteligentes por concentrador es inferior a 423. Se asume que los medidores están aleatoriamente distribuidos en cada celda, lo que es comparable con un ambiente real de implementación.

La tecnología WiMAX utilizada en este estudio es el acceso inalámbrico multiplexado por división de frecuencia ortogonal (*Wireless Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDMA*) de 20 MHz. Para este tipo de WiMAX, la banda de frecuencia es de 2.3–2.5 GHz y el ancho de banda es de 20 MHz. La tecnología WiMAX proporciona comunicaciones bidireccionales a través del enlace de subida (*Uplink, UL*) y el enlace de bajada (*Downlink, DL*). El UL transfiere la información desde los medidores inteligentes hasta las estaciones base, y el DL desde las estaciones base a los medidores inteligentes.

Para la tecnología WiMAX, tanto UL como DL se dividen en múltiples subportadoras. Estas se clasifican en diferentes tipos de acuerdo a sus funciones. Las subportadoras de guarda proporcionan un *intervalo de protección* que minimiza la interferencia del canal. Las subportadoras de datos, como su nombre lo indica, se utilizan para la transferencia de datos. Mientras que las subportadoras piloto se utilizan para la sincronización, y las subportadoras de corriente directa (*Direct current, DC*) marcan el punto central del canal. La red WiMAX OFDMA

de 20 MHz tiene 2048 subportadoras en ambos enlaces (UL y DL). [1]

IV-A. Descripción de los escenarios

El escenario implementado se muestra en la Figura 8. Para la simulación fueron escogidas cinco aplicaciones: DR en tiempo real, mediciones, fijación de precios, control de carga de vehículos eléctricos y DA.

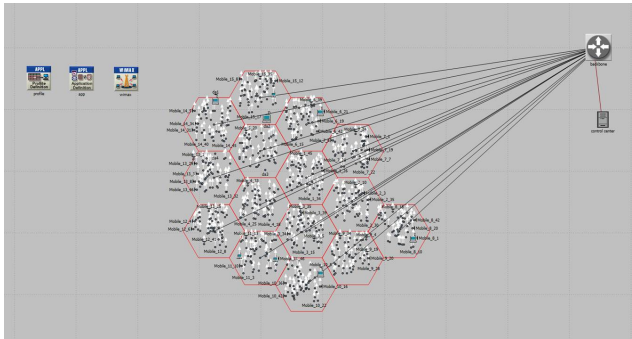


Figura 8. Escenario simulado en OPNET

Los concentradores de datos fueron simulados usando estaciones suscriptoras (*Subscriber Stations, SS*). Las estaciones base, por su parte, se simularon empleando el bloque BS (*Base Stations*), y el centro de control, mediante un bloque de servidor.

Como ya fue discutido, el enlace entre concentradores y estaciones base es a través de WiMAX, y entre las estaciones base y el centro de control a través de fibra óptica.

IV-B. Asunciones en las aplicaciones

En cada una de las aplicaciones que fueron configuradas se asume que el grado de participación de los usuarios es de 100 %. Significa la totalidad de usuarios estarán conectados durante el intervalo de operación de estas aplicaciones. En el caso de DA, solo participan los dispositivos de campo. Las señales de precios tienen como fuente el servidor, representando al Centro de Control, y como destino a las estaciones suscriptoras que actúan como concentradores de datos. El resto de señales, se originan en las SS e irán hasta el servidor.

El tiempo de simulación es de 60 min, y la frecuencia de las señales de medición es de 15 min. Por tanto, opera en cuatro ocasiones durante el intervalo de tiempo de simulación. El resto de las aplicaciones se asume que operan cada 100s durante el intervalo de simulación.

Las características de cada una de estas señales se resumen en la Tabla I.

Se asume además la operación simultánea de todas las aplicaciones, para de esta manera analizar un caso crítico

Tabla I
CARACTERÍSTICAS DE LAS APLICACIONES SIMULADAS

Aplicación	Tamaño del paquete (Bytes)	Parámetro Request-Time (Segundos)	Inter-
DR en tiempo real	100	100	
Mediciones	256	900	
DA	100	100	
Precios	100	100	
EV	100	100	

de operación. Se configuró una *seed* en 20, por tanto, los resultados corresponden a un promedio de 20 simulaciones corridas.

Cada aplicación constituye un nuevo servicio soportado por una red TCP/IP. Es por ello que los parámetros de configuración de cada una (tamaño del mensaje, frecuencia, duración de la trama) y el comportamiento de las señales pueden variar de una implementación a otra. Por estos motivos, para facilitar la simulación, se asumió que cada señal se comporta como una mensaje FTP (*File Transfer Protocol*).

Aunque en la práctica este protocolo consiste en múltiples comandos, en OPNET solo se simulan dos operaciones básicas para la transferencia de datos:

- **Put:** Carga el archivo FTP al servidor.
- **Get:** Descarga el archivo al nodo cliente.

En ambas operaciones se envían mensajes de Control y de Datos, que a diferencia de en los casos de operación reales, en OPNET estos mensajes se envían sobre la misma conexión TCP. [16]

V. RESULTADOS

En la Figura 9 se muestran los resultados arrojados en cuanto a Tasa de Transferencia en los enlaces WiMAX.

Como las señales de medición tienen una frecuencia de operación de 15min, esto provoca un aumento del tráfico en este mismo intervalo de tiempo. Aun así, se observa que la tasa de transferencia es no mayor que 1Mbps y por tanto, entra en un rango aceptable.

Otro parámetro de interés es la latencia. La Figura 10 muestra el comportamiento de la misma para los enlaces entre los concentradores y las estaciones base (WiMAX), el cual no supera los 35ms.

En el caso del enlace por fibra óptica, latencia se muestra en la Figura 11. Esta no excede los $620\mu s$. Al inicio existe una demora mayor, debido a los procesos de *handshaking* entre los dispositivos.

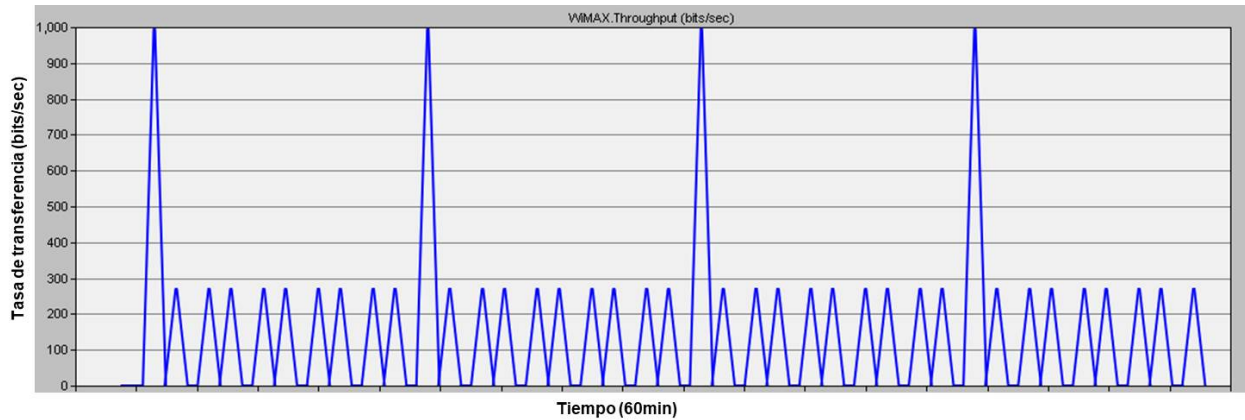


Figura 9. Tasa de transferencia en los enlaces Wimax

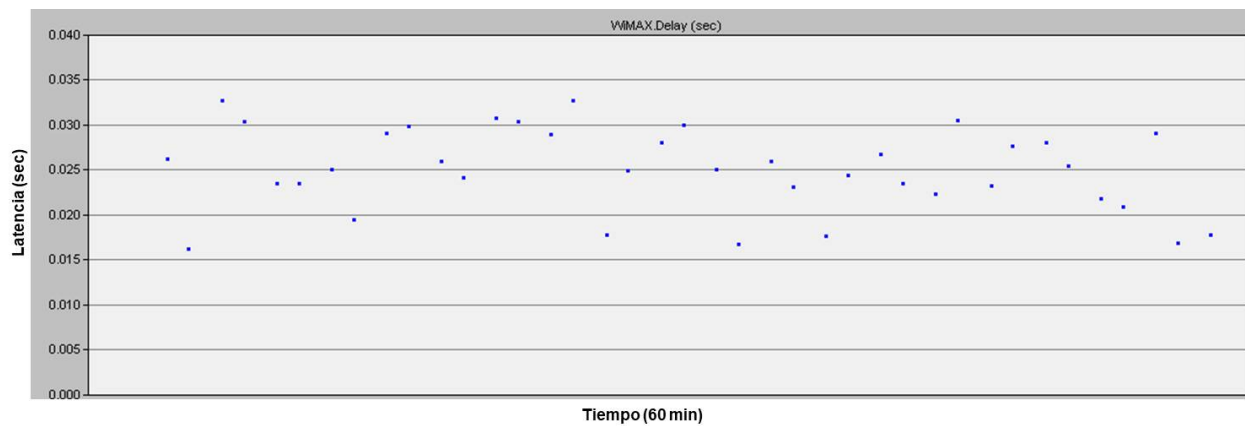


Figura 10. Latencia en los enlaces WiMAX

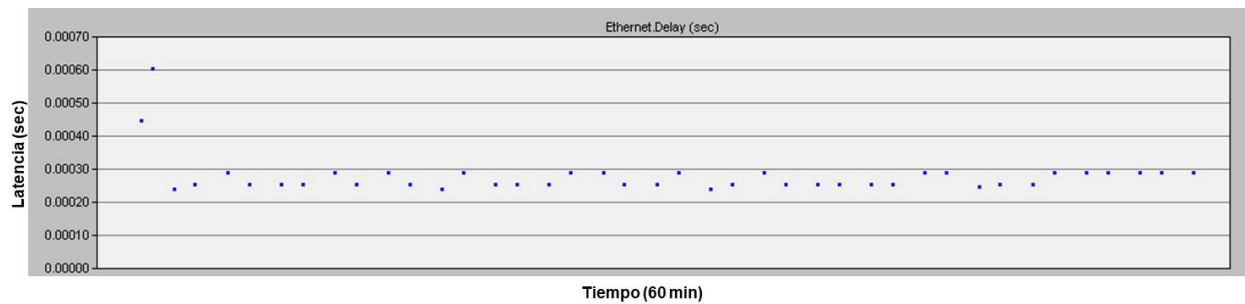


Figura 11. Latencia en el enlace por fibra óptica

En ambos casos no se introduce una demora significativa en la red. Por lo que estos parámetros se consideran en un rango admisible, y demuestran que esta puede ser una configuración eficiente como red de comunicaciones para soportar aplicaciones de Smart Grid.

El rango admisible de valores se basa en resultados arrojados por estudios anteriores. Tal es el caso de [1] donde la latencia no rebasa los 50ms para en un escenario de operación simultánea.

Aunque fuera del alcance de este estudio, cabe mencionar que, en el futuro se pretende comparar diferentes tecnologías en vistas a una posible adaptación al contexto chileno.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo una tecnología de comunicación popular que admite operación de red AMI, es decir, el estándar IEEE 802.16 (WiMAX), fue discutida y su el rendimiento simulado en OPNET. El rendimiento de las redes de comunicaciones AMI fue evaluado considerando la operación simultánea de las aplicaciones de Smart Grid más

populares, y se presentó además un análisis de la capacidad de Smart Grid para soportar múltiples aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Desong Bian, Murat Kuzlu, Manisa Pipattanasomporn, Saifur Rahman, Di Shi *Performance evaluation of communication technologies and network structures for smart grid applications*, IET Journals 2019
- [2] *Distributed Energy Resources (DER) — WBDG - Whole Building Design Guide*, link: <https://www.wbdg.org/resources/distributed-energy-resources-der>
- [3] Faycal Bouhafs, Michael Mackay, Madjid Merabti *Links to the future: communication requirements and challenges in the smart grid*, IEEE Power & Energy Magazine, 2012
- [4] Bian, D., Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., et al.: 'Assessment of communication technologies for a home energy management system'. ISGT 2014, Washington, DC, 2014, pp. 1–5
- [5] Bian, D., Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., et al.: 'Analysis of communication schemes for advanced metering infrastructure (AMI)'. 2014 IEEE PES General Meeting — Conf. & Exposition, National Harbor, MD, 2014, pp. 1–5
- [6] Bian, D.: 'An expert-based approach for demand curtailment allocation subject to communications and cyber security limitations'. PhD thesis, Virginia Tech, USA, 2016
- [7] Zaballos, A., Vallejo, A., Selga, J.M.: 'Heterogeneous communication architecture for the smart grid', IEEE Netw. Mag., 2011, 25, (5), pp. 30–37
- [8] Aggarwal, A., Kunta, S., Verma, P.K.: 'A proposed communications infrastructure for the smart grid', 2010 Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Gothenburg, 2010, pp. 1–5
- [9] Moore, S.: 'Key features of meter data management systems', [online]. link: <https://www.itron.com/na/PublishedContent/> Nov. 2018
- [10] Li, H., Lai, L., Qiu, R. C.: 'Scheduling of wireless metering for power market pricing in smart grid', IEEE Trans. Smart Grid, 2012, 3, (4), pp. 1611–1620
- [11] Song, Y., Zheng, Y., Hill, D. J.: 'Optimal scheduling for EV charging stations in distribution networks: A convexified model', IEEE Trans. Power Syst., 2017, 32, (2), pp. 1574–1575
- [12] CenterPoint Energy Houston Electric: 'Smart grid project', [online] link: <https://www.smartgrid.gov/project/>
- [13] *What is Distribution Automation?* link: <https://www.taitradioacademy.com/utilities-and-distribution-automation-1/>
- [14] Camila Lozano, Francisco Manríquez: *Demand Response a Nivel de Grandes Clientes Libres en Chile*, IEE3373 - Mercados Eléctricos link: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno16/dresponse/mercados.html>
- [15] Olly Frankland: *The role of Electric Vehicles in a Smart Grid*, Regen, Marzo 2018 link: <https://www.regen.co.uk/the-role-of-electric-vehicles-in-a-smart-grid/>
- [16] Adarshpal S. Sethi, Vasil Y. Hnatyshin: *The practical OPNET user guide for Computer Network Simulation* Taylor & Francis Group, 2013