

Simulación de comunicación inalámbrica WAN para internet de las cosas: Un estudio de caso

Simulation of wireless communication WAN for internet of things: A case study

Fernando Ulloa-Vásquez¹ Luis García-Santander^{2*} Dante Carrizo³

Recibido 06 de enero de 2022, aceptado 10 de febrero de 2022

Received: January 06, 2022 Accepted: February 10, 2022

RESUMEN

Existen múltiples tecnologías para el transporte de info-comunicaciones, entre objetos y máquinas para internet. Dos de las más robustas y de mayor cobertura y que soportan múltiples usuarios son 4G y WiMax IEEE 802.16x. En este trabajo se presenta una simulación de cobertura terrestre de ambas tecnologías de comunicación inalámbrica, como alternativa de comunicación de banda ancha para nuevos operadores libres, privados o soportados por instituciones públicas como municipalidades o cooperativas regionales. Se estudiaron los casos de las ciudades de Riga, Bucarest, Florianópolis, Santiago, Concepción y Copiapó. El estudio utiliza el software Radio Mobile GLOBE-BIL (Versión 11-3-7), obteniéndose gráficas de cobertura de propagación sobre mapas digitales de elevación de terreno SRTM liberados por la NASA. Esta simulación determina el número de antenas requerida para millones de usuarios en el contexto del Internet de las Cosas, así como cuantificar los kilómetros cuadrados de cobertura de propagación inalámbrica que se pueden alcanzar técnicamente para cada una de las ciudades del proyecto. Los resultados obtenidos muestran que WiMax soporta mayor cantidad de usuarios conectados, posee mejor cobertura y requiere menor número de antenas. Por otro lado, para el indicador de cobertura de propagación los resultados para 5 ciudades son mejor la tecnología WiMax que 4G, salvo Santiago (Chile) donde se alcanza el mejor rendimiento para 4G sobre WiMax.

Palabras clave: 4G, WiMax, cobertura, IoT, M2M.

ABSTRACT

There are multiple technologies for transporting info-communications between objects and machines for the internet. Two of the most robust and with the highest coverage and support for multiple users are 4G and WiMax IEEE 802.16x. This paper presents a simulation of land coverage of both wireless communication technologies as a broadband communication alternative for new free, private, or supported operators by public institutions, such as municipalities or regional cooperatives. The cases of the cities of Riga, Bucharest, Florianópolis, Santiago, Concepción, and Copiapó were studied. The study uses Radio Mobile GLOBE-BIL software, obtaining propagation coverage graphs on digital SRTM terrain elevation maps released by NASA. This simulation determines the number of antennas required for millions of users in the context of the Internet of Things. It quantifies the square kilometers of wireless propagation coverage that can be technically achieved for each project city. The results show that WiMax supports a more significant number of connected users, has better coverage, and requires fewer antennas. On the other hand, for the propagation coverage indicator, the results for 5 cities are better for WiMax technology than 4G, except for Santiago (Chile), where the best performance is achieved for 4G over WiMax.

Keywords: 4G, WiMax, coverage, IoT, M2M.

¹ Universidad Tecnológica Metropolitana. Dpto. de Electricidad. Santiago, Chile. E-mail: fulloa@utem.cl

² Universidad de Concepción. Dpto. Ing. Eléctrica. Concepción, Chile. E-mail: luis.garcia@udec.cl

³ Universidad de Atacama. Dpto. de Ing. Informática y Ciencias de la Computación. Copiapó, Chile. E-mail: dante.carrizo@uda.cl

* Autor de correspondencia: luis.garcia@udec.cl

INTRODUCCIÓN

La implementación de tecnologías basadas en redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN) dependerán del contexto y de su aplicación (medición, comunicación, monitoreo y control) en máquinas/dispositivos /equipos de medición de consumo eléctrico (Automatic Meter Reading, AMR), así como también del tipo y escala de red a configurar (Wide Area Network WAN, Neighborhood Area Network NAN y Home Area Network HAN), considerando los protocolos dedicados a cada escenario, los que presentarán diferentes niveles de calidad de servicio (Quality of Service, QoS), retardos, latencias y tipos de cobertura.

Las soluciones de comunicación del internet de las cosas (Internet of Things, IoT) deberán ser aplicadas sin alterar la confiabilidad y la calidad de servicio, independiente de la ciudad a implementar y de sus diferencias geográficas-climáticas. En este sentido las soluciones propuestas, podrán ser utilizadas y gestionadas de manera transparente y visible en todo el mundo gracias a la adopción de estándares certificados y validados en su desempeño y operación.

Este trabajo presenta una simulación de comunicación inalámbrica WAN para las ciudades de Riga, Bucarest, Florianópolis, Santiago, Concepción y Copiapó, todas involucradas en el proyecto ITCity Eranet Lac. El estudio compara las tecnologías 4G y WiMax 802.16x utilizando el software Radio Mobile GLOBE-BIL (Band Interleave by Line), un programa de uso libre para fines académicos, que permite la evaluación de propagación radioeléctrica. A través de este software, se obtienen gráficas de cobertura de propagación sobre mapas digitales de elevación de terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) liberados por la NASA (National Aeronautic Space Administration). Esta simulación determina el número de antenas y número de usuarios para ambas tecnologías, así como también los kilómetros cuadrados de cobertura de propagación inalámbrica para cada una de las ciudades mencionadas.

El artículo se estructura como sigue: En primer lugar, se presentan las tecnologías, estándares a simular y comparar; luego se muestra la metodología de investigación del estudio y su desarrollo experimental; a continuación, se presentan los resultados de cada una de las etapas y ciudades a estudiar, se discuten

los resultados anteriores y finalmente, se exhiben las conclusiones de esta investigación.

ANTECEDENTES PREVIOS

Las tecnologías de radiocomunicación digital han tenido un desarrollo creciente en las últimas décadas, lo que se refleja en la gran facilidad de implementación de éstas actualmente. Dentro de estas tecnologías, están las redes celulares que se representan en tecnologías 4G y LTE, que están basadas en los siguientes estándares: Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), CDMA2000 y el Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universales (UMTS) [1].

A continuación, se detallan las dos tecnologías utilizadas para esta investigación.

4G: Red de Comunicación Móvil para Ciudades

La tecnología de comunicación móvil celular utiliza el método de Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA). Esta tecnología mantiene su compatibilidad con las versiones anteriores como General Packet Radio Service (GPRS), el cual suma sus capacidades de paquetes de datos y mejora la tasa de transmisión del antiguo sistema móvil global (Global System Mobile, GSM), para su evolución el estándar EDGE intermedio (Enhanced Data rates for GSM Evolution, EDGE) suma todo lo anterior estandarizado por la Third Generation Partnership Project (3GPP) para la consolidación del internet móvil. Luego estas tecnologías son capaces de lograr una mayor velocidad de datos, tráfico IP y mensajes de texto. La tecnología 4G se basa en un acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access, CDMA) como lo es el sistema universal de sistemas móviles (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS), también conocida como acceso múltiple por división de código de banda ancha (Wireless Code Division Multiple Access, WCDMA).

Esta tecnología de 4G, aplica el estándar de Telecomunicaciones Móviles Internacionales de Difusión Directa (IMT-DS) la cual ocupa un ancho de banda de 5MHz para proporcionar datos de alta velocidad, mejor calidad de voz, acceso a internet y aplicaciones de paquetes. Otro estándar que aplica para el protocolo de transición 3G a 4G, es el Acceso a Paquetes de Alta Velocidad (HSPA) para el enlace

ascendente y el enlace descendente. Posteriormente HSPA evoluciona a HSPA+, que está actualmente disponible para mejorar el rendimiento del WCDMA existente. La tecnología de evolución a largo plazo (LTE) 3GPP y el actual 4G LTE Advanced, diseñado para aumentar la capacidad y la velocidad de sus redes celulares han sido más atractivos para la adopción de operadores de telecomunicaciones celulares. La ventaja de adoptar LTE Advanced como la red 4G para la red inteligente, es que se puede minimizar el costo de actualización en la red 3G existente para los operadores tradicionales y las compañías de hardware. Por lo tanto, la tecnología 4G actual y futura 5G, admitirán el acceso inalámbrico de banda ancha fija y móvil, para objetos y máquinas y se complementarán con Wi-Fi para proporcionar una mayor estabilidad y confiabilidad para la conectividad de la última milla. La red 4G garantiza que la QoS sirva para infraestructuras críticas tales como los sistemas de comunicación de servicios de emergencias, como la red inteligente metropolitana [2]. Por otra parte la tecnología WSN ha sido ampliamente estudiada y ha ganado mucha atención por parte del mundo académico y la industria en los últimos años. Esta ha sido aplicada en servicios militares, seguridad y vigilancia, así como también en monitoreo y control en medio ambiente, industria, telemedicina/atención médica y automatización de viviendas/edificios. El despliegue de sensores tiende a crecer en cantidad por sistema, así como en tamaño y variedad en número de redes. Los estudios y literaturas sobre redes sociales y redes ad hoc han cubierto una variedad de temas de investigación. Pueden ser recursos instrumentales en la investigación de WLAN y WSN para la red inteligente, con algunas limitaciones del despliegue de una red de sensores inalámbricos que incluyen por ejemplo el consumo de energía, conectividad, sincronización, control de acceso al medio, enrutamiento, calidad de servicio, seguridad y privacidad [3,4].

WiMax IEEE 802.16x: Red Metropolitana

El IEEE 802.16x ha sido diseñado específicamente para topologías punto-multipunto en ambientes abiertos que con un mismo control de acceso al medio (MAC) puede acomodar diferentes capas físicas (PHY) en el rango de frecuencia de 2 a 6 GHz. El estándar 802.16-2004 fue ratificado por el IEEE en junio de 2004. El estándar 802.16e fue aprobado por IEEE en diciembre de 2005. El propósito del

802.16e es agregar soporte a la movilidad al estándar 802.16d anterior, que se diseñó específicamente para operación fija. La Interoperabilidad mundial mediante accesos por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMax) es el nombre que se le dio al estándar 802.16 que describe la “interfaz aérea para sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha” [5].

WiMax es un concepto parecido a WiFi, pero cualitativamente diferente como veremos por sus características, no sólo por conseguir mayores coberturas y diferentes anchos de banda. WiFi, pertenece a la familia de estándares 802.11, fue diseñada para ambientes inalámbricos internos como una alternativa al cableado estructurado de redes y con capacidad sin línea de vista (NLOS, por sus siglas en inglés) menor a 100 metros. En un principio se diseñó para ofrecer “conexiones Ethernet inalámbricas” y después para garantizar la interoperabilidad entre productos 802.11 de diferentes fabricantes. Por el contrario, WiMax [6], fue diseñado como una solución de última milla para redes metropolitanas (MAN) y prestar servicios a nivel público. Puede entregar todos los niveles de servicio necesarios para un Carrier o portador, dependiendo del contrato con el suscriptor, distintos servicios de paquetes, como IP y Voz sobre IP (VoIP), así como servicios conmutados (TDM), E1s/T1s, voz tradicional (Clase-5), interconexiones ATM y Frame Relay [7]. Para que WiMax entre a la competencia con los servicios de banda ancha para telefonía celular, se ha madurado el estándar 802.16e [8,9]. El estándar 802.16-2004 carece de la característica clave de portabilidad, la cual es solucionada a través del diseño del estándar IEEE 802.16e, lo que con el tiempo significará movilidad a toda escala. Este estándar requiere una nueva solución de hardware/software ya que no es compatible con el anterior 802.16-2004.

El IEEE802.16e, es decir, el mobile WiMax, es capaz de conmutar y hacer roaming. La tecnología acceso de multiplexación por división de frecuencia ortogonal escalable (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access, OFDMA) asigna diferentes subcanales a los abonados y soporta el acceso simultáneo a Internet de múltiples abonados. En condiciones de vista indirecta, el mobile WiMax opera en un rango de frecuencias inferiores a 6GHz. Los operadores que utilizan el 802.16e

para realizar networking, podrán brindar servicios fijos y nómades, así como también servicios tanto para laptops como para teléfonos móviles. El foro WiMax aún debe definir un rango de frecuencia para el 802,16e, pero la experiencia de aplicación indica que 2,3 o 2,5 GHz representan las opciones posibles [10, 11 y 12].

La Tabla 1 muestra algunos factores de comparación entre 4G y WiMax. Allí se destacan las diferencias entre las bandas de frecuencias, anchos de banda, accesos y potencia de transmisión entre otras.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El software Radio Mobile usa modelos digitales de elevación de terreno (mapas digitales) para calcular automáticamente el perfil del trayecto entre el transmisor y el receptor [13]. El software usa el Modelo del Terreno Irregular (ITM por su sigla en inglés) para propagación de radio. El modelo ITM de Longley-Rice [14], es un modelo de propósito general basado en la teoría electromagnética y el análisis estadístico de las características del terreno. Radio Mobile utiliza el modelo ITM, debido a que el modelo es válido en un rango de 200 MHz a 20 GHz el software puede ser usado para predecir la atenuación de las señales de radio en sistemas LAN-WAN. Radio Mobile además de calcular presupuestos de radio enlaces, también genera mapas virtuales y vistas 3D. Además, proporciona información para alinear las antenas

tanto en el plano horizontal como vertical. Para la evaluación de los enlaces propuestos se utilizó el software Radio Mobile versión 3.8.18, el cual basa su funcionamiento en la utilización del algoritmo que permite trabajar en los modos de operación punto a multipunto y predicción de área. El Radio Mobile es compatible con las bases de datos de elevación de terreno NASA - SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), DTED (Digital Terrain Elevation Data), GTOPO30 (Global Topography Data 30 km), GLOBE y BIL (Band Interleave by Line). Radio Mobile es un programa de uso liberado académico para Universidades, y de evaluación para propagación radioeléctrica, diseñado por Mr. Dr. Ing. Roger Coudé, VE2DBE [13].

La operación de cada Unidad Radio (antena base y repetidora) son caracterizados en variables de: Terreno, clima, potencia radioeléctrica, sensibilidad receptores, ganancias de antenas, frecuencias de operación y distancia entre antenas, tales como altura antena base y receptores fijos-móviles, pérdidas, y parámetros de la señal. Para los enlaces entre Unidades Radio (UR) se examinan los perfiles del terreno con mapa y se logran producir diagramas de coberturas múltiples e individuales, para determinar los mejores emplazamientos en terreno de cada una de las ciudades del proyecto ITCity Eranet Lac. Todo esto, proporciona la cobertura de radiocomunicación a un número específico de Unidades Radio objetos o máquinas. Los datos de del terreno se usan para generar mapas de elevaciones de cualquier área,

Tabla 1. Comparación de estándares 4G y WiMax 802.16x

	4G	WiMax
Ancho de banda de canal	850 MHz / 900 MHz / 1900 MHz / AWS (1700-2100 MHz)	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25 MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
Velocidad de transmisión	384 kbps - 2Mbps	1Mbps - 75Mbps
Sensibilidad de receptor	-60 dbm	-90 dbm
Eficiencia espectral	<1,25 bps/Hz	<3,7bps/Hz
Modulación	QPSK/BPSK	QPSK, 16QAM, 64QAM
Banda de frecuencia	5MHz	2GHz-11GHz para fijo; 2GHz-6GHz para móvil
Duplexación	CMDT/TDD	TDD i FDD
Acceso múltiple	TDMA/CDMA	SOFDMA
Estándar	3Gpp	IEEE 802.16
Potencia transmisor	Clase 1 = 33 dbm Clase 2 = 27 dbm Clase 3 = 24 dbm Clase 4 = 21 dbm	23 dbm
Tasa chip	1.22Mcps	7-14 kcps
Cantidad de usuarios	50 - 150	200 - 600

como también los mapas de caminos y ciudades con fotografías aéreas las cuales se pueden fusionar sobre los trazados de mapa y están georreferenciadas.

Modelo de Longley-Rice

El modelo de Longley-Rice ó ITM, es un modelo de radio propagación de propósito general cuyo rango operación en frecuencia está comprendido entre los 200 MHz y los 20 GHz y puede ser aplicado en una amplia variedad de problemas de ingeniería. El modelo se basa en la teoría electromagnética y en análisis estadísticos de las características de terreno y mediciones de radio. Entrega como resultado el valor medio de la atenuación de la señal de radio como una función de la distancia y la variabilidad de la señal en el tiempo y espacio, permitiendo estimar las características de recepción de la señal necesarias en un radio enlace determinado sobre terreno irregular [14]. El modelo original fue desarrollado a finales de los años 80 como resultado de la necesidad de mejorar los sistemas móviles de radio y transmisión de televisión. Fue escrito en forma de algoritmo de tal manera de facilitar la programación de software de procesamiento de datos. La versión de uso actual del algoritmo es la versión 1.2.2, mientras que el software original es el ITM del Institute for Telecommunication Sciences (ITS). Este software utiliza la base de datos de elevación de terrenos GLOBE (Global Land One-km Base Elevation). El modelo permite operar en dos modalidades de trabajo: El modo de predicción de área y el modo punto a punto. El modo punto a punto

es capaz de predecir estadísticamente las pérdidas de propagación sobre un trayecto de propagación determinista a partir de los datos característicos de radio y del entorno. El modo de predicción de área opera de similar forma, sin embargo, no trabaja sobre un trayecto de propagación determinista, si no que genera una proyección del área de cobertura de un terminal dado en función de las características de cada terminal y las irregularidades del terreno.

Variables de entrada del modelo ITS

Las variables de entrada del modelo de Longley-Rice se indican en Tabla 2. En ésta se indican los valores permitidos o los límites para los cuales el modelo ha sido diseñado [14]. Los parámetros del sistema están asociados al conjunto de equipos de radio involucrados y son independientes de las condiciones ambientales.

1. **Frecuencia:** La frecuencia portadora de la señal transmitida. El modelo ITM es relativamente insensible a la frecuencia, frecuentemente un valor definido puede cubrir un amplio ancho de banda.
2. **Distancia:** La distancia circular entre dos terminales.
3. **Altura de antenas:** Corresponde a la altura del centro de radiación por sobre la elevación del terreno, se define en cada terminal.
4. **Polarización:** La polarización de las antenas puede ser vertical u horizontal. El modelo asume que ambas antenas usan la misma

Tabla 2. Parámetros de entrada para el modelo ITM-ITS

Parámetros del sistema	
Frecuencia	200 MHz a 20 GHz
Distancia	1 km a 2000 km
Altura de antenas	0,5 m a 3000 m
Polarización	horizontal o vertical
Parámetros del entorno	
Variable de terreno irregular Δh	rugosidad promedio
Constantes eléctricas del terreno	permitividad y conductividad
Refractividad de la superficie	250 a 400 N-unidades
Clima	7 tipos (ver tabla x)
Parámetros de instalación	
Criterio de posicionamiento	random, careful o very careful
Parámetros Estadísticos	
Fiabilidad respecto a variabilidad de tiempo, locación y situación	0,1% al 99,9%

polarización. Los parámetros del entorno describen estadísticamente las características del lugar en donde operará el sistema. Estos parámetros son independientes del sistema de radio.

5. **Variable de terreno irregular Δh :** Las irregularidades del terreno que se encuentra entre dos terminales se tratan como una función aleatoria de la distancia entre los terminales. Para caracterizar esta función, el modelo ITM utiliza un único valor de Δh para representar de forma simplificada la altura promedio de las irregularidades en el terreno. Algunos valores sugeridos se indican en la Tabla 2.
6. **Constantes eléctricas del terreno:** La permitividad relativa (constante dieléctrica) y la conductividad de la tierra.
7. **Refractividad de la superficie N_s :** Las constantes atmosféricas y en particular la refractividad atmosférica, deben ser tratadas como funciones aleatorias de posición y tiempo. En la mayoría de los casos esta función aleatoria puede ser caracterizada por un valor único N_s que representa el valor normal de la refractividad cercana al nivel de la tierra o superficie. Usualmente se mide en N unidades (partes por millón).
8. **Clima:** Se describe cualitativamente por un conjunto discreto de etiquetas. En conjunto el clima se utiliza para caracterizar la atmósfera y su variabilidad en el tiempo. La forma en que un sistema de radio es instalado en un entorno en particular, induce importantes interacciones entre éstos. En el modelo, los parámetros de instalación intentan caracterizar estas interacciones de tal manera de que puedan ser aplicadas a cada uno de los terminales en un radio enlace.
9. **Criterio de posicionamiento:** Describe cualitativamente el cuidado que debe tenerse en cuenta en la instalación de cada terminal. Este parámetro puede definirse como una de las siguientes etiquetas: Random, careful o very careful. Finalmente, los parámetros estadísticos son aquellos que describen las condiciones estadísticas del escenario planteado. Dichos parámetros se definen como la variabilidad de tiempo, variabilidad de la locación y variabilidad de la situación.

Metodología de estudio

Una vez definidos los valores para los parámetros de entrada, el modelo de terreno irregular realiza

estimaciones geométricas sobre el camino de propagación. En el modo de predicción de área, por ejemplo, se estima el horizonte radial del área de cobertura. A continuación, el modelo determina una atenuación de referencia la cual es un valor medio de atenuación, relativo al espacio libre. La atenuación de referencia es tratada por el modelo como una función continua de la distancia. Se identifican tres regiones denominadas línea vista, difracción y dispersión. La región de línea vista es aquella en donde la curvatura de la tierra no interrumpe la línea directa de propagación de ondas, pero si pueden existir obstrucciones tales como colinas, bosques, etc. La atenuación de referencia se determina como una función logarítmica lineal de la distancia. En muchos casos, es necesario obtener una media de la atenuación referida a las condiciones climáticas de un lugar durante el transcurso de un año. Para ello, el modelo determina un promedio estadístico de atenuación de referencia para cada uno de los climas especificados. Para estos cálculos el modelo utiliza tratamientos teóricos de reflexión sobre terreno accidentado, refracción a través de una atmósfera estándar, difracción alrededor de la tierra y sobre obstáculos agudos, y dispersión troposférica. Esta combinación de teoría elemental y datos experimentales, por una parte, dan origen a un modelo semi-empírico acorde a la realidad física y a ciertos valores de referencia de los parámetros y por otro cumple con las leyes físicas lo suficientemente bien como para extrapolar éstos a partir de los valores de referencia con un buen grado de fiabilidad.

RESULTADOS DE UN ESTUDIO DE CASO

A continuación, se presenta una simulación de dos redes de cobertura inalámbrica: 4G y WiMax utilizando el programa Radio Mobile. Se evalúan escenarios geográficos de Riga (Letonia), Bucarest (Rumania), Florianópolis (Brasil), Copiapó, Santiago y Concepción (Chile) con datos reales y considerando los efectos atmosféricos de cada ciudad. Se realiza la simulación de los dos estándares y con dos máquinas de cálculo computacional idénticas de manera paralela.

Como ejemplo, se ilustra la metodología con las ciudades de Copiapó y Riga.

Para cada caso se establecen las propiedades de la red. Para Copiapó, los parámetros se establecen en un rango en la frecuencia entre 830 MHz y 2170 MHz, de acuerdo a la normativa vigente en Chile [15].

Para el caso de Riga, los parámetros corresponden a una frecuencia de 2100 MHz o 4G, de acuerdo a la normativa europea.

El sistema para ambas ciudades se establecerá con los mismos datos, ya que es el mismo tipo de sistema para la red 4G, con una potencia de transmisión de 33 dBm, una sensibilidad de recepción de -60 dBm, una ganancia Antena de 10 dBi (Antenna Air), una ganancia de antena de recepción entre 2 de 5 dBi, y con una altura de antena base de 25 metros y 1,7 metros en la antena de recepción.

La conectividad de la antena en ambas ciudades se realizó con los parámetros radioeléctricos técnicos y dados por los estándares internacionales para obtener verosimilitud en el cálculo computacional de la simulación y su nivel de señal es de color rojo y significa recepción de transmisión óptima.

Con ambas ciudades se les adicionó sus coordenadas geográficas para poder ubicarlas centradas en el centro de la pantalla, a la ciudad de Copiapó se le aplicó una altura de visualización de 12 metros, por ser una ciudad más pequeña y a la ciudad de Riga una altura de visualización de 30 metros por su magnitud en cuando al espacio geográfico que abarca.

El número de usuarios, en 4G y en WiMax, son soportados por minuto de conexión.

La Figura 1, muestra los resultados de la simulación para la ciudad de Copiapó (Chile), tanto en la configuración de antenas (a la izquierda) como en la cobertura de propagación 4G (a la derecha).

De manera similar la Figura 2, entrega los resultados para la ciudad de Riga (Letonia), en su configuración

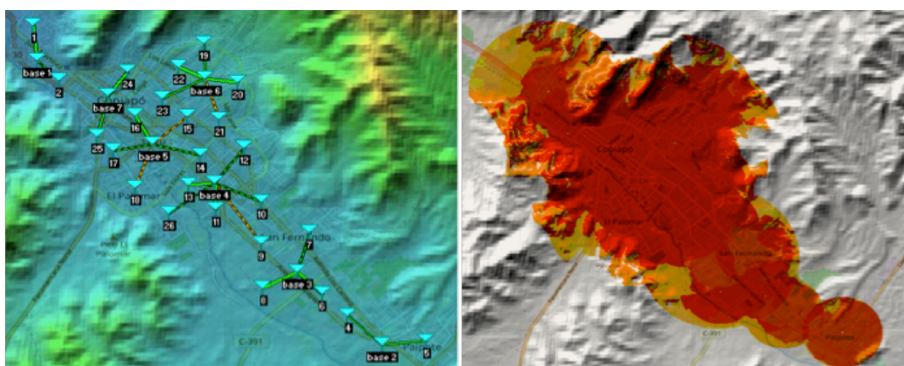


Figura 1. Configuración de Antenas y Cobertura de propagación 4G ciudad Copiapó.

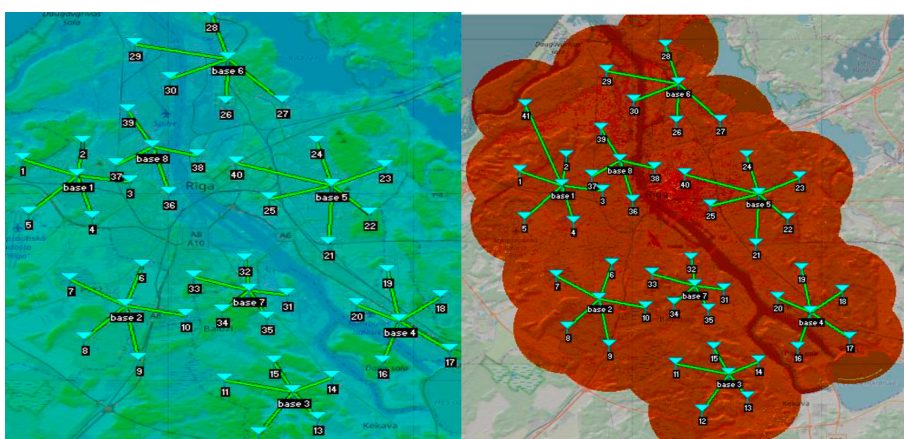


Figura 2. Configuración de Antenas y Cobertura de propagación 4G ciudad Riga.

de antenas (a la izquierda) y cobertura de propagación 4G (a la derecha).

Para la simulación con WiMax los parámetros y el sistema de red inalámbrica en las ciudades de Copiapó y Riga, se establecieron rangos en la frecuencia de operación entre 2500 MHz y 5000 MHz, esto por estandarización IEEE [5] de la red WiMax. Se consideró una potencia de transmisión de 33 dBm, una sensibilidad en recepción de -90 dBm (por estándar), una ganancia de antenas base de 14 dBi, una altura de operación de 25 metros, y una antena en recepción de 5 dBi con una altura de 1,7 metros.

La Figura 3, muestra los resultados de la simulación con WiMax para la ciudad de Copiapó (Chile), tanto en la configuración de antenas (a la izquierda) como en la cobertura de propagación terrestre (a la derecha).

Así también, la Figura 4, entrega los resultados para la ciudad de Riga (Letonia), en la configuración de antenas (a la izquierda) y la cobertura de propagación terrestre (a la derecha).

La Tabla 3, permite observar de manera resumida, los resultados más importantes obtenidos para cada una de las ciudades del estudio. Se destacan sus dimensiones geográficas (km²), la cantidad de habitantes y su clima. Así también, se muestra el número de antenas, el número de usuarios y la cobertura tanto para 4G como WiMax.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La densidad de población (hab/km²) se utiliza para determinar el número de antenas requeridas, ya que si bien se puede cubrir una cierta superficie con una antena-celda, solo se podrá atender a un número

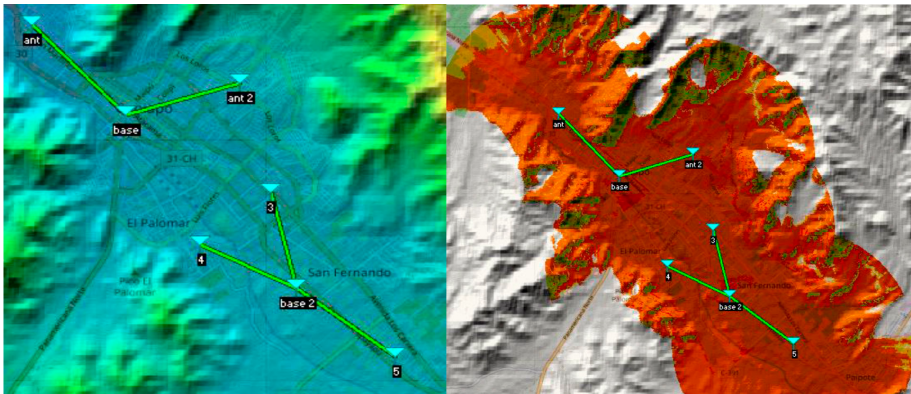


Figura 3. Configuración de Antenas y Cobertura de propagación terrestre en Copiapó.

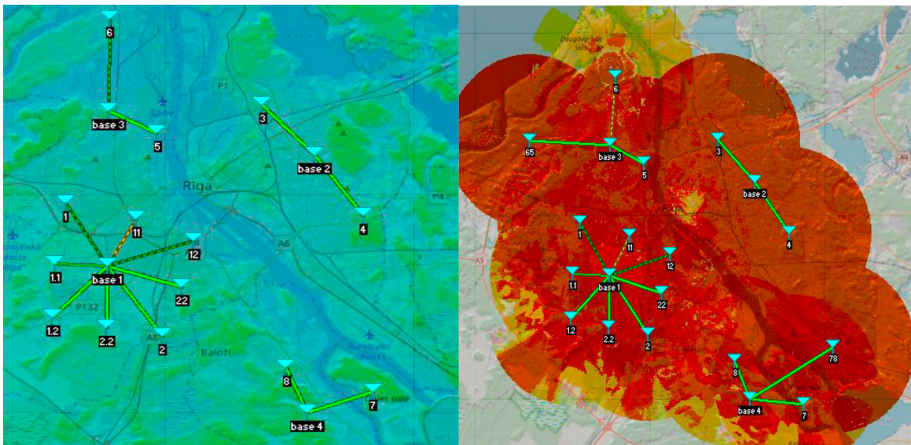


Figura 4. Configuración de Antenas y Cobertura de propagación terrestre en Riga.

Tabla 3. Comparación de las ciudades de estudio y sus respectivas coberturas.

Ciudad	Área (mileskm ²)	Habitantes (miles)	Clima	N° de Antenas		N° de Usuarios		Cobertura de propagación	
				4G	WiMax	4G/min	WiMax/min	4G (%)	WiMax (%)
Riga	307	679	Húmeda Continental	48	18	7.200	10.800	88-90	90-92
Bucarest	326	1.883	Húmeda Continental	30	12	4.500	7.200	94-96	96-98
Florianópolis	443	477	Temperatura Marítima	38	30	5.700	18.000	78-81	80-81
Santiago	837	6.257	Mediterránea Continental	74	40	11.100	24.000	92-94	82-90
Concepción	221	217	Oceánica Marítima	26	13	3.900	7.800	76-78	84-86
Copiapó	175	151	Desértica	26	7	3.900	4.200	50-60	70-80

limitado de usuarios. Por otra parte, si la densidad de población aumenta, implica que el número de antenas también se incrementa en esa superficie, configurando celdas más pequeñas atendiendo así a una mayor cantidad de usuarios.

El clima es un factor influyente en la propagación en radiocomunicación digital, ya que una mayor cantidad de lluvia o nieve genera mayores problemas de atenuación y dispersión de la potencia de la señal, como lo son los climas húmedos continentales de Riga (Letonia) y Bucarest (Rumania), mediterráneo de Santiago (Chile) y el oceánico marítimo de Concepción (Chile). El clima templado de Florianópolis (Brasil) presenta menor atenuación, ya que los hidrometeoros son más ligeros y menos intensos. Por último, tenemos el de clima desértico de Copiapó (Chile) que no presentan ningún tipo de atenuación de la señal radioeléctrica.

Otro factor relevante para determinar el número de antenas que son requeridas para obtener sobre un 80% de la cobertura de propagación inalámbrica en IoT y comunicación máquina a máquina, es el relieve geográfico del terreno. Ante esto, la simulación computacional STRM bajo los mapas de la NASA evidencia que la cantidad de antenas 4G es mucho mayor por km² que las del estándar WiMax. Lo anterior se explica debido a que, si bien la potencia radioeléctrica de transmisión 4G y WiMax son similares (24 dBm y 23 dBm respectivamente), la sensibilidad de los receptores de 4G es inferior que la de WiMax (−60 dBm y −90 dBm respectivamente). Esto permite que la relación potencia de señal sobre el piso de ruido de −110 dBm logre una mayor cobertura para la tecnología WiMax.

Con respecto al número de usuarios, la ventaja de WiMax es notablemente superior, ya que 4G soportan 150 usuarios máximo por minuto por celda-antena, mientras WiMax permite hasta 600 usuarios por minuto por celda-antena. Considerando la calidad de servicio de probabilidad de error en el bit ($BER = 10^{-5}$) y la capacidad de flujo binario constante (throughput) por los canales radio, deberá ser garantizado independientemente del tráfico y de la conducta del usuario.

El estándar 4G ofrece 20 Mbps por celda antena transmisora, en cambio WiMax entrega 75 Mbps lo cual es una ventaja superior en la conexión de usuarios simultáneos, sobre todo para la inclusión de comunicación de máquinas y comunicación de hogares inteligentes.

En la Tabla 3 se puede apreciar que el número de antenas requeridas para la tecnología 4G es siempre superior al que se necesita al momento de evaluar la tecnología de WiMax. Para la ciudad de Copiapó (Chile) se alcanza la mayor proporción entre ellas y que corresponde a 3,7 veces más en 4G respecto a WiMax. Por su parte, la menor proporción se tiene para la ciudad de Florianópolis (Brasil) con 1,3 veces. El valor promedio para las 6 ciudades es de 2,3 veces mayor para 4G que WiMax. Este resultado tiene directa relación con las inversiones necesarias que se deben realizar para lograr la cobertura en cada ciudad estudiada.

Lo expresado anteriormente, se valida con los resultados obtenidos en el número de usuarios que pueden ser simultáneamente servidos por minuto por cada antena. Así se tiene, por ejemplo, que para la ciudad de Riga (Letonia) una antena para la

tecnología WiMax puede cubrir a 10.800 usuarios por minuto, en cambio con 4G su alcance llega a sólo 7.200 usuarios por minuto, lo que implica un 1,5 veces más en WiMax que en 4G.

Los resultados de las simulaciones también destacan la cobertura de propagación para cada ciudad, obteniéndose los mejores resultados para la ciudad de Bucarest (Rumania) con rangos entre 94-96% para la tecnología 4G y entre 96-98% para WiMax. Por otra parte, la ciudad con los menores porcentajes de cobertura de propagación se alcanzan en: Copiapó (Chile) con 50-60% para 4G y de 70-80% para WiMax. Por el contrario, cabe notar que para la ciudad de Santiago los resultados son mejores para la tecnología 4G con un 92-94% que aquellos alcanzados para WiMax con valores entre 82-90%.

CONCLUSIONES

En esta investigación se ha logrado evaluar dos estándares de comunicación para alcanzar una solución WAN en redes de sensores inalámbricos para los futuros servicios de IoT y comunicación M2M, determinando condiciones de cobertura en km², número de usuarios e infraestructura de antenas para el despliegue de una red inteligente.

Se pudo constatar que para las 6 ciudades estudiadas se obtienen mejores resultados en el número de antenas y número de usuarios conectados simultáneamente para la tecnología de WiMax por sobre 4G. Por otro lado, para el indicador de cobertura de propagación los resultados para 5 ciudades son mejor la tecnología WiMax que 4G, salvo Santiago (Chile) donde se alcanza el mejor rendimiento para 4G sobre WiMax.

Este trabajo contribuye a evaluar la figura de mérito respecto a la calidad de servicio desde un punto de vista técnico y no desde el punto de vista comercial.

Por no contar con capacidades de cálculo computacional para evaluar mapas digitales de gran escala y velocidades de tráfico, no fue posible simular el tráfico mixto de cantidades mayores y reales de máquinas y usuarios humanos simultáneos.

Como trabajo próximo, se pretende extender el estudio de evaluación para todo el territorio nacional (Chile), puesto que es determinante para establecer

la brecha digital y con ella conocer la línea base para fijar las nuevas políticas públicas.

REFERENCIAS

- [1] J. Hausner and R. Denk. "Implementation of signal processing algorithms for 3G and beyond". IEEE Microwave and Wireless Components Letters. Vol. 13 Issue 8, pp. 302-304. 2003. DOI: 10.1109/LMWC.2003.815707.
- [2] X. Dai, Z. Wang, C. Liang, X. Chen and L. Wang. "Multiband and Dual-Polarized omnidirectional antenna for 2G/3G/LTE application". IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 12, pp. 1492-1495. 2013. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2289743.
- [3] W.T. Li, Y.Q. Hei, W. Feng and X.W. Shi. "Planar Antenna for 3G/Bluetooth/WiMAX and UWB applications with Dual Band-Notched characteristics". IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 11, pp. 61-64. 2012. DOI: 10.1109/LAWP.2012.2183671.
- [4] M. Steer. "Beyond 3G". IEEE Microwave Magazine. Vol. 8 N° 1, pp. 76-82. 2007. DOI: 10.1109/MMW.2007.316254.
- [5] S. Hu, Y.L. Guan, C.L. Law, Y. Yan, S. Li and S. Li. "Development and performance evaluation of mobile WiMAX testbed". 2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium, pp. 104-107. 2007. DOI: 10.1109/WIMAX.2007.348688.
- [6] G. Yücel, B. Ülgerli and A. Özen. "An analysis of the CFO tracking performances in single and multi carrier WiMax radio". 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU). 2016.
- [7] M.S. Soliman, M.O. Al-Dwairi, A.Y. Hendi and Z. Alqadi. "A compact Ultra-Wideband patch antenna with dual Band-Notch performance for WiMAX / WLAN services". 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT), pp. 831-834. 2019. DOI: 10.1109/JEEIT.2019.8717444.
- [8] B. Kamali. "The IEEE 802.16 Standards and the WiMAX Technology". John Wiley & Sons, pp. 189-258. DOI: 10.1002/9781119281139.ch5. ISSN: 9781119281139.2018.
- [9] J.M. Sultan and G. Markarian. "Network optimization for integration of WiFi and

- WiMAX". 2015 Fourth International Conference on Future Generation Communication Technology (FGCT), pp. 1-6. 2015. DOI: 10.1109/FGCT.2015.7300247.
- [10] C. Pereira and A. Aguiar. "Towards efficient mobile M2M communications: survey and open challenges". *Sensors*. Vol. 14 Nº 10, pp. 19582-608. 2014. DOI:10.3390/s141019582.
- [11] W.H. Chin, Z. Fan and R. Haines. "Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks". *IEEE Wireless Communications*. Vol. 21 Nº 2, pp. 106-112. 2014. DOI: 10.1109/MWC.2014.6812298.
- [12] G.A. Akpakwu, B.J. Silva, G.P. Hancke and A.M. Abu-Mahfouz. "A survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges". *IEEE Access*. Vol. 6, pp. 3619-3647. 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2779844.
- [13] M. Weiner. "Use of the Longley-Rice and Johnson-Gierhart tropospheric radio propagation programs:0.02-20 GHz". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 4 Nº 2, pp. 297-307. 1986. DOI: 10.1109/JSAC.1986.1146313.
- [14] G.A. Hufford, A.G. Longley and W.A. Kissick. "A guide to use of the ITM irregular terrain model in the area prediction mode". U.S. Dep. Commerce, Boulder, CO. NTIA Report 82-100. 1992.
- [15] ITU-T. "Recommendation ITU-T Y.2221". Telecommunication Standardization Sector of ITU. 2010.