

Algoritmo de Ray-Tracing Para Modelar el Canal Inalámbrico en Ambientes Indoor

Yesica Beltrán, Manuel R. Pérez, *IEEE Member*.

Resumen Este artículo propone un algoritmo de simulación para modelamiento de un canal inalámbrico en ambientes interiores, basado en el método de trazado de rayos de dos dimensiones considerando efectos de dispersión de canal. El algoritmo implementado en Matlab, permite simular escenarios de plantas rectangulares de diferentes dimensiones y con diferentes tipos de muros dentro del modelo de la planta. El algoritmo propuesto fue validado con modelos analíticos y software comerciales. Para realizar el modelamiento de un canal inalámbrico es necesario conocer las características del entorno en el que ocurre la comunicación: dispersores, reflectores, características dieléctricas de materiales, frecuencia y distancia, entre otras; también se debe incluir variables como fenómenos de reflexión, refracción y difracción para aumentar la exactitud de la predicción. Actualmente hay un campo de estudio muy amplio en esta área pues comercialmente las soluciones software que permitan predecir el comportamiento de las ondas de radio en ambientes interiores es limitado además de costoso. Este hecho restringe la estimación previa de cobertura de enrutadores y gateways en redes inalámbricas para interiores con el fin de poder realizar implementaciones óptimas desde el punto de vista funcional y operativo. Así, el trabajo presentado propone un algoritmo de estimación de potencia recibida en un canal inalámbrico para interiores buscando realizar dicha estimación. El algoritmo propuesto tiene en cuenta diferentes características del entorno, considerando los fenómenos de multitrayectoria ocasionados por los múltiples efectos de dispersión típicos de ambientes interiores. La técnica utilizada de trazado de rayos es una técnica que permite simular efectos de reflexión, refracción y difracción, trazando rayos recursivamente desde un punto transmisor hasta el receptor con una separación angular constante.

Palabras Clave — Trazado de rayos, Comunicación inalámbrica, Modelos de canal, Pérdidas de camino.

I. INTRODUCCION

El uso del canal inalámbrico ha presentado un crecimiento exponencial, asimismo las aplicaciones para el uso de estos canales requieren de velocidades altas para un óptimo funcionamiento. Para implementar dichas aplicaciones es necesario conocer el ambiente por el cual será transmitida la información, lo que se conoce como modelar el canal [1]. Actualmente, las WLAN es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica más utilizada, en esta se pueden encontrar diferentes protocolos de comunicación usados en la industria tales como 802.11b y el 802.11g con velocidades de hasta 11 Mb/seg y 54 MB/seg, respectivamente [2]. Otra tecnología que ha generado gran interés a nivel de investigativo y comercial son las Wireless Sensor Network (WSN). Las WSN son redes inalámbricas que consisten en dispositivos distribuidos espaciados autónomos utilizando sensores para monitorear condiciones físicas o ambientales. Los protocolos inalámbricos que utilizan dependen de los requerimientos de las aplicaciones [3]. Algunas de las redes de sensores más utilizadas actualmente en la industria son: i) los sensores de

proximidad (NFC o RFID); ii) las WPAN dentro de las que se encuentra Bluetooth, Zigbee, Wireless Hart, ISA100; iii) las WLAN donde están los protocolos 802.11a/b/g/n, 802.11af, 802.11ah, 802.11p; iv) las WMAN donde esta Wi-SUN y Zigbee-NAN; WWAN donde se encuentran las redes celulares 2G, 3G, 4G, 5G y LPWAN donde se encuentra SIGFOX, LoRa, Telensa, PTC [4].

Sin duda alguna la importancia que toma hoy en día el uso de tecnologías inalámbricas en nuestro diario vivir, especialmente en ambientes interiores, es muy alta. De la misma manera el modelado del canal inalámbrico para simular el comportamiento de las ondas de radio de las que hacen uso estas tecnologías resulta de suma interés a nivel investigativo e industrial. Poder determinar potencias de recepción y zonas de cobertura en diferentes escenarios interiores a priori de la implementación misma de la red resulta bastante conveniente para encontrar la puesta a punto del sistema. Así el trabajo presentado toma contexto desde el punto de vista que existen pocos y costosos algoritmos comerciales con la misma funcionalidad. La implementación del mismo abre una posibilidad de desarrollo e investigación en el área de algoritmos computacionales de trazado de rayos

para estimación de características de canal inalámbrico in situ.

En un proyecto realizado en la Universidad Politécnica de Cartagena, en España, se realizó la programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en óptica geométrica y teoría uniforme de difracción [5], el objetivo de este proyecto fue desarrollar una herramienta con una interfaz fácil de usar que permita la realización de un trazado de rayos desde un transmisor a un receptor en un entorno descrito mediante una variable de entrada, la descripción del comportamiento de diferentes mecanismos de propagación como son la reflexión, la difracción y la transmisión, modelado de las superficies del entorno mediante características eléctricas.

También en España, en la Universidad Politécnica de Valencia, se realizó un proyecto de Predicción de parámetros básicos de propagación en entornos microcelulares mediante técnicas de trazado de rayos [6].

En 2005 se desarrolló un caso de estudio en la ciudad de Ottawa (Canadá) bajo un área de 1000x600 metros, usando un modelo bidimensional, el algoritmo de fuerza bruta y la teoría uniforme de difracción. En este trabajo se considera hasta la cuarta reflexión y dos difracciones, evitando cálculos por difracción en techos de edificaciones. Se asume que los pisos son completamente planos. El parámetro pertinente a permitividad en paredes es de seis, en conductividad de 0.5S/m. Para el plano tierra los parámetros fueron de quince para la permitividad y una conductividad de 0.005 S/m [7].

Este artículo está organizado de la siguiente manera, en la sección II se presentan los principales conceptos y una revisión del estado del arte del método de trazado de rayos, identificando las principales técnicas y principios básicos. En la sección III se presenta la descripción funcional del algoritmo propuesto. En la sección IV se muestran los escenarios de prueba que se tuvieron en cuenta para la evaluación y validación del algoritmo. Finalmente en la Sección V y VI se presentan el análisis de resultados de la evaluación y la validación del algoritmo propuesta y las principales conclusiones del trabajo realizado.

II. TRAZADO DE RAYOS

La técnica de trazado de rayos calcula los diferentes caminos desde el transmisor al receptor, mediante el uso de óptica geométrica. En los modelos de trazado de rayos, la predicción se basa en cálculos de transmisión y recepción de rayos en un espacio abierto, teniendo en cuenta principalmente el fenómeno de reflexión. Existen también modelos de trazado más completos que tienen en cuenta otro tipo de fenómenos como lo son, la difracción, dispersión difusa y penetración a través de materiales [8].

El nivel de la señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor, en estos modelos se pueden predecir las pérdidas de propagación y la dispersión de la señal respecto al tiempo [9].

Actualmente los modelos de trazado de rayos son considerados como unos de los más precisos para predecir pérdidas y potencia de la señal. Se debe tener en cuenta que para lograr una alta precisión del modelo se debe realizar una representación suficientemente detallada del área, sin embargo, esto es directamente proporcional con el tiempo de computación, el tiempo de computación de un área muy detallada es mayor que el de un área con menor detalle [9].

Uno de los modelos de trazado de rayos es el modelo en dos dimensiones. Los rayos son lanzados en diferentes direcciones con el mismo ángulo del sector. La elección del ángulo depende de la exactitud requerida y del tiempo de cálculo. Si el ángulo es pequeño, proporcionará una gran exactitud, pero llevará más tiempo de cálculo [9].

III. ALGORITMO PROPUESTO

Se diseñó un algoritmo para modelar un canal inalámbrico y simular el canal de acuerdo con parámetros tales como: locación, medio de transmisión y localización de obstáculos; de esta manera se establece información tal como zonas de cobertura, intensidad de la señal e interferencias, también se realiza una predicción de pérdidas de camino.

Los datos de entrada del algoritmo son: escenario deseado, tamaño del escenario, ángulo de disparo, cantidad de rayos a lanzar, polarización de la antena, ubicación del transmisor, ubicación del receptor, potencia de transmisión, frecuencia de la señal, medio al cual se va transmitir. Los datos de salida del algoritmo son: intensidad de campo, pérdidas de camino, potencia en el receptor y fase de la señal.

Se realiza el lanzamiento de rayos desde la ubicación de la fuente de transmisión, cuando ocurre una intersección con la superficie de algún objeto, el rayo incidente puede reflejarse, refractarse o difractarse según las condiciones de choque, este proceso se repite recursivamente hasta que el rayo realice tres fenómenos entre reflexiones, refracciones o difracciones; o cuando se reciba el rayo en el receptor.

El algoritmo consta de una función que se ejecuta la cantidad de veces ingresada en la entrada de cantidad de rayos a lanzar. No se tienen en cuenta rayos con ángulos múltiplos de 90°, en caso de que el algoritmo encuentre un rayo con un valor múltiplo de 90, toma el siguiente ángulo a lanzar, si es el último rayo pendiente por lanzar se finaliza el algoritmo.

Se calculan las coordenadas de los rayos de acuerdo con el

ángulo que ingresa el usuario y se encuentran las intersecciones de acuerdo a la dirección que lleva el rayo, se elige la intersección que cumpla con las condiciones requeridas, de acuerdo al ángulo ingresado.

Luego de encontrar la primera intersección del rayo lanzado, se evalúa si fue recibido en el receptor y se calcula el campo eléctrico y la fase de la señal en este punto, de acuerdo con (1):

$$E = \frac{e^{-\frac{j2\pi fd}{c}}}{d} \quad (1)$$

Donde f es la frecuencia de operación y d es la distancia recorrida por el rayo. La fase de la señal corresponde al término exponencial de la ecuación (1).

Para los rayos que presentan el fenómeno de difracción Si la posición de la primera intersección se realiza con una esquina se trazan cuatro rayos que representan la difracción y se calcula para cada uno las intersecciones posibles con todas las paredes. Si alguno de los rayos es recibido se calcula la potencia recibida de acuerdo con el siguiente modelo [10]:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + 10 \log(G_s) + 10 \log(\sigma) - 30 \log(4\pi) - 20 \log(s) - 20 \log(s') \quad (2)$$

Donde G_s es la ganancia de las antenas, s es la distancia recorrida por el rayo antes del punto de difracción y s' es la distancia recorrida por el rayo después del punto de difracción. El coeficiente σ es la ganancia por propagación documentada en [11] por medio de valores experimentales.

Si la posición de la primera intersección se realiza con la pared que divide el medio, se valida si el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico calculado previamente se produce una refracción, si es mayor se produce una reflexión. Se vuelven a calcular las intersecciones con las paredes. Según el fenómeno ocurrido de refracción o reflexión se calcula la siguiente posición. Si el rayo es recibido se calcula el campo eléctrico total. A continuación, se presenta el modelo utilizado para esta parte del algoritmo:

Para los rayos refractados se calcula el ángulo crítico cuando la señal pasa de un medio a otro, según la ecuación (3).

$$\theta_c = \text{asin}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios. Si el ángulo incidente es menor al ángulo crítico, el rayo es refractado y continúa su trayectoria con un ángulo calculado mediante la ecuación (4).

$$\theta_2 = \text{asin}\left(\frac{n_1 \sin(\theta_1)}{n_2}\right) \quad (4)$$

Se calcula el coeficiente de reflexión R según la ecuación (5).

$$R = \frac{\text{sen}(\theta) - Z}{\text{sen}(\theta) + Z} \quad (5)$$

Donde Z es

$Z = \sqrt{\epsilon_r - \cos(\theta)}/\epsilon_r$ para antenas polarizadas verticalmente.

$Z = \sqrt{\epsilon_r - \cos(\theta)}$ para antenas polarizadas horizontalmente

Además ϵ_r es la permitividad relativa del material y θ es el ángulo incidente del rayo. El campo calculado en un rayo reflejado está dado por la ecuación 6.

$$E = R \frac{e^{-\frac{j2\pi fd}{c}}}{d} \quad (6)$$

Donde R es el coeficiente de reflexión, f la frecuencia de operación y d la distancia recorrida por el rayo. Si un rayo se refleja más de una ocasión, el coeficiente de reflexión resultante es el producto de los coeficientes individuales [10].

Después de finalizar esta parte primera etapa se realiza el siguiente fenómeno del rayo cuando no ha sido recibido. Se realiza una condición para conocer si los siguientes rayos son procedentes de rayos difractados, reflejados o refractados. Se presentan las siguientes posibilidades:

Si el rayo es procedente de una reflexión o una refracción se realiza la comparación de la pared con la que realizó la intersección anterior para conocer si sufrirá una reflexión o una refracción. Se realizan además las comparaciones correspondientes para conocer el ángulo incidente del rayo y conocer si continua con el mismo ángulo o cambiará. Se calculan las nuevas intersecciones del rayo resultante para conocer la siguiente posición donde encontrará un obstáculo. Si la intersección la realizó con la pared que divide el medio se realiza una condición para conocer cuál es el rayo procedente y el ángulo de incidencia y verificar si se hará una refracción o una reflexión. Si el rayo es recibido se calcula el campo eléctrico total como fue mostrado anteriormente, si no es recibido se continua la trayectoria.

Adicionalmente se realiza el último fenómeno sufrido por el rayo, el cual puede ser una reflexión o una refracción. Este procedimiento se realiza de la misma forma que el anterior que también puede ser reflexión o refracción, las difracciones sólo se realizan como primer fenómeno del rayo. Si al final de la función el rayo no fue recibido en

ninguna de sus trayectorias, se asigna un valor de cero a las salidas: campo eléctrico, fase y distancia.

Cuando finaliza el ciclo de trazado de rayos se realiza la sumatoria de los campos calculados para cada rayo con este dato se realiza el cálculo de las pérdidas y la potencia en el receptor, como se muestra a continuación:

La potencia recibida en el receptor se calcula según el siguiente método [10]:

$$P_{RX} = P_{TX} + 20 \log \left(\frac{\lambda |E_{Total}|}{4\pi |E_0|} \right) \quad (7)$$

Adicionalmente, se realizó una función para realizar mapas de cobertura, en ésta se agrega un ciclo donde se ubican receptores cada cierta distancia y se repite toda la función de lanzamiento de rayos para cada receptor. Todos los valores de potencia recibida para cada receptor se almacenan en una matriz y al finalizar, se realiza el mapa de cobertura con la función *imagesc* de Matlab.

IV. ESCENARIOS DE PRUEBA

Se realizaron validaciones del algoritmo de forma analítica con la formulación general encontrada en el libro *Wireless Communications* [10] y con una herramienta comercial de simulación electromagnética basada en técnicas de computación avanzadas, que tienen soluciones implementadas con Trazado de Rayos.

El algoritmo se evalúa estableciendo unos puntos específicos de observación para determinar las pérdidas de camino, de acuerdo con los rayos que llegan al receptor y su intensidad. Se realiza la evaluación de un modelo de rayo directo, modelo de dos rayos, modelo de tres rayos considerado como un rayo directo y dos rayos que se reflejan una o dos veces, modelo de diez rayos considerado como un rayo directo, dos rayos reflejados una vez y dos rayos reflejados dos veces.

Las pruebas se realizan en el escenario 1, con diferentes tamaños, que van desde 80 a 200 unidades, equivalentes a metros. Variando la ubicación del transmisor y receptor desde una unidad hasta veinte unidades equivalentes también a metros de distancia, con una frecuencia de 900 MHz, con una potencia de transmisión de 25 dBm, se obtienen resultados para la antena polarizada vertical y horizontalmente.

Se puede observar en las siguientes figuras ejemplos de escenarios de prueba.

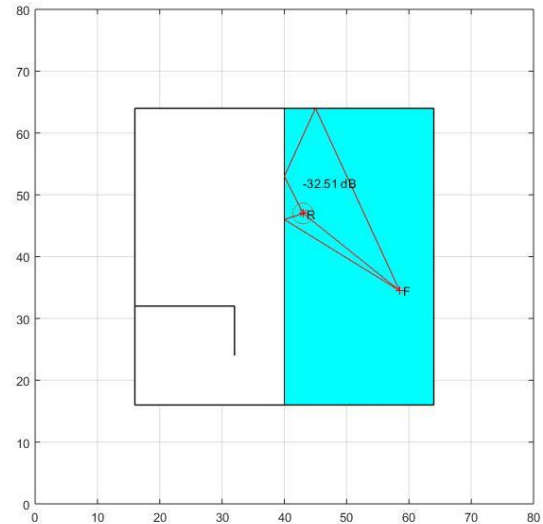


Figura 1. Escenario de prueba modelo de tres rayos

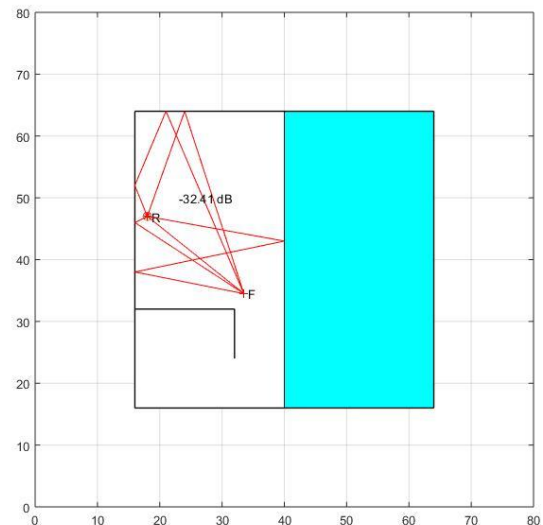


Figura 2. Escenario de prueba modelo de diez rayos

V. RESULTADOS

A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos. En las figuras observamos el comportamiento de la señal en los tres casos (analítica, algoritmo y software) con la variación de la distancia.

Para el modelo de un rayo el error absoluto promedio obtenido del algoritmo respecto al método analítico fue de 0.0005 y el error relativo promedio fue de 0.0015%, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo respecto al software fue de 0.3335 y el error relativo promedio fue de 1.93%.

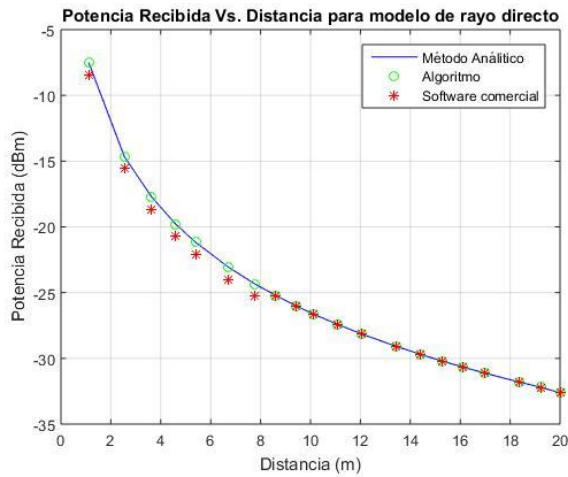


Figura 3. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de rayo directo

Para el modelo de dos rayos, con antena en polarización horizontal el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.08 y el error relativo promedio fue de 0.37%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.60 y el error relativo promedio fue de 7.21%.

Para el caso de la antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.06 y el error relativo promedio fue de 0.3%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.23 y el error relativo promedio fue de 5.4%.

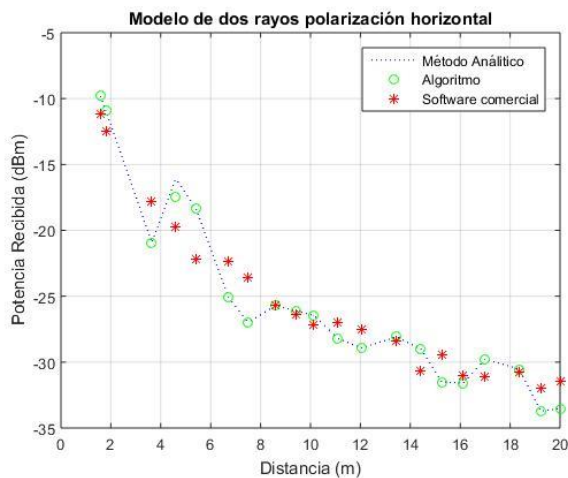


Figura 4. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de dos rayos con antena horizontal

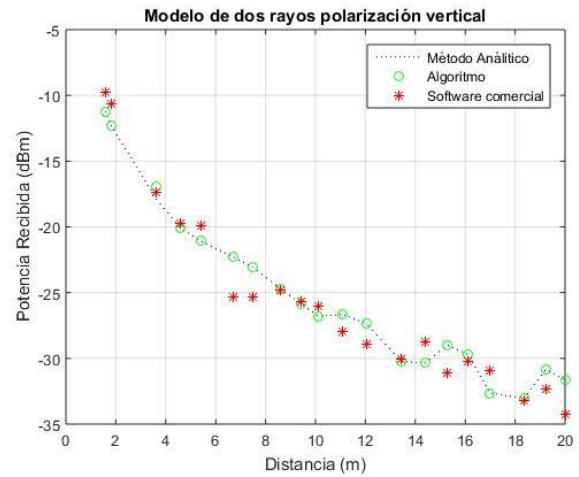


Figura 5. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de dos rayos con antena vertical

En el modelo de tres rayos, para la antena en polarización horizontal, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.0045 y el error relativo promedio fue de 0.019%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 0.79 y el error relativo promedio fue de 2.78%.

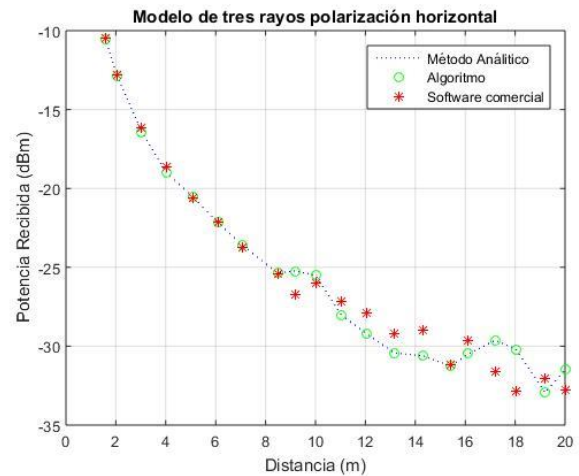


Figura 6. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de tres rayos con antena horizontal

Para la antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.003 y el error relativo promedio fue de 0.0096%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 0.74 y el error relativo promedio fue de 2.62%.

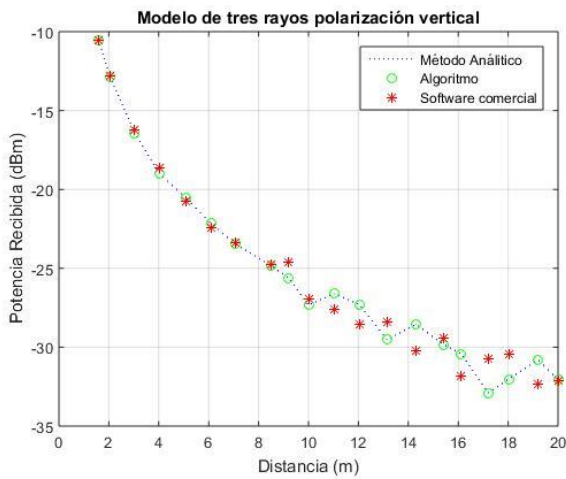


Figura 7. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de tres rayos con antena vertical

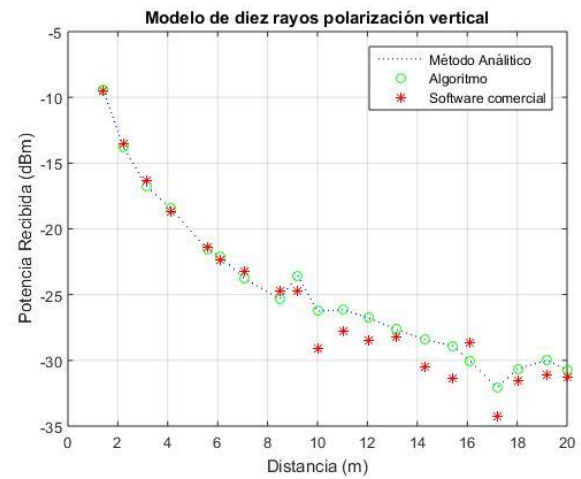


Figura 9. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de diez rayos con antena vertical

En el modelo de diez rayos para una antena en polarización horizontal, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.0055 y el error relativo promedio fue de 0.0019%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.01 y el error relativo promedio fue de 3.78%.

Se realizó un mapa de cobertura realizado, con las siguientes características: escenario sin obstáculos, tamaño del escenario 50 unidades equivalentes a metros, antena en polarización vertical, se lanzaron 360 rayos con un espaciamiento de 1° . Se ubicaron receptores desde las coordenadas 13,13 hasta 39,39 con un distanciamiento de 0.3 metros. La frecuencia de operación fue de 5GHz. El resultado obtenido se muestra en las figuras 10, 11 y 12.

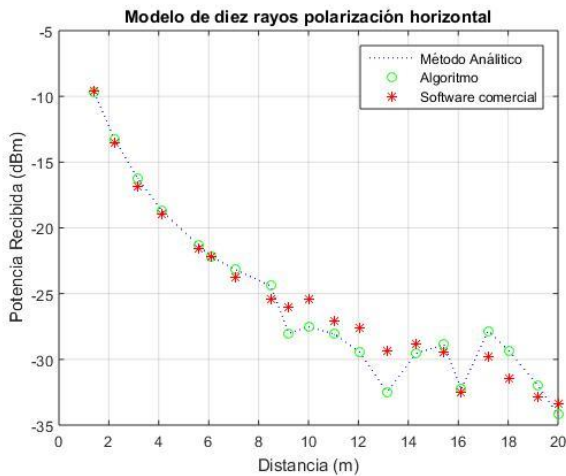


Figura 8. Potencia recibida en el receptor respecto a la distancia en modelo de diez rayos con antena horizontal

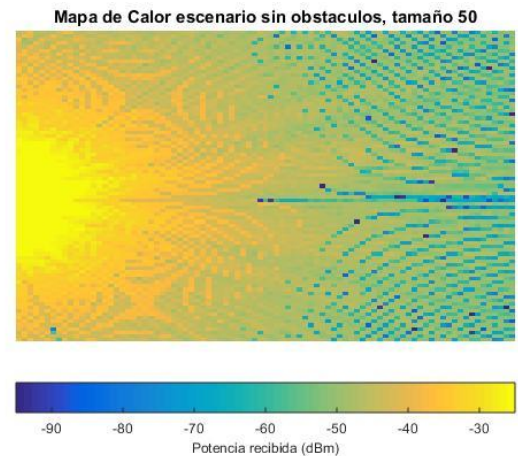


Figura 10. Mapa de Calor obtenida con el algoritmo

Para una antena en polarización vertical, el error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al método analítico fue de 0.004 y el error relativo promedio 0.0013%. El error absoluto promedio obtenido del algoritmo con respecto al software fue de 1.07 y el error relativo promedio 3.85%.

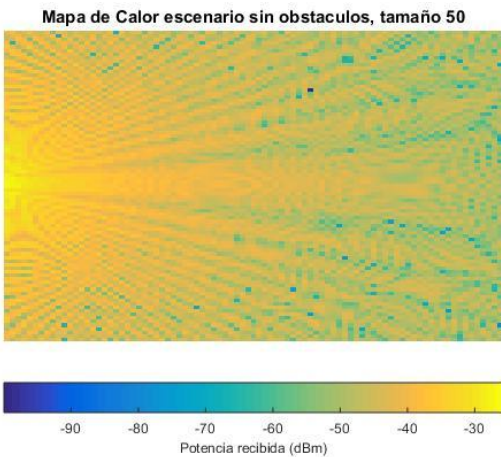


Figura 11. Mapa de calor obtenido con el software comercial

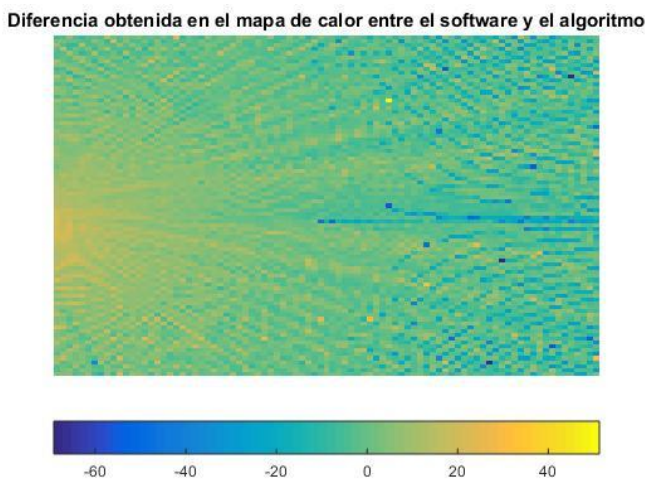


Figura 12. "Diferencia obtenida entre los mapas de calor graficados"

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se desarrolló una herramienta de trazado de rayos para modelar un canal inalámbrico, obtener una estimación del valor del campo eléctrico que se recibe en un punto determinado de un escenario, realizar predicción de cobertura, cálculo de potencias recibidas y fase de la señal mediante el método de lanzamiento de rayos.

Los resultados mostrados en las figuras corresponden a diferentes modelos específicos de comparación para verificar el funcionamiento del algoritmo, se observa que los resultados de los rayos trazados para modelos de 1, 2, 3 y 10 rayos tienen apariencia muy similar a los resultados mostrados por el software. Adicionalmente las validaciones de potencia recibida muestran que los valores obtenidos con el algoritmo se ajustan a los resultados analíticos y del software comercial, generando diferencias inferiores a 3 dB en cada modelo realizado con variaciones de separación

entre el transmisor y el receptor desde 1 metro hasta 20 metros.

Se obtiene también una buena aproximación del mapa de cobertura, para realizar predicción de potencia en un escenario específico. Sin embargo, en algunos sectores del mapa de cobertura la diferencia es grande debido a que el software tiene un lanzamiento de rayos con mayor precisión que el algoritmo desarrollado, se tienen en cuenta rayos de todos los ángulos incluyendo 0 y múltiplos de 90°, los cuales en el algoritmo desarrollado no se tienen en cuenta. El valor promedio de la diferencia de dB entre ambos datos obtenidos es 6.02 dB.

Es una herramienta que presenta aportes en el ámbito académico para realizar validaciones de métodos teóricos, predicciones de cobertura de señal, obteniendo buenos resultados si el escenario es descrito correctamente y se lanzan un número considerable de rayos.

Como líneas de futuro trabajo se puede considerar incluir mayor cantidad de fenómenos en los rayos, proyectar los escenarios en 3 dimensiones, optimizar el código desarrollado a una manera más eficiente de resolver los casos presentados.

REFERENCIAS

- [1] A. Navarro, D. Guevara y J. Gómez, «Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática,» *Revista Sistemas & Telemática*, vol. 12, n° 30, pp. 87-101, 2014.
- [2] A. Yepes y G. Castang, «Aplicación Voip para dispositivos móviles sobre redes Wifi privadas,» *Revista Vinculos*, vol. 8, n° 1, pp. 44-50, 2011.
- [3] National Instruments, «National Instruments,» *National Instruments*, 22 abril 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>. [Último acceso: 10 abril 2017].
- [4] M. Zemedé, «Keysight Technologies,» Junio 2015. [En línea]. Disponible: http://www.keysight.com/upload/cmcc_upload/All/IoT_Seminar_Session1_Explosion_of_the_Internet_of_Things.pdf?&cc=CO&lc=eng. [Último acceso: abril 2017].
- [5] V. Campillo, «Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD,» *Universidad Politécnica de Cartagena*, Cartagena, 2008.

- [6] Universidad Politécnica de Valencia, «Predicción de parámetros básicos de propagación en entornos microcelulares mediante técnicas de trazado de rayos,» *Universidad Politécnica de Valencia*, Valencia, 1999.
- [7] A. Cavalcante y M. de Sousa, «Computational Parallelization Strategy Applied in Full 3D Ray-Tracing Wireless Channel Modeling,» de *Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on*, Brasilia, 2005.
- [8] Universidad de Sevilla, «Modelos de Propagación en interiores,» *Universidad de Sevilla*, Sevilla.
- [9] Universidad de Sevilla, «Técnica del Trazado de Rayos,» [En línea]. Disponible: <http://0-bibing.us.es.fama.us.es/proyectos/abreproy/11761/fic hero/Volumen3%252F13-Cap%C3%ADtulo7+-+Trazado+de+rayos.pdf+>.
- [10] A. Goldsmith, «Wireless Communications, » New York: *Cambridge University Press*, 2005.
- [11] S. Seidel, T. Rappaport y S. Jain, «Path loss, scattering and multipath delay statistics in four European cities for digital cellular and microcellular radiotelephone,» *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, nº 4, pp. 721-730, 1991.