

ANÁLISIS DE COBERTURA EN SISTEMAS DE VIDEO VIGILANCIA INALÁMBRICOS IEEE 802.11B/G/N

Fidel Martínez Armas¹, Taimir Alain Morales Roche², Miguel Eduardo Borrego Corona³, Grettel Rodríguez Trujillo⁴

^{1, 2, 3, 4}Universidad Tecnológica de la Habana "José A. Echeverría", CUJAE, Calle 114 # 1190, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

¹fidelma@tele.cujae.edu.cu, ²tamorales@tele.cujae.edu.cu, ³miguelebo@tele.cujae.edu.cu,

⁴grettelero@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el presente artículo, se plantea la obtención de un método de cálculo para la estimación de pérdidas en sistemas de comunicaciones inalámbricas que utilicen los estándares 802.11b/g/n, de manera específica en sistemas de seguridad en ambientes interiores. La instrumentación utilizada en la investigación (generador de señales y analizador de espectro) propició la posterior realización de medidas, para las cuales se diseñaron diferentes escenarios que imitaran el comportamiento aproximado del sistema real de video vigilancia. Partiendo de un análisis individual de las mediciones en cada uno de los ambientes de prueba, mediante la representación gráfica de las pérdidas obtenidas a partir de las medidas tomadas, se realizó una comparación con modelos de propagación empíricos certificados, basados en recomendaciones de la UIT y el modelo propuesto (obtenido con el método de ajuste de curvas), permitiendo conocer cuál de dichos modelos teóricos se ajusta mejor a la realidad de los escenarios diseñados. Los resultados alcanzados a partir del análisis, arrojaron que el ajuste de curvas es un posible método de predicción del comportamiento de cobertura en ambientes interiores. En el caso de esta investigación, basado en los modelos matemáticos que proporciona el software "Curve Expert Professional", el modelo resultante presenta un nivel de exactitud aceptable, en comparación con aquellos tomados por la recomendación UITR P.1238 en casi todos los escenarios.

PALABRAS CLAVES: Modelo de propagación, sistema de video vigilancia, estándar IEEE 802.11, ajuste de curvas, WLAN (Red Inalámbrica de Área Local).

COVERAGE ANALYSIS IN WIRELESS VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS IEEE 802.11B/G/N

ABSTRACT

In this article, it is proposed to obtain a calculation method for the estimation of losses in wireless communication systems that use the 802.11b/g/n standards, specifically in security systems in indoor environments. The instrumentation used in the investigation (signal generator and spectrum analyzer) led to subsequent measurements, for which different scenarios were designed to imitate the approximate behavior of the real video surveillance system. Starting from an individual analysis of the measurements in each of the test environments, through the graphic representation of the losses obtained from the measurements taken, a comparison was made with certified empirical propagation models, based on ITU recommendations and the proposed model (obtained with the curve fitting method), allowing to know which of these theoretical models best fits the reality of the designed scenarios. The results obtained from the analysis showed that curve fitting is a possible method for predicting coverage behavior in indoor environments. In the case of this research, based on the mathematical models provided by the Curve Expert Professional software, the resulting model presents an acceptable level of accuracy, compared to the models taken by the UITR P.1238 recommendation in almost all scenarios.

INDEX TERMS: Propagation model, video surveillance system, IEEE 802.11 standard, curve fitting, WLAN (Wireless Local Area Network).

1. INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de redes de comunicaciones inalámbricas es una actividad que requiere de rapidez y efectividad, donde la relevancia de las aplicaciones y servicios soportados es variada. Los sistemas en que estas son aplicadas se han complejizado, llegando a coincidir en ellos, diversos protocolos y estándares, que traen consigo valores específicos de velocidad, ancho de banda, frecuencias de transmisión y diversos parámetros, importantes para lograr la comunicación eficiente de sus elementos. El diseño y montaje de estos, bajo la frecuencia de 2.4GHz, que se rigen por los estándares IEEE 802.11b/g/n, de manera específica los sistemas de video vigilancia, se desarrollan la gran mayoría en locales interiores, oficinas, laboratorios, salones, entre otros, donde el ambiente de radio propagación afecta de manera directa las señales que se propagan. En consecuencia, la efectividad del sistema y seguridad de las personas o locales, se ve afectada por aspectos tan sencillos como la velocidad de datos, inhabilitación de sensores y otros errores.

Para la puesta en marcha de dichos sistemas se utilizan métodos ineficientes de prueba y error, lo que hace aún más engorroso y con largos plazos de cumplimiento este proceso. Esta problemática se provoca por la inexistencia de modelos matemáticos o físicos, que permitan predecir las variaciones en los parámetros fundamentales de las redes inalámbricas, debido a los fenómenos físicos existentes en este tipo de ambiente en particular, y se utilicen como punto de partida para la implementación de sistemas de comunicaciones inalámbricas en interiores, en particular sistemas de CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) que operen bajo los estándares IEEE 802.11b/g/n.

En las redes de comunicación inalámbrica, predecir las pérdidas de potencia de la señal con respecto a la distancia de propagación, en diferentes ambientes y bajo diversas condiciones, es muy útil para el diseño de equipos, cálculo de posición de repetidores o antenas, ubicación de nodos, entre otros. Las pérdidas de potencia normalmente se modelan matemáticamente por medio de una ecuación de propagación, donde se calculan las pérdidas en función de la distancia, la frecuencia, y otras variables que dependen de los obstáculos y los fenómenos asociados, como la difracción o la reflexión de señales. Los modelos de propagación pueden ser clasificados como determinísticos, empíricos, estocásticos y semi-deterministas.

Las investigaciones más recientes han abordado la temática tratada desde el punto de vista de modelos deterministas y semi-deterministas [1]–[4], optando por modelos ópticos de rayos y modelos similares al dominio de tiempo de diferencia finita. En la práctica su implementación requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales eran imposibles o inviables de obtener, además que demandan una gran capacidad de procesamiento de computo, solo disponible desde hace unos años e incluso su alta precisión solo se logra cuando las bases de datos de los escenarios simulados son en primer lugar precisas. Estas razones exponen a los modelos empíricos como una opción viable, por su nivel de rapidez en cuanto procesamiento de datos. Los que, mediante métodos de cálculo más sencillos como el ajuste de curvas o distribuciones, permiten obtener predicciones de la cobertura en ambientes interiores, con la exactitud requerida para que un sistema de video vigilancia opere de manera eficiente.

Para la propagación de ondas en las redes bajo el estándar IEEE 802.11b/g o WirelessFidelity (Wi-Fi), no es fácil encontrar modelos de predicción empíricos o semi-determinísticos ya validados por la comunidad científica. En gran medida, porque la mayoría de modelos se han desarrollado para sistemas de comunicación celular, con alturas de antenas superiores a 30 metros, distancias superiores a los 100 metros, y frecuencias que no sobrepasan los 2 GHz; variables que no se adaptan a una aplicación inalámbrica bajo dicho estándar. El estudio desarrollado ofrece un modelo de propagación empírico, aplicable a la banda de frecuencia de 2.4GHz, como resultado de medidas tomadas en típicos ambientes de interiores. Es conveniente considerar un modelo sencillo basado en mediciones experimentales, el cual permita determinar la predicación en el diseño de un enlace de datos. Este a su vez debe minimizar los errores de predicción de acuerdo a las características físicas del medio donde se aplican el modelo.

2. RADIO PROPAGACIÓN EN INTERIORES

Para llevar a cabo un modelo de cobertura WLAN (Wireless Local Area Network) o Red de Área Local Inalámbrica, así como para realizar una correcta planificación de su estructura, es imprescindible conocer previamente qué factores pueden intervenir en el proceso completo de intercambio de señales entre emisor y receptor. Cuando la señal electromagnética se propaga por una estancia, es afectada por múltiples fenómenos debido a la diversidad de obstáculos descritos. Es, por tanto, imprescindible tener en cuenta estos fenómenos, que causan atenuaciones y desvanecimientos de la señal original, a la hora de diseñar un modelo matemático de cobertura para WLAN [5].

Aunque el principio de propagación básico en entornos interiores es similar al de los entornos exteriores, la propagación de radio en interiores tiene su especificidad. Se pueden producir más reflejos, difracciones y refracciones en la propagación de radio en interiores debido a la rica presencia de obstáculos, como paredes y muebles, etc. Por lo tanto, las herramientas de propagación de radio cuyos esfuerzos computacionales son independientes del número de reflejos y difracciones son ventajosas sobre aquellas cuyos esfuerzos computacionales dependen en gran medida de la complejidad de los escenarios, como las herramientas ópticas de rayos y los tamaños de los escenarios interiores son normalmente más pequeños que los escenarios exteriores. Por esto las herramientas de propagación de radio pueden proporcionar un esfuerzo computacional relativamente mayor por unidad espacial para obtener un mayor nivel de precisión [4], [2].

A diferencia de los entornos al aire libre, donde es usual la presencia de objetos en movimiento a alta velocidad y usuarios móviles, los entornos interiores suelen presentar una cierta cantidad de personas que se mueven a baja velocidad, razón por la que el desplazamiento Doppler en ambientes interiores es insignificante. En la Tabla 1 se muestran los factores más significativos que afectan de manera directa al canal de radio propagación en interiores, que se consideraron, en la modelación de ondas electromagnéticas de esta investigación.

Tabla 1: Factores que afectan la cobertura en el ambiente de propagación [5], [2].

Transmisor/Receptor	Ambiente de Propagación
<ul style="list-style-type: none">• Tipo de Antena• Ganancia• Patrón de Radiación• Pérdidas	<ul style="list-style-type: none">• Obstáculos• Penetración• Reflexión• Difracción• Refracción• Dispersión
<ul style="list-style-type: none">• Ubicación• Altura• Ángulo• Polarización	<ul style="list-style-type: none">• Perdidas de Propagación• Distancia• Frecuencia
<ul style="list-style-type: none">• Técnicas de Modulación• Movimiento• Otros factores	<ul style="list-style-type: none">• Interferencias• Ruidos

Modelos de Propagación

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos cuyo objetivo es representar y caracterizar la propagación de las ondas de radio en un ambiente dado. Todo esto en función de una serie de parámetros, tales como la frecuencia, distancia y otros. Los modelos de propagación de radio se pueden clasificar según la zona de cobertura en dos tipos principales: modelos outdoor y modelos indoor (modelos en exteriores y modelos en interiores). Además según el tratamiento de las muestras y las expresiones aplicadas se pueden dividir en empíricos, deterministas, estocásticos y semi deterministas.[2]

Existen más modelos de propagación para sistema inalámbricos outdoor, debido a que la comunicación inalámbrica outdoor se viene utilizando desde hace mucho más tiempo, como la usada para radio y televisión, entre otras. Los modelos outdoor no tienen en cuenta las características particulares de la propagación indoor. El campo de la propagación indoor es relativamente nuevo y las primeras investigaciones datan de 1980. La llegada de las WLAN hace todavía más necesario el disponer de modelos de predicción de cobertura aplicables a ambientes interiores. Para esto se mantuvo como referencia de modelos certificados a estudiar, fundamentalmente, los propuestos en la Recomendación UIT R P-1238, ofrecida por la UIT en el 2016.[6], [7] Dentro de estos se encuentran los modelos Pendiente Única, Log-Distancia, COST 231 Multi-Wal, UIT-R y atenuación lineal, comprendidos todos en la categoría de empíricos, y se especificaron sus expresiones aplicadas a esta investigación.

Los modelos empíricos se construyen sobre la base de supuestos simplificadores relacionados con la geometría física de los entornos de propagación o sobre la base de un mejor ajuste a datos de medición extensos realizados en un ambiente típico. Consideran la pérdida de trayectoria como función de algunos parámetros significativos como distancia, frecuencia, altura de antena y caracterizando a los canales de radio por su comportamiento promedio. Las

influencias propias del entorno son tenidas en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada, y por lo general requieren un esfuerzo de cálculo muy bajo, lo que provoca que sean muy fáciles de implementar, siendo ésta su principal ventaja. Por el contrario, su precisión depende no solo de la exactitud de las medidas sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar [8].

Modelo de pendiente única (1sm)

El modelo de una pendiente asume que la pérdida de trayectoria en dB depende linealmente de la distancia logarítmica Tx-Rx, como se muestra en (1) [7]:

$$L(d) = L_0 + 10 n \log(d) \quad (1)$$

Dónde L_0 es la pérdida de trayectoria a la distancia Tx-Rx de un metro y n es el exponente de pérdida de trayectoria. Este modelo se basa en la forma del modelo de espacio libre y tiene como objetivo incluir todas las pérdidas debidas a diversos mecanismos de propagación por el exponente de pérdidas de trayecto. El valor del exponente de pérdida en la frecuencia de trabajo de 2.4GHz, es de $n=3.5$ [1].

Modelo de pérdidas Log-Distancia

La mayor parte de los modelos empíricos se basan en (2), y debido a que es aplicable para ambientes interiores y exteriores, es uno de los modelos más clásicos. Está basado en la ley de potencia con la distancia, según la cual las pérdidas de propagación aumentan con el logaritmo (de base 10) de la distancia, dependiendo del valor del exponente de pérdidas n . La atenuación es dada por [2]:

$$L(dB) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X\sigma \quad (2)$$

Donde d = Distancia transmisor-receptor (km), $L(d_0)$ = Pérdidas de propagación (dB) a una distancia, d_0 = Distancia de referencia (km) (para ambientes interiores, generalmente es igual a 0,001km); $X\sigma$ = Variable aleatoria (gausiana o normal), en dB, con media igual a cero y desviación estándar igual a σ , también en dB. Esta variable describe el comportamiento estadístico de las pérdidas de propagación para distancias mayores a d_0 .

Las pérdidas $L(d_0)$ se calculan utilizando el modelo de pérdidas en el espacio libre o a través de mediciones de campo realizadas a la distancia d_0 [9]. Los valores en la frecuencia de trabajo para el exponente de pérdidas $n=3.73$ y la desviación estándar $\sigma=4.35$, ambos para el tipo de ambiente NLOS, dichos parámetros dependen de la frecuencia de operación e implícitamente de las características físicas (tipos de entornos interiores, disposición de los elementos físicos presentes, tipos de material de construcción, etc.) inherentes al camino o ruta de medición [10].

Modelo de ITU-R

De manera implícita, el modelo considera las pérdidas a través del mobiliario, puertas y paredes, a través del exponente de pérdidas n que depende del tipo de edificios (residencial, comercial, de oficinas, etc.). Así mismo, toma en cuenta de forma explícita, las pérdidas a través de pisos. En resumen, las pérdidas de propagación en el referido modelo se determinan a partir de (3) [5], [1]:

$$L(dB) = L(d_0) + N \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L_f(N_f) \quad (3)$$

Donde $N = 10n$; d = Distancia entre transmisor y receptor, en metros ($d > 1$ m); d_0 = Distancia de referencia (igual a 1 m); $L(d_0)$ = Pérdidas (dB) para una distancia de referencia d_0 igual a 1m. Asumiendo, propagación en espacio libre, entonces (d_0) = $20 \log f - 28$; N_f = Número de pisos atravesados por la trayectoria directa (para $N_f = 0$, resulta $L_f = 0$ dB); L_f = Factor de pérdidas por penetración en pisos (dB), que además de depender de N_f , también depende de la frecuencia. El valor de N para la frecuencia de trabajo en este caso es el correspondiente a Oficinas en el que $N=30$ [7].

Modelo COST 231 Multi-Wall

El modelo de pared múltiple COST231 es una versión mejorada de los modelos de factor de pared y piso. Desarrollado sólo para entornos interiores, considera una componente de pérdidas que es proporcional al número de paredes

atravesadas, pero asume una dependencia no lineal entre la atenuación total, causada por múltiples pisos y el número de pisos atravesados, que aumenta más lentamente, para pisos adicionales después del primer piso atravesado. El modelo está definido en (4) [7]:

$$L(\text{dB}) = L_{el} + L_c + 10n \log d + \sum_{i=1}^W L_{wi} N_{wi} + L_f N_f \left(\frac{N_f - 2}{N_f + 1} - b \right) \quad (4)$$

Dónde L_{el} es la pérdida del trayecto en el espacio libre para el trayecto en línea recta entre el transmisor y el receptor, L_{wi} es la pérdida de penetración para una pared de tipo i , N_{wi} es el número de paredes de tipo i , W es el número de tipos de muro, N_f es el número de pisos, L_f es la pérdida de penetración por piso, los factores L_c y b dependen del ambiente interior considerado y son obtenidos por regresión lineal a partir de mediciones experimentales, siendo valores típicos $L_c = 37$ y $b = 0,46$ [4], [1]. En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros constantes de la expresión. Tabla 2: Valores típicos del modelo [7].

Variable	Descripción	Factor(dB)
Lf	Suelos(estructura típica)-Baldosas- Revestimiento de hormigón- Espesor típico<30cm	18.3
Lw1	Muros internos finos-Yeso-Muros con muchos huecos(ventanas)	3.4
Lw2	Muros internos-Hormigón, ladrillos-Mínimo número de huecos	6.9

Modelo de atenuación lineal

Para un transmisor y un receptor que se encuentran en la misma planta. La pérdida de potencia medido en dB se obtiene de la pérdida de potencia en espacio libre (L_{el}) más un factor que es lineal del rango que experimentalmente se ha obtenido. La fórmula utilizada en este modelo es [2]:

$$PL(d) = L_{el} + ad \quad (5)$$

Donde “ a ” es el coeficiente de atenuación lineal y “ d ” es la distancia entre transmisor y receptor. En el caso de un ambiente de oficinas, el coeficiente a sería 0.47 dB/m. Este modelo es más simple que el modelo de pérdidas Log-Distancia y no tiene en consideración efectos de desvanecimiento. Los valores óptimos para a están entre 0.47, 2.8 y 0.22 para un piso, más pisos y entornos abiertos, respectivamente [2].

3. MEDICIONES Y EQUIPOS UTILIZADOS

Para las comunicaciones entre dispositivos de forma general la cobertura es un tema relevante y con características muy peculiares relacionadas con el contexto al que es referido dentro de las radiocomunicaciones. A causa de las múltiples formas de trayecto radioeléctrico y la diversidad de entornos, este término está referido a una predicción estadística. Las características de movilidad de un terminal es una función del grado de cobertura de la red. Generalmente puede aplicarse una cobertura necesaria para lograr un enlace en el sentido dispositivo- estación suficientemente grande. Sin embargo, el retro enlace o alcance de cobertura en sentido contrario, estación-dispositivo, es común que sea más pequeño.

La red inalámbrica en análisis, es un sistema de video vigilancia con estructura de acceso IP [11], como la ejemplificada en la Fig. 1, de la cual se tiene como nodo central un Punto de Acceso (AP) del modelo NANOSTATION-M2 UBIQUITI, que permitirá establecer la conexión inalámbrica en la banda de 2.4 GHz, con todos los dispositivos del sistema. Operable bajo los estándares 802.11b/g/n, configurado con una potencia de transmisión de 23 dBm y una sensibilidad del receptor de hasta -83 dBm.

Seleccionado como NVR para la gestión de las cámaras se tiene el modelo DS-7100NI-K1/W/M(C), para lograr una gestión adecuada de las videocámaras a partir de una conexión inalámbrica sobre la frecuencia de trabajo, a una velocidad de hasta 144Mbps, permitiendo así que el sistema en su totalidad sea inalámbrico. El NVR en los sistemas de videovigilancia tiene dos funcionalidades, es un dispositivo interactivo de grabación de televisión y video en

formato digital. Se compone, del hardware, que consiste principalmente en un disco duro de gran capacidad, un microprocesador y los buses de comunicación; y del software, que proporciona diversas funcionalidades para el tratamiento de las secuencias de vídeo recibidas, acceso a guías de programación y búsqueda avanzada de contenidos. En el modelo elegido se tiene además un diseño de arreglo de dos antenas exteriores para ofrecerle poder y estabilidad a la señal, para una gestión inalámbrica de hasta 8 videocámaras de manera simultánea, ofreciendo así una gran movilidad del usuario por su fácil acceso web. Por último, las videocámaras de las series Wi-Fi NVR de la empresa HIKVISION, una de las más recomendadas del mercado actual y funcional sobre los estándares 802.11b/g/n.

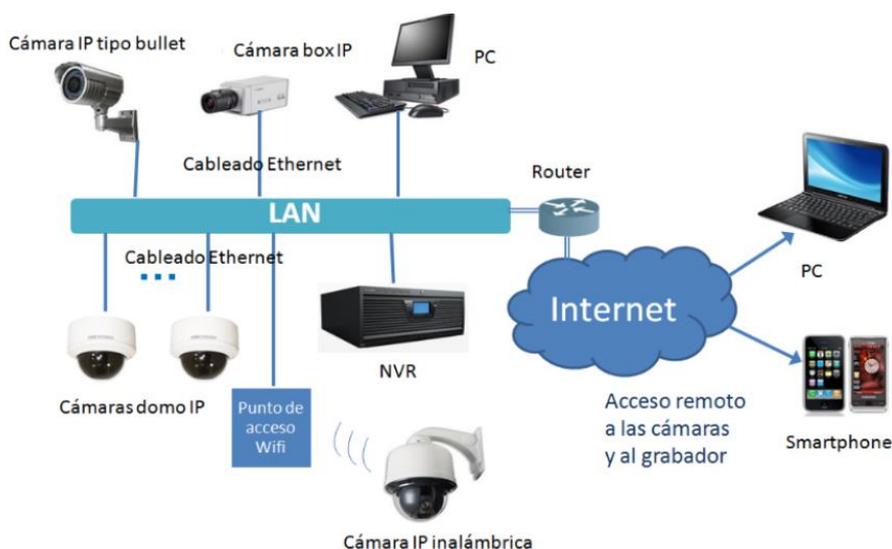


Figura 1: Instalación de CCTV sobre IP [12].

Para optimizar y extender la aplicación del modelo matemático resultante de esta investigación, es necesario seleccionar los instrumentos de medición para analizar la atenuación que sufre la señal de radio frecuencia en cada uno de los recintos. De esta forma recrear así un escenario entre dos elementos del sistema de seguridad inalámbrico en cuestión, de las características y funcionalidades, de los equipos que lo componen. En este se utilizó un generador de señales ROHADE & SCHWARZ SMF 100A (figura 2 (a)), simulando la función de trasmisor (Tx) en la banda de 2.432005GHz, con el objetivo de generar una señal monocromática, debido a que es muy difícil discernir las señales unas de otras, lo que haría más engorroso el proceso de medición. Configurándose con un nivel de potencia de 23 dBm, con pasos de variación de 20 MHz. Se tomó una distancia como referencia, en este caso un metro, que garantizase que los puntos de medición estuviesen siempre en la región de campo lejano de la antena. Un analizador de espectro R & S@FSL6 (figura 2 (b)), se utilizó para la funcionalidad de receptor (Rx), para realizar las medidas de potencia. Configurado en frecuencia centrada de 2.432005 GHz, referencia de -20 dBm, atenuación (Att) de 0 dBm, ancho de banda RBW de 3 MHz y VBW de 10 MHz, y un Sweep Time (SWT) de 215 ms.



(a)



(b)

Figura 2: Set de medición (a) Vista frontal del generador de señales y configuración [13] (b) Vista frontal de Analizador de Espectro R & S@FSL6 [14].

En la figura 3 se representan las dos antenas patrones, utilizadas tanto para la transmisión y recepción de la señal que se analizara. Ambas omnidireccionales, operables sobre la banda de 2.4 GHz, en correspondencia con las antenas de los dispositivos que se rigen sobre los estándares WIFI. Determinándose así que cumplen con los requisitos necesarios para efectuar el estudio en cuestión.

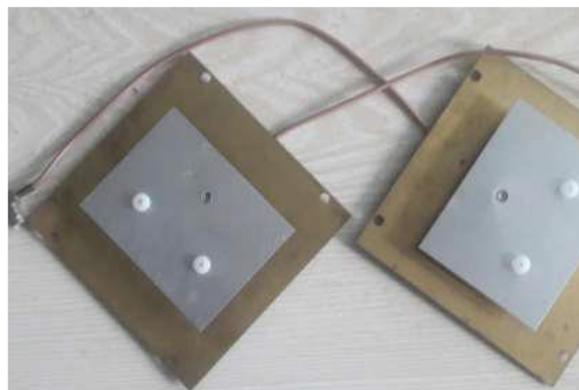


Figura 3: Antenas de parche Tx y Rx omnidireccional en 2.4GHz.

Escenarios de medición

Las mediciones fueron implementadas en dos entornos interiores de manera general, que aquí serán denominados Ambiente 1 y Ambiente 2, localizados en el Departamento de Telecomunicaciones y Telemática; de manera específica en el local correspondiente a Comunicaciones Inalámbricas, de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. El Ambiente 1 apreciable en la figura 4, correspondió al pasillo de Telemática justo frente al laboratorio de comunicaciones inalámbricas, en un área contigua al departamento de trabajo. Denominado escenario 1, donde se tomaron medidas del nivel de potencia recibida versus distancia, en la presencia de rejillas de hierro, personas transitando en la ruta, sobre la frecuencia 2.432005 GHz, variando la altura del receptor (Rx) entre 1 m y 3 m, llegando a una distancia máxima de 50 metros. Para los datos ofrecidos en la tabla 3, se tomaron mediciones a varios puntos ilustrados en la figura 4, a partir de una referencia de 1m de separación entre Tx(Transmisor) y Rx, y luego en aumento consecutivo de 2.5 m desde el Tx.

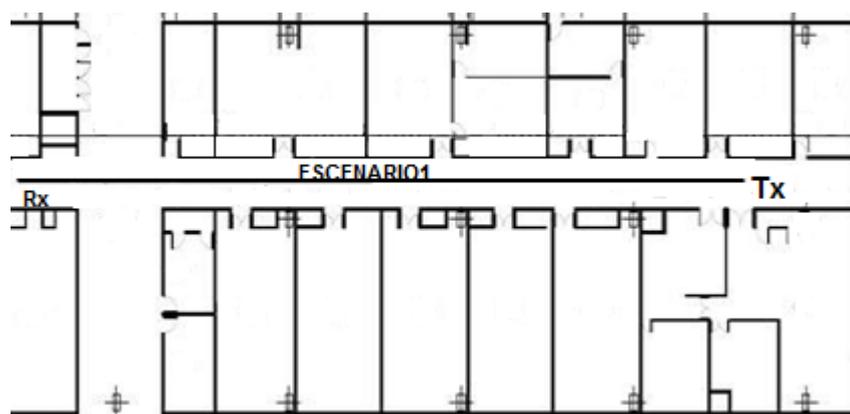


Figura 4: Ruta del Escenario 1.

El Ambiente 2 consistió en varios escenarios de oficinas dentro del laboratorio de comunicaciones inalámbricas, de los cuales se especificarán las rutas tomadas y los diversos obstáculos que presentan a partir de la Figura 5. En estos se determinó el nivel de potencia recibida versus distancia, sobre la frecuencia de 2.43 GHz y variando la altura del receptor entre 1 y 3 metros. A partir de una referencia de 1m de separación entre Tx y Rx, y luego en aumento consecutivo de 2.5m desde el Tx.

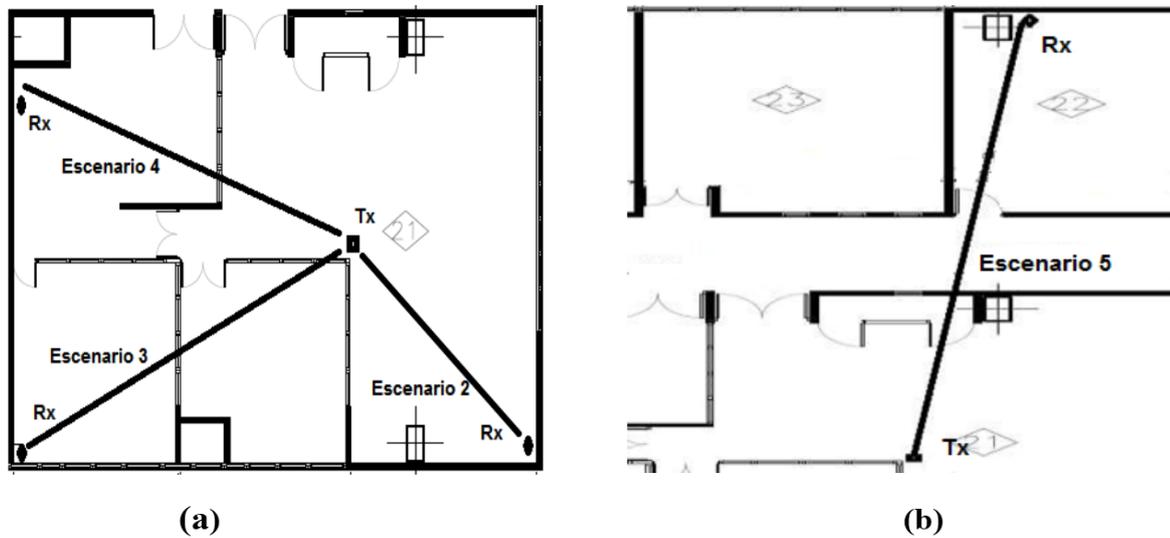


Figura 5: Mediciones en el Ambiente 2 (a) Rutas de Mediciones 2, 3 y 4 (b) Ruta de Medición 5.

Escenario 2: En presencia de sillas, mesas, televisor plasma y computadoras de escritorio en la ruta de medición.

Escenario 3: En presencia de dos paredes, la primera de concreto de 10cm de espesor y 1.3m de altura, a partir de aquí cristal de 1cm de grosor con marcos de madera, la segunda de concreto de 10 cm de espesor, además sillas, mesas y computadoras de escritorio en la ruta de medición.

Escenario 4: En presencia de una pared de concreto de 10cm de espesor y 1.3 m de altura a partir de aquí cristal de 1cm de grosor con marcos de madera.

Escenario 5: En presencia de dos paredes, la primera de concreto de 15 cm de espesor y 2.7 m de altura a partir de aquí reja de hierro con ventanas de 3 cm de grosor con marcos de madera, la segunda de concreto de 20 cm de espesor, además sillas, mesas y computadoras de escritorio en la ruta de medición, luego de sobrepasar el pasillo y penetrar en el departamento adyacente.

Análisis de las Mediciones

En la Fig. 6 se muestra la dispersión de las pérdidas de propagación, en función de la distancia, para cada una de las alturas en la ruta de medición del Escenario 1 (Ambiente 1), en donde se enmarca el aumento de las pérdidas de propagación con la distancia. Se verifica además que las pérdidas de propagación también varían con la altura del receptor, aunque no de manera significativa.

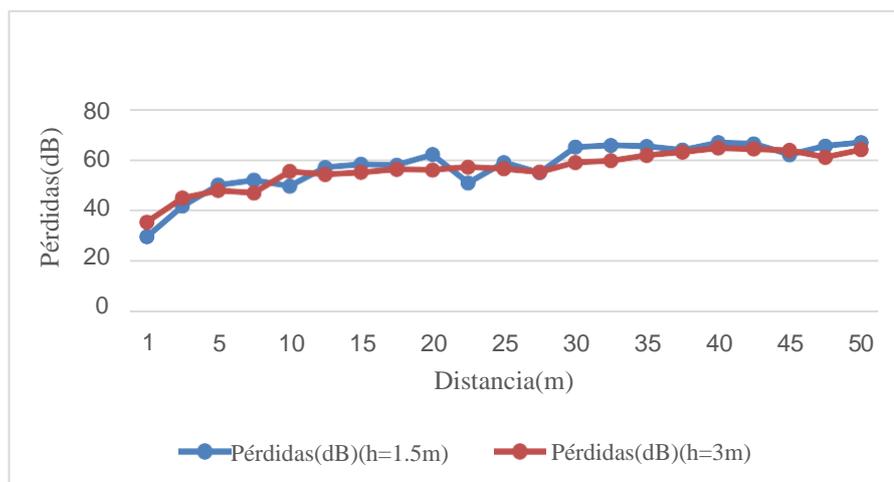


Figura 6: Pérdidas de propagación versus distancia Escenario 1.

En la tabla 3 se muestra las pérdidas de propagación y se observa como era de esperarse, que aumenten a medida que la distancia entre el transmisor y el receptor incrementa. Las medidas se realizaron a una separación entre Rx y Tx, de aumento de 2.5m, tomando como referencia un punto de muestra inicial de 1m y ocupan el máximo posible de distancia que permitió la estructura del departamento. En los datos recogidos en la tabla 3 se percibe que la ruta de medición del escenario 4 en sus primeros 3 m de distancia entre el Tx y Rx es el que presenta menos pérdidas, lo cual se debe a que es un camino con línea de vista, contrariamente a lo observado en la ruta de medición del escenario 3, en la cual se obtuvieron las mayores pérdidas y algunas variaciones, debido a que, la trayectoria de la señal es obstruida por dos paredes. Así mismo, se puede notar que en la ruta de medición del escenario 2 al no tener la pared de concreto y cristal, las pérdidas de propagación son menores que en la ruta de medición del escenario 4.

Tabla 3: Pérdidas de propagación versus distancia escenarios del Ambiente 2

D(m)	Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
	P(dB) (h=1.5m)	P(dB) (h=3m)	P(dB) (h=1.5m)	P(dB) (h=3m)	P(dB) (h=1.5m)	P(dB) (h=3m)	P(dB) (h=1.5m)	P(dB) (h=3m)
1	29.85	35.64	31.85	35.64	29.85	35.64	31.85	35.64
2.5	41.42	43.20	46.89	49.17	46.89	49.17	41.95	45.12
5	52.75	49.70	51.80	56.50	56.73	56.18	60.22	57.30
7.5	48.35	51.72	65.66	61.86	62.17	56.70	62.40	59.87
10	53.77	56.64	65.71	62.30	62.49	57.55	65.70	53.95
11	-	-	67.28	63.47	-	-	64.89	60.21
12.5	-	-	-	-	-	-	67.05	63.23
15	-	-	-	-	-	-	66.90	64.75

4. AJUSTE DE CURVAS

Una vez tabulados los resultados de las mediciones, con 90 muestras diferentes, se necesita obtener un modelo matemático que represente la ecuación que relaciona las variables de atenuación, distancia y altura para cada escenario. Se seleccionó el software de ajuste de curva Curve Expert Professional, que permitirá obtener expresiones que representen el comportamiento de la cobertura en la edificación, mediante un gradiente de distancia de la potencia recibida. La comparación de los valores del error estándar y del coeficiente de correlación, permitirá determinar la expresión que relaciona las variables antes mencionadas con mayor eficiencia.

Curve Expert Professional versión 2.65 del 2017 (figura 7), es una solución multiplataforma para el ajuste de curvas y el análisis de datos. En este los datos se pueden modelar usando una caja de herramientas de modelos de regresión lineal, modelos de regresión no lineal, métodos de suavizado, en resumen, ofrece más de sesenta modelos integrados. La capacidad de creación de gráficos de calidad, permite una representación exhaustiva del ajuste de la curva y el proceso de encontrar el mejor ajuste se puede automatizar permitiendo que Curve Expert Professional compare los datos con cada modelo para elegir la mejor curva. El software está diseñado con el propósito de generar resultados de alta calidad mientras ahorra tiempo en el proceso [15].

Se consideró como variable dependiente la potencia recibida y como variables independientes la distancia transmisor-receptor y altura del receptor. Una vez hecho el ajuste de curva de cada escenario, partiendo de las muestras tomadas, se realiza el análisis correspondiente al error estándar y el coeficiente de correlación para cada uno de las expresiones resultantes, y como es evidente en la tabla 4, la distribución Racional es la idónea, en parte de la solución al problema que se pretende resolver, al presentar un coeficiente de correlación lo más cercano a 1 y un mínimo error en casi todos los escenarios, lo que reafirma que la expresión del nuevo modelo para interiores a utilizar es una función racional, descrita en (6), con una representación gráfica como la mostrada en el Fig. 8.

$$P(dBm) = \frac{(a + b h(m) + c d(m))}{(1 + d h(m) + e d(m))} \quad (6)$$

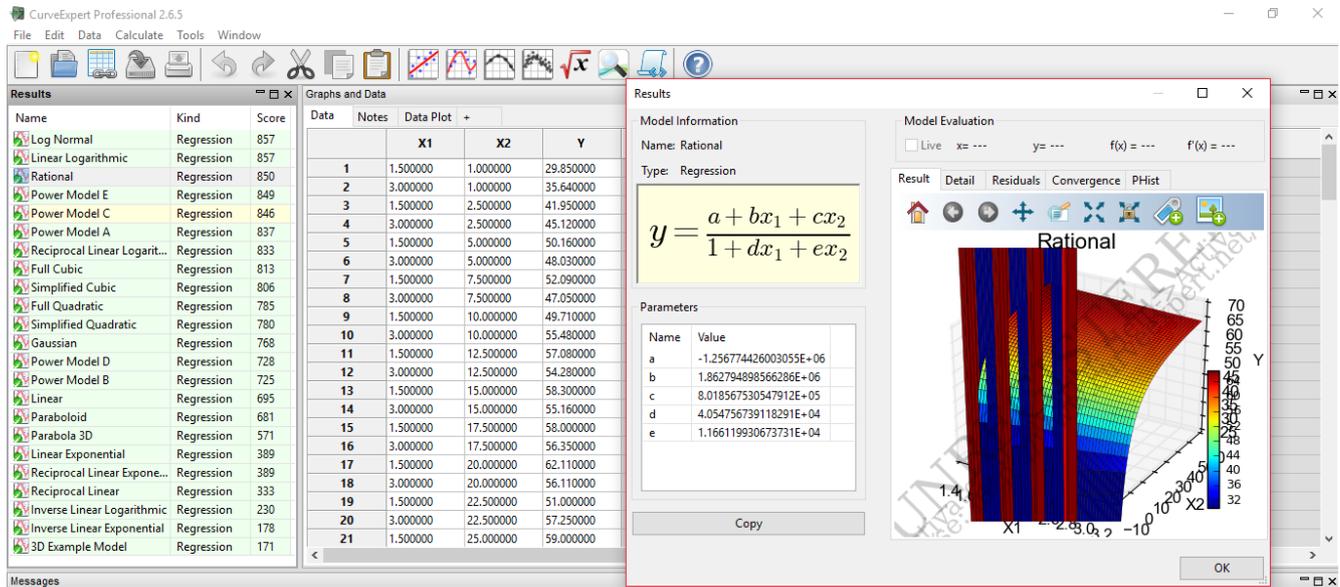


Figura 7: Interfaz del software Curve Expert Professional.

Tabla 4: Ajuste de Curvas por Escenario.

Escenario	Error Estándar	Coefficiente de Correlación	Distribución	Valores
1	2.8561	0.9432	$P = a + b \log(h) + c \log(d)$	$a = 36,30$ $b = -2,29$ $c = 7,72$
2	2.6714	0.9410	$P = \frac{(a + b h + c d)}{(1 + d h + e d)}$	$a = 7,63$ $b = 6,71$ $c = 37,74$ $d = 0,07$ $e = 0,62$
3	2.7296	0.9832	$P = \frac{(a + b h + c d)}{(1 + d h + e d)}$	$a = -28,47$ $b = 34,43$ $c = 68,59$ $d = 67,28$ $e = 88,58$
4	2.0637	0.9902	$P = \frac{(a + b h + c d)}{(1 + d h + e d)}$	$a = -17480898,84$ $b = 9453528,23$ $c = 25476073,89$ $d = 208320,86$ $e = 378869,62$
5	3.6985	0.9679	$P = \frac{(a + b h + c d)}{(1 + d h + e d)}$	$a = 15,91$ $b = 34,39$ $c = 33,13$ $d = 0,77$ $e = 0,41$

5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Comparando la expresión resultante en (6) con los diversos modelos de propagación en interiores, certificados en la Recomendación UIT R P-1238, ofrecida por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) en el 2015 (Pendiente Única, Log-Distancia, COST 231 Multi-Wall, UIT-R y pendiente lineal). Mediante Excel se han representado y comparado gráficamente tanto las rectas que modelan las muestras obtenidas en las medidas, como aquellas rectas que representan los diferentes modelos experimentales de propagación explicados anteriormente y el modelo resultante. Es importante recordar que cada uno de estos modelos de propagación depende de una serie de parámetros que varían en función del entorno en el que se realiza la medida (LOS, NLOS, difracción, tipo de edificación, etc.).

Se realizó un estudio del desempeño de la distribución racional resultante, para modelar el comportamiento de la cobertura en un ambiente interior. Se realizaron las representaciones gráficas de cada modelo, a partir de las mediciones de cada escenario, a la vez que se compararon con la representación gráfica de las mediciones reales y del

modelo resultante por el ajuste de curvas con los datos de cada escenario de igual manera, aunque solo se mostrarán las más relevantes en cuanto a dificultad de propagación se trata. Los valores de los parámetros típicos de cada modelo fueron extraídos de las especificaciones dadas.

Distribución Racional

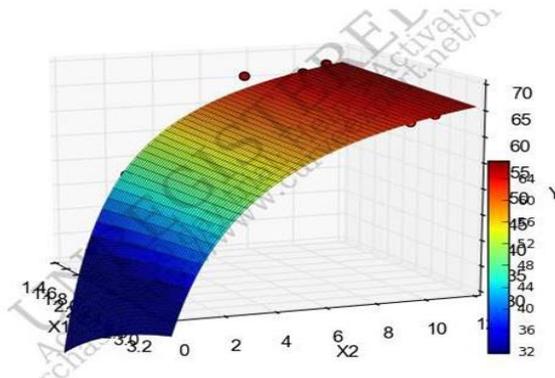


Figura 8: Representación de la Distribución Racional Resultante.

Para el modelo resultante, se precisaron los valores de las constantes (a, b, c, d, e) de la función de aproximación, luego de realizar varias comparaciones de este tipo, aplicando en todos los escenarios los valores ofrecidos en cada uno en particular por el ajuste de curvas. Todo esto con el objetivo de seleccionar los que permitieran la mejor aproximación a la curva de valores de las mediciones realizadas, y así particularizar el uso del nuevo modelo de propagación basado en el gradiente de distancia de las pérdidas, según el tipo de ambiente interior (oficinas, teatros, grandes o pequeños espacios interiores, con o sin divisiones en los mismos). Los valores de las variables constantes se tomaran según el tipo de escenario en que se esté aplicando como se expone en la tabla 5.

Tabla 5: Valores aproximados para la distribución racional.

Tipo de Escenario Interior	Complejidad de Obstrucciones	Valores
LOS –NLOS	con menor cantidad obstrucciones (escritorios, estantes, sin incluir paredes)	a = 7,63 b = 6,71 c = 37,74 d = 0,07 e = 0,62
NLOS	con mayor cantidad de obstrucciones (que incluyan paredes)	a = -17480898,84 b = 9453528,23 c = 25476073,89 d = 208320,86 e = 378869,62

Para el análisis de los modelos podemos pasar a confirmar cuál de ellos se adecua mejor para el análisis de cobertura de cada escenario, presentando la menor cantidad de error en su representación. Para el caso de la expresión generada por el mejor método del ajuste de curva de (6), solo depende de la altura y la distancia, a parte de los valores generados por el mismo ajuste de curva.

Escenario 1

Este escenario es el de mayor distancia y rango de mediciones, con muy pocos obstáculos, y en este se tiene la siguiente comparación mostrada en la Fig. 9 (a) para una altura de 1.5m y en la Fig. 9 (b) para una altura de 3 m. Para h=1.5 m y cambiando la distancia se puede definir que la precisión de los modelos varía según se va en aumento. En el caso de gráfico 3 (a) quedan descartados casi todos los modelos excepto el modelo de multi-paredes de COST-231 y el obtenido como resultado, es decir la distribución racional. En este gráfico se puede notar como ambos modelos son bastantes precisos hasta llegar a una distancia de 15m, donde se comienzan a separar de forma gradual en cuanto a la curva de valores reales. Luego de este punto de separación se aprecian grandes fluctuaciones de la curva de valores reales, y el modelo más cercano a predecirlos en cierta forma corresponde al nuevo modelo de propagación resultante hasta una distancia de 30m aproximadamente, a partir de la cual se convierte el modelo de multi-paredes como el más óptimo para este escenario en las condiciones mencionadas, al tener un menor error en casi toda la ruta.

En el caso de la Fig. 10 (b) se repiten el modelo de multi-paredes de COST-231 y el obtenido como resultado, es decir la distribución racional, como los más precisos. En este gráfico se puede notar como ambos modelos tienen un gran

nivel de aproximación hasta llegar a una distancia de 12 m, donde se comienza a separar de forma gradual la curva de valores reales. Luego de este punto de separación se aprecian grandes fluctuaciones en dicha curva, y el modelo que presenta un menor error de aproximaciones es el nuevo modelo de propagación resultante hasta una distancia de 40 m, donde tiene un punto de fluctuación no tan significativo, lo que hace evidente que presenta un menor nivel de error en este escenario en las condiciones mencionadas en casi toda la ruta. Notándose que a pesar de tener tendencia de línea recta ascendente es un modelo válido con mayor exactitud a mayores alturas en este caso a 3 m, altura típica de conexión de cámaras y otros elementos de sistemas de video vigilancia.

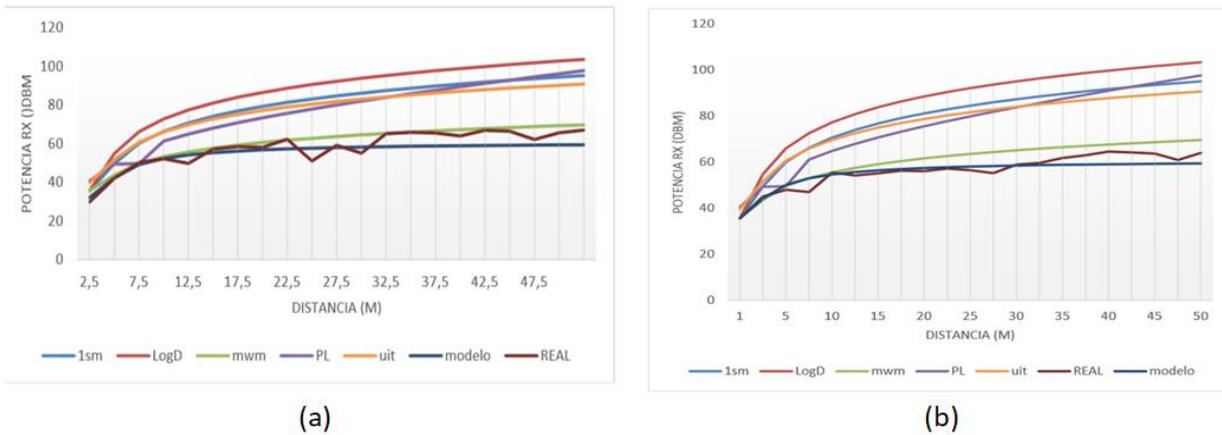


Figura 9: Comparación entre los modelos utilizados y las mediciones reales en el escenario 1 en altura del Rx (a) de 1.5 m (b) de 3m.

Escenario 4

Este escenario NLOS, es uno de los típicos ambientes de oficinas, con una división de concreto y ventanas de cristal, donde hay obstáculos presentes como computadoras de escritorios, en este se tiene el análisis mostrado en la Fig. 10 (a) para una altura de 1.5m y en la Fig. 10 (b) para una altura de 3 m. En el caso de la Fig. 10 (a) se comienza a ver la efectividad del resto de los modelos en ambientes NLOS con un gran número obstrucciones, en este caso, los más cercanos a la curva de pérdidas reales, son pendiente lineal, multi-paredes COST-231 y el nuevo modelo de propagación. En este gráfico se puede notar como el modelo basado en la distribución racional resultante del ajuste de curvas, tiene un menor error de aproximación en casi toda la ruta de medición, exceptuando el tramo de 6 a 8 metros en el que modelo de pendiente lineal tiene mayor precisión. Convirtiéndose así el nuevo modelo en el óptimo para este escenario.

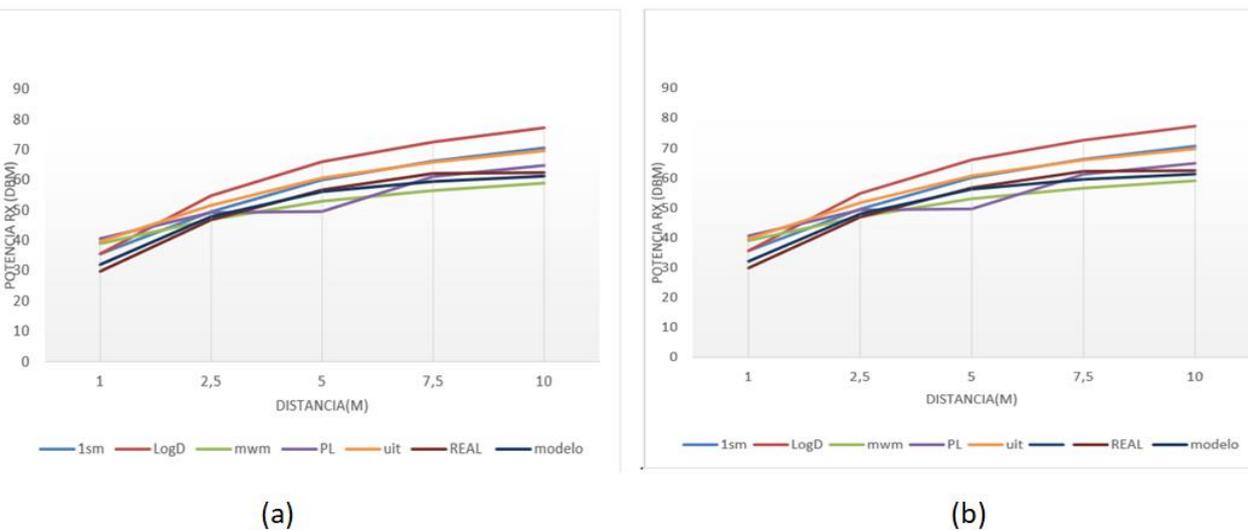


Figura 10: Comparación entre los modelos utilizados y las mediciones reales en el escenario 4 en altura del Rx (a) de 1.5m (b) de 3m.

En el caso de $h=3$ m descrito en el gráfico 4 (b) se coinciden los modelos seleccionados, e incluso como el más exacto para este el nuevo modelo de propagación, con casi el mismo comportamiento que en la Fig. 11 (a), notándose así su mayor nivel de precisión en escenarios con gran cantidad de dificultades para la propagación de ondas electromagnéticas.

Escenario 5

Este escenario NLOS, es uno de los típicos ambientes de oficinas, con varias divisiones, entre locales adyacentes separados por un pasillo y obstáculos de oficinas. En la Fig. 11 (a) se comienza a ver la efectividad del resto de los modelos en ambientes NLOS con un gran número de obstrucciones, en este caso, los más cercanos a la curva de pérdidas reales, son pendiente lineal y el nuevo modelo de propagación. En este se puede notar como el modelo basado en la distribución racional resultante del ajuste de curvas, tiene un menor error de aproximación hasta llegar a una distancia de 8m, donde se comienza a separar de forma gradual en cuanto a la curva de valores reales. Luego de este punto de separación se destaca grandes fluctuaciones de la curva de valores reales, y el modelo más cercano a predecirlos en cierta forma corresponde al modelo de pendiente lineal, hasta la distancia marcada, a pesar de tener tendencia de línea recta ascendente, el nuevo modelo aún es válido para este escenario, es seleccionado como el óptimo para describir las pérdidas. En el caso de gráfico 5 (b) se repiten ambos modelos y su comportamiento.

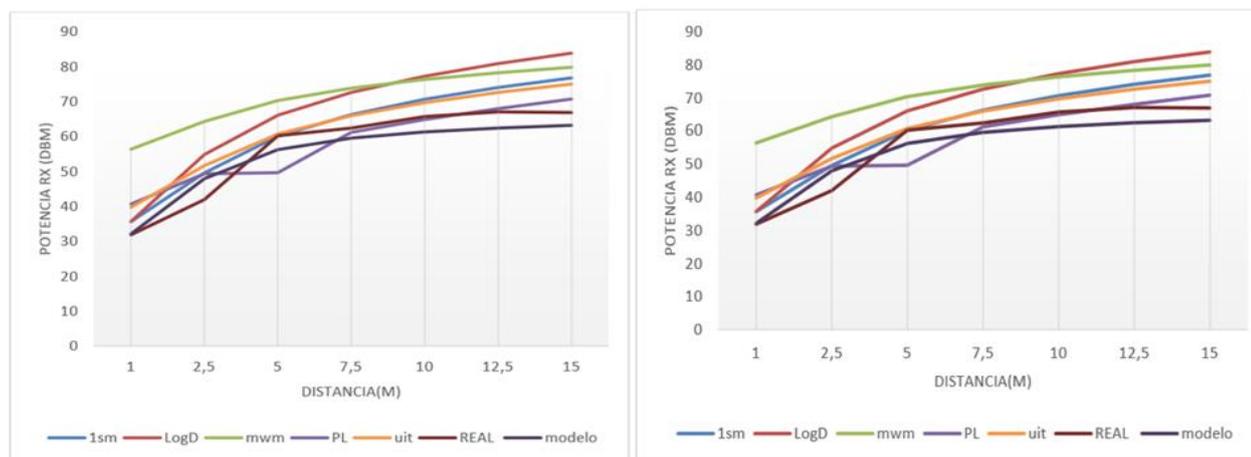


Fig. 11: Comparación entre los modelos utilizados y las mediciones reales en el escenario 5 en altura del Rx (a) de 1.5m (b) de 3 m.

6. CONCLUSIONES

El resultado de esta investigación ofrece un método para el cálculo de las pérdidas de propagación operando en la frecuencia de 2.4GHz, en ambientes interiores. En el mismo se consideró como variable dependiente la potencia recibida y como variables independientes la distancia transmisor-receptor y altura del receptor. La creación de un kit de mediciones con el objetivo de analizar la cobertura en diversas campañas de medidas, en las que se han recreado diferentes escenarios: visión directa (LOS), sin visión directa (NLOS), difracción, etc.; permitió obtener las posiciones óptimas de las cámaras inalámbricas, tomando los valores experimentales de las atenuaciones descritas por el analizador de espectro (en el cual se analizó una señal monocromática) en los distintos escenarios, datos que se implementaron en el software Curve Expert Professional, el cual mostró modelos de ajuste de curva de los mismos. La comparación de los resultados en cada una de las campañas de medición con los modelos de propagación ofrecidos por la Recomendación ITU-R P.1238-8 y el desarrollado mediante el ajuste de curvas, permiten comprobar cómo los modelos existentes e incluso los recomendados por la UIT, difieren en cuanto a las pérdidas en función de la distancia y los obstáculos. Al realizar este análisis se obtuvo que para cada escenario no hay un modelo en específico que nos brinde un menor grado de error en cuanto a atenuación real, para cada altura, distancia y escenario, existiendo diferentes modelos a tomar en cuenta. Se debe considerar claro está la precisión del modelo obtenido por el ajuste de curvas, el cual en muchas posiciones fundamentales de los escenarios analizados arrojó un menor error que los modelos propuestos por la Recomendación ITU-R P.1238-8. Mediante este trabajo se contribuye a un nuevo

conocimiento para lograr una optimización en los diseños relacionados con los sistemas de video vigilancia inalámbricos que operan en la banda de 2.4GHz sobre la familia de estándares 802.11 b/g/n y además, la expresión puede ser utilizada de forma general para cualquier sistema de comunicación inalámbrica que opere sobre los estándares 802.11b/g/n.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, que permitió el uso de sus instalaciones e instrumentos necesarios para el desarrollo de esta investigación. En especial al equipo de docentes que componen el departamento de Comunicaciones Inalámbricas.

REFERENCIAS

- [1] M. M.-Y. Alexandra Erreyes-Dota, «An Optimized Propagation Model based on Measurement Data for Indoor Environments», *J. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 69-75, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.26636/jtit.2018.117217>
- [2] M. E. D. Mosquera y And Gerardo Castañon, «Bringing It Indoors: A Review of Narrowband Radio Propagation Modeling for Enclosed Spaces», *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 8, pp. 103875-103899, jun. 2020, [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9107142>
- [3] H. Klaina *et al.*, «Implementation of an Interactive Environment With Multilevel Wireless Links for Distributed Botanical Garden in University Campus», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132382-132396, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3010032.
- [4] R. Gulia, «Path loss model for 2.4GHZ Indoor Wireless Networks application to Drones», Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, 2020.
- [5] N. García Fernández, «Modelo de cobertura en redes inalámbricas basado en radiosidad por refinamiento progresivo», », TESIS DOCTORAL., UNIVERSIDAD DE OVIEDO, OVIEDO, 2006.
- [6] E. S. Capota Cristian, «Spectral Analysis in the 2.4GHz WIFI band in bucharest», *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, n.º 12, pp. 2315-2319, Diciembre 2020, [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9224130>
- [7] «Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz», ITU-R, 2015.
- [8] B. O. E. Kerem Kucuk, «Interference Power and SIR Comparison for Different Chanel Assignment Models on WI-FI Bands», *IEEE Wirel. Comun. Netw. ConefrenceWCNC*, pp. 230-235, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8566445>
- [9] R. Akl, D. Tummala, y X. Li, «Indoor propagation modeling at 2.4GHz for IEEE 802.11 networks», *Dep. Comput. Sci. Eng.*, p. 6, 2002.
- [10] J. MARÍN ALFONSO, «Modelo de propagación empírico para predicción de pérdidas de potencia de señales inalámbricas bajo el estándar IEEE 802.11B/G», *Gerenc Tecnol Inf.*, vol. 8, n.º 20, pp. 35-45, jun. 2009.
- [11] T. Z. Suman Banerjee, «The Design and Implementation of a Wireless Video Surveillance System», *Proc. 21st Annu. Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, vol. MobiCom '15, pp. 426-438, sep. 2015, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1145/2789168.2790123>
- [12] C. A. Prada Morante, A. M. López Vargas, y M. A. Duran Vargas, «Diseño de un Sistema de video vigilancia por medio de enlaces de microondas para la empresa DISAM sucursal Sanat Marta», Tesis de Grado, Universidad Cooperativa de Colombia, Santa Marta, Magdalena, 2018.
- [13] «R&S®SMF100A Microwave Signal Generator Operating Manual». Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG version 6, 2016.
- [14] «R&S®FSL Spectrum Analyzer High-end functions in an extremely lightweight, compact package». Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG version 6, 2008.
- [15] D. G. Hyams, «Curve Expert Professional Documentation v 2.7.3». 2020.

SOBRE LOS AUTORES

Fidel Martínez Armas: Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, en enero de 2022. ORCID: 0000-0001-8989-946X

Taimir Alain Morales Roche: Profesor ATD de Telecomunicaciones y Electrónica en la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, actualmente cursando en el 6to año de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica. ORCID: 0000-0002-8365-3183

Miguel Eduardo Borrego Corona: Doctor en Ciencias Técnicas, Master en Radioelectrónica en la especialidad de Microondas, Profesor Auxiliar, Diplomado en la Universidad de Hefei China. ORCID: 0000-0002-8381-8320.

Grettel Rodríguez Trujillo: Master en Telecomunicaciones y Telemática, Profesor Asistente, Investigador Agregado, CUJAE. ORCID:0000-0003-1037-6063

CONFLICTO DE INTERESES

Este trabajo no presenta ningún conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Fidel Martínez Armas:** conceptualización: 100%, preparación: 90%, creación:100% y desarrollo del artículo: 100%, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo: 80% y aprobación de la versión final a publicar:100%, contribución a la idea: 100% y organización del artículo: 95%, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final:100%.
- **Taimir Alain Morales Roche:** conceptualización: 100%, preparación: 100%, creación: 90% y desarrollo del artículo: 100%, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo: 100% y aprobación de la versión final a publicar:100%, contribución a la idea: 95% y organización del artículo: 100%, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final:100%.
- **Miguel Eduardo Borrego Corona:** conceptualización: 100%, preparación:100%, creación:100% y desarrollo del artículo:100%, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo:90% y aprobación de la versión final a publicar:100%, contribución a la idea: 100% y organización del artículo: 80%, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final:100%.
- **Grettel Rodríguez Trujillo:** conceptualización: 100%, preparación: 80%, creación: 80% y desarrollo del artículo: 70%, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo:90% y aprobación de la versión final a publicar:100%, contribución a la idea: 100% y organización del artículo: 80%, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final:100%.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

