

ALGORITMO PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS DE DIFRACCIÓN EN OBSTÁCULO IRREGULAR GRUESO

Renato Roldán Soler¹, Lányer Pérez Garlobo², José Rafael Sandianes Gálvez³

^{1,2}Instituto Técnico Militar “José Martí”, La Habana, ³Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana

¹e-mail: renatoroldansoler@gmail.com

²e-mail: lanyer1987@gmail.com

³e-mail: sandianes@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

La difracción en obstáculos es el fenómeno físico que predomina en trayectos donde la propagación de ondas de radiofrecuencia ocurre sin visibilidad directa entre el transmisor y el receptor, y es la causa fundamental de las pérdidas básicas de propagación en estos enlaces. Para cuantificar su influencia, en la literatura se presentan varios métodos que varían en cuanto a enfoque y complejidad. Estos, atendiendo a la procedencia de sus algoritmos se dividen en tres categorías: los determinísticos, que se basan en expresiones matemáticas y que producen el mismo resultado bajo condiciones similares; los estadísticos, que se sustentan en amplias campañas de mediciones realizadas bajo disímiles condiciones de recepción y los semiempíricos, que usan una combinación de expresiones matemáticas y factores de corrección de procedencia empírica. Estos últimos intentan resolver algunas deficiencias de los métodos anteriores, y en la actualidad, resultan una solución adecuada al problema abordado. Las soluciones semiempíricas se apoyan en la influencia de la geometría y la cantidad de obstáculos presentes en el trayecto. Los obstáculos reales pueden tener formas muy complejas, lo que justifica el empleo de geometrías aproximadas (filo de cuchillo) que, por lo general, no consideran su grosor, elemento que sin dudas influye en la exactitud del cálculo de la pérdida por difracción. El objetivo de este artículo es presentar un algoritmo que considera el grosor del obstáculo real. Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas demuestran la superioridad del algoritmo en términos de exactitud, con respecto a las soluciones analíticas aproximadas (semiempíricas) propuestas en la literatura especializada.

PALABRAS CLAVE: pérdidas básicas de propagación, difracción en obstáculos, obstáculo grueso, filo de cuchillo.

ALGORITHM TO ESTIMATE DIFFRACTION LOSSES IN THICK IRREGULAR OBSTACLES

ABSTRACT

Diffraction in obstacles is the physical phenomenon that predominates in those paths where the propagation of radiofrequency waves occurs without direct visibility between the transmitter and the receiver, and it is the fundamental cause of the basic propagation losses in these links. To quantify its influence, various methods are presented in the literature that vary in focus and complexity. These, based on the origin of their algorithms, are divided into three categories: the deterministic ones, which are based on mathematical expressions and which produce the same result under similar conditions, can be very exact, but when using integral solutions their computational implementation is extremely complex; The statistics, which are based on extensive measurement campaigns carried out under dissimilar reception conditions, their results implicitly bring a set of factors that consider elements of the environment that cannot be modeled analytically, but their accuracy depends on the similarities between the environment where will be applied and the one where it was validated; and the semi-empirical ones that use a combination of mathematical expressions and correction factors of empirical origin. The latter try to solve some deficiencies of the previous methods and currently are an adequate solution to solve the problem addressed. Semi-empirical solutions rely on the influence of geometry and the number of obstacles present in the path. Real obstacles can have very complex shapes, which justifies the use of approximate geometries (knife-edge) that generally do not consider their thickness, an element that undoubtedly influences the accuracy of the

Manuscrito recibido: 7-8-2023, aceptado: 15-10-2023

Sitio web: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

diffraction loss calculation. The aim of this article is to present an algorithm that considers the actual obstacle thickness during the calculation. The results obtained in the measurements carried out demonstrate the superiority of the algorithm in terms of accuracy, with respect to the approximate (semi-empirical) analytical solutions proposed in the specialized literature.

INDEX TERMS: basic propagation losses, diffraction in obstacles, thick obstacle, knife-edge.

1. INTRODUCCIÓN

Numerosos trayectos de propagación comprenden uno o varios obstáculos separados y resulta de interés calcular las pérdidas que estos introducen. En la literatura especializada se reportan varios métodos que consideran en sus algoritmos la atenuación que sufre la señal de radiofrecuencia a causa de la difracción. Entre los más conocidos destacan los de las recomendaciones UIT-R P.370 [1] y UIT-R P.1546 [2], estos, se presentan en formas de curvas obtenidas a partir de un número considerable de mediciones de intensidad del campo eléctrico en diferentes entornos. Las curvas se hallaron para valores de rugosidad típicos de 50 m y para trayectos con otros valores de rugosidad se propone un factor de corrección de procedencia empírica. Ambos métodos han sido ampliamente empleados, sin embargo, debido al carácter estadístico de su formulación, su exactitud está condicionada fundamentalmente por el grado de semejanza que tengan los entornos donde serán aplicados con aquellos donde estos fueron validados. Con el desarrollo de las tecnologías de la informática y las comunicaciones, han surgido nuevos enfoques basados en la Teoría Geométrica de la Difracción [3, 4, 5], estos, pueden resultar muy exactos, pero su implementación computacional requiere el empleo de técnicas de trazados de rayos [6] y la linealización de los perfiles del terreno, lo que unido a la complejidad de sus algoritmos, provoca un elevado costo computacional. Para intentar resolver las deficiencias de los métodos antes mencionados, la tendencia actual es implementar métodos híbridos [4, 7, 8, 9, 10, 11, 12], en estos se combinan soluciones analíticas aproximadas con factores de corrección de procedencia empírica. En una primera aproximación, en muchas ocasiones, para la valoración de las pérdidas por difracción en obstáculos, se idealiza su forma y se le asemeja a una arista o cuña de espesor despreciable (arista aguda o filo de cuchillo) [4, 13, 14, 15, 16], o con una arista gruesa y redondeada en su cima, con cierto radio de curvatura [4, 7]. La UIT en su recomendación UIT-R P.526 [4] propone varios métodos basados en ambos tipos de geometría, sin embargo, no se brindan criterios prácticos que permitan decidir cuándo un obstáculo real, cuya forma es mucho más compleja, se corresponde más con una geometría u otra. Kalinin [7], por su parte, propone un método que aproxima la geometría del obstáculo al de una esfera, pero no brinda de manera explícita una expresión que permita calcular el radio de curvatura del obstáculo. Conforme a lo anterior, la implementación computacional de ambas geometrías se ve limitada, lo que justifica que en la práctica, la mayoría de los procedimientos actuales, de propósito general, consideran que los obstáculos son filos de cuchillo (pantalla semifinita), aproximación que no siempre se ajusta correctamente a la forma que tienen los obstáculos reales.

El objetivo de este artículo es presentar un nuevo procedimiento para el cálculo de la pérdida por difracción basado en un modelo, con enfoque novedoso, que parte de considerar la influencia del grosor del obstáculo en la pérdida por difracción y, de este modo, facilitar su tratamiento computacional en los cálculos de cobertura.

2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN TRAYECTOS SIN VISIBILIDAD DIRECTA

El canal de radio de un sistema de comunicaciones puede ser de dos tipos: con visibilidad directa (CVD) cuando la señal viaja directamente sin encontrar obstáculos entre el transmisor y el receptor, y sin visibilidad directa (SVD), cuando la propagación de la onda de radiofrecuencia ocurre sin visibilidad directa entre el transmisor y el receptor.

Los resultados obtenidos [17] en el pronóstico de la intensidad del campo eléctrico en trayectos SVD han permitido constatar que el fenómeno físico que predomina durante la propagación es la difracción debido a los obstáculos del terreno, causa fundamental que provoca la ocurrencia de pérdidas de señal en estos

enlaces. Numerosos investigadores [18, 19, 20, 21] han tratado este fenómeno y, aunque los métodos empleados varían en cuanto a enfoque y complejidad, han arribado a resultados similares. Conforme a lo anterior, en [17] se presenta una comparación detallada de los resultados obtenidos mediante los algoritmos empleados para el cálculo de las pérdidas por difracción en obstáculos en: el método de terreno integrado para tierra rugosa (TIREM) [22], el método de propagación estándar (SPM) [23] y el de Longley-Rice [24], en las bandas de ondas métricas y decimétricas, con el objetivo de valorar la exactitud de los mismos. Estos procedimientos han encontrado diversas aplicaciones en los cálculos de cobertura, radioenlaces, etc.

Al examinar los resultados obtenidos en ambas bandas de frecuencia (ver Tablas 1.2 y 1.4 de [17]) se ha constatado que ninguno de los procedimientos analizados cumple con los criterios de exactitud recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) en su recomendación UIT-R SM.1447 [25]. En opinión de los autores, esta problemática se debe fundamentalmente a las aproximaciones que en esos procedimientos se realizan debido a la forma y cantidad de obstáculos seleccionados para realizar el cálculo.

Por lo general, la mayoría de los procedimientos actuales de propósito general consideran que los obstáculos son filos de cuchillo, aproximación que no siempre se ajusta correctamente a la forma que tienen los obstáculos reales. De manera particular, en el TIREM se considera la difracción en múltiples obstáculos y se constata, de forma práctica, una sobreestimación de la pérdida en trayectos muy irregulares (ver Tabla 1 del anexo 7 de [17]). Por otro lado, en el procedimiento de Longley-Rice solo se considera la difracción que ocurre en los obstáculos en el horizonte del transmisor y del receptor, lo que limita el cálculo de las pérdidas con solo dos obstáculos. Los resultados experimentales y las deficiencias expuestas anteriormente, han sido incentivo de obtener un procedimiento más completo al caracterizar la forma y el fenómeno de la difracción en obstáculos reales.

3. TRATAMIENTO DEL OBSTÁCULO GRUESO

Hasta el momento se ha tratado el caso de los obstáculos como aristas en filo de cuchillo o sea sin espesor [1]. En la Fig. 1 se ilustran los parámetros geométricos básicos para el estudio del obstáculo agudo: el despejamiento h , las distancias d_1 y d_2 a los extremos del enlace y el ángulo de difracción θ .

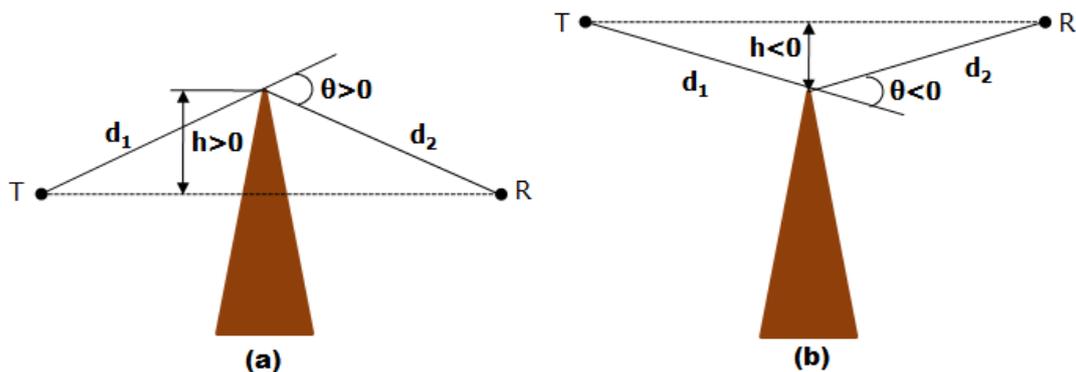


Figura 1: Obstáculo agudo (a) Traza cerrada, (b) Traza abierta, Fuente: [4].

En este caso, extremadamente idealizado, todos los parámetros geométricos se agrupan en un solo parámetro adimensional que normalmente se designa por v y que puede tomar distintas formas equivalentes según los parámetros geométricos elegidos [4]. Es fácil comprobar que v es igual a $\sqrt{2}$ veces el despejamiento normalizado h/R_1 , donde R_1 es el radio de la primera zona de Fresnel. Si se expresa h en m, la distancia del enlace d , d_1 y d_2 en km y la frecuencia del enlace f en MHz, v resulta [26]

$$(1)$$

$$v = 2,58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot d}{d_1 d_2}} \cdot h$$

El cálculo de la atenuación por difracción debido a un obstáculo agudo es un problema clásico de la teoría electromagnética y es resuelto con la aplicación de las integrales de Fresnel.

La atenuación por difracción en dB es [4]

$$L_D(v) = -10 \log \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} - C(v) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} - S(v) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

donde $C(v)$ y $S(v)$ son las integrales de Fresnel de argumento v , dadas por

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (3)$$

$$S(v) = \int_0^v \text{sen}\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (4)$$

Puede evaluarse L_D mediante el desarrollo en serie de $C(v)$ y $S(v)$. Sin embargo, para las aplicaciones usuales de la radiocomunicación, se dispone de curvas o aproximaciones numéricas sencillas como la expresión [4]

$$L_D(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (5)$$

De (5) se deduce, que aplicar la integral de Fresnel durante el acercamiento al obstáculo, resulta equivalente a acercar el frente de onda como si el obstáculo no existiera. Si el obstáculo tiene un espesor D esto no se cumple, pues el observador sólo puede tener a D como distancia mínima entre él y el frente de onda, lo que limita las zonas de Fresnel que actúan sobre el punto. A este tipo de obstáculos se le denomina en lo adelante *obstáculo grueso*.

El obstáculo grueso se define como aquel obstáculo ficticio y de grosor D , compuesto por el conjunto de cotas del terreno que se encuentran comprendidas entre el obstáculo de horizonte del receptor y el punto donde ocurre la intercepción del terreno con la primera zona de Fresnel, en la dirección del transmisor. En la Fig. 2 se representa el concepto de obstáculo grueso en un perfil real.

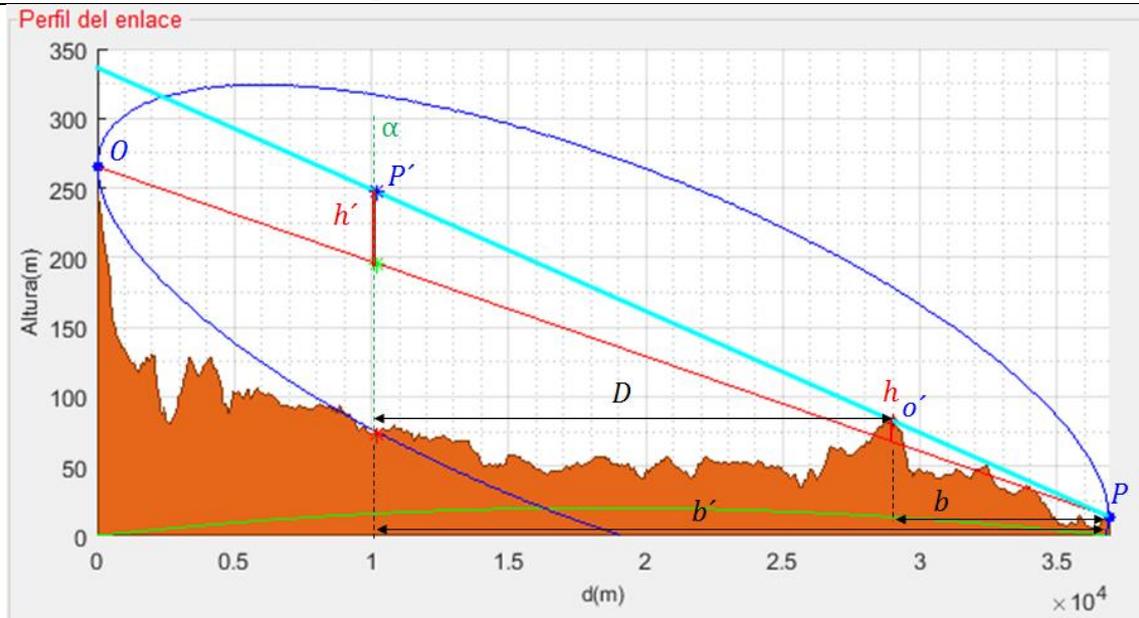


Figura 2: Parámetros geométricos asociados al método obstáculo grueso en un perfil real.

Bajo las consideraciones expuestas, pueden definirse los parámetros de cálculo del modelo teórico del obstáculo grueso sobre la base del modelo mostrado en la Fig. 2, en la que O es el transmisor, fuente de radiación que genera una onda esférica, representada por el frente de onda de radio r_0 . o' es el punto donde se ubica el obstáculo de horizonte el que se encuentra a una distancia b del receptor ubicado en el punto P .

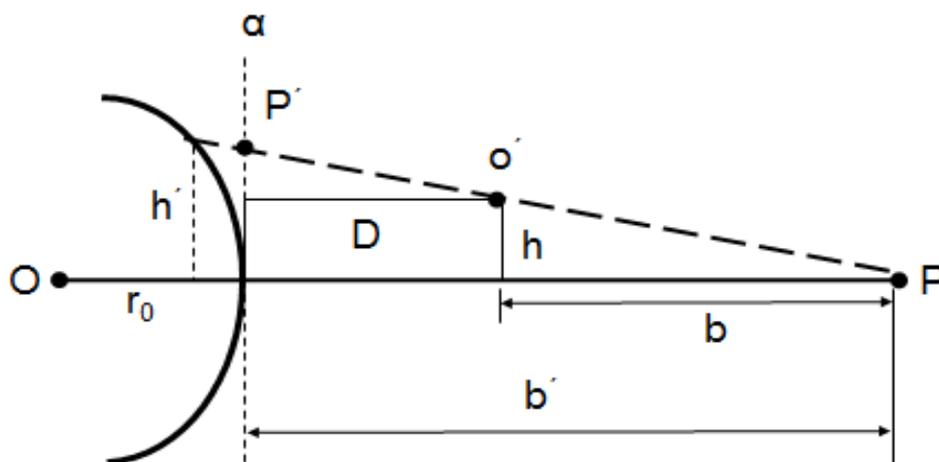


Figura 3: Obstáculo grueso por encima de la línea de vista.

Si se toma el obstáculo de horizonte del receptor o' como una pantalla delgada (arista en filo de cuchillo), la altura del obstáculo por encima de la línea de vista sería h , sin embargo, dado el grosor D del obstáculo existe un rayo límite (señalado en la Fig. 3 como segmento PP') por debajo del cual el frente aportado por el radiador O no actúa sobre P . Esto equivale, en la integral de Fresnel, a considerar un obstáculo de una altura de h' , es decir, el obstáculo grueso de espesor D puede reducirse a uno delgado siempre que se tome h' como altura real.

Como es conocido, en el trabajo con las zonas de Fresnel se consideran estas como proyecciones en el plano tangente al frente de onda y perpendicular a la línea del rayo que se ha denotado en la Fig. 3 como plano α . Por lo tanto, la altura h' viene dada por el punto P' que es la proyección en perspectiva del punto P y o' el centro de proyección, luego

$$\frac{h}{b} = \frac{h'}{b'} \quad (6)$$

donde b es la distancia del punto al obstáculo. Por tanto, la altura equivalente es

$$h' = \frac{b'}{b} h \quad (7)$$

pero

$$b = b' - D \quad (8)$$

y, por tanto

$$h' = \frac{1}{1 - \frac{D}{b'}} \cdot h \quad (9)$$

Si $D = 0$, entonces, es el caso típico de arista de grosor despreciable (arista en filo de cuchillo).

Por tanto, en el caso de obstáculo grueso, como $h' > h$, puede ocurrir que la primera zona de Fresnel quede ocultada si h' es mayor que el radio de la primera zona de Fresnel y el campo en P viene dado por la acción de la zona equivalente. Bajo esta consideración, la pérdida por difracción en dB será calculada por la expresión (5).

$$L_{dif_OG}(v') = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v' - 0,1)^2 + 1} + v' - 0,1 \right)$$

donde L_{dif_OG} es la pérdida por difracción en el obstáculo grueso y v' es el despejamiento normalizado calculado a partir de la expresión (1) para $h = h'$.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados del pronóstico del campo electromagnético al considerar los casos del obstáculo agudo, o filo de cuchillo, y el obstáculo grueso, en el supuesto que existe un solo obstáculo (aislado) en el trayecto de propagación y para las frecuencias de 150 MHz y 856,1375 MHz.

Tabla 1: Resultados de parámetros de control para obstáculo aislado ($f = 150$ MHz).

Modelo	$\overline{\Delta E}$ (dB)	σ (dB)	Cantidad de puntos analizados	Cantidad de puntos donde $\Delta E \leq \pm 4$ dB	% SM 1447
Obstáculo agudo	23,00	6,36	55	0	0
Obstáculo grueso	4,79	4,65		17	31

Tabla 2: Resultados de parámetros de control para obstáculo aislado ($f = 856,1375$ MHz).

Modelo	$\overline{\Delta E}$ (dB)	σ (dB)	Cantidad de puntos analizados	Cantidad de puntos donde $\Delta E \leq \pm 4$ dB	% SM 1447
Obstáculo agudo	26,76	6,18	20	0	0

	22,39	6,24		0	0
--	-------	------	--	---	---

Como se puede observar en las tablas, los resultados son similares para ambos métodos; sin embargo, el error medio del método que considera el obstáculo grueso es de 4,79 dB, menor que el obtenido si el obstáculo es agudo. Conforme a lo anterior, queda demostrada la hipótesis de que considerar el grosor del obstáculo contribuye a la obtención de resultados superiores en términos de exactitud.

Algunos métodos reportados en la literatura consultada [4, 23] una vez calculada la pérdida ocasionada por la difracción en los obstáculos, ajustan los resultados adicionando un factor de corrección dependiente de la distancia. En nuestro caso se ajusta el resultado obtenido con el obstáculo grueso, pero se considera la influencia no sólo de la distancia sino también del parámetro v' .

Para obtener el factor de corrección se ha empleado la herramienta computacional “MATLAB R2016a”. El ajuste se realiza a partir de datos experimentales obtenidos en ambas bandas de frecuencia [27, 28]. Para la validación del método, una vez ajustado, se ha seleccionado un número de trayectos de manera aleatoria dentro de la población (ver anexo 8 de [17]).

El factor de corrección obtenido es una función bidimensional de tercer orden dependiente de los parámetros anteriormente mencionados:

$$C(d, v') = k_1 - k_2 d - k_3 v' + k_4 d^2 + k_5 d v' - k_6 v'^2 - k_7 d^3 + k_8 d^2 v' + k_9 d v'^2 - k_{10} v'^3, \quad (6)$$

en la que los coeficientes k son, a la vez, dependientes de la frecuencia y sus valores se muestran en la Tabla 3 para las dos frecuencias seleccionadas en el ajuste.

Tabla 3: Coeficientes k para las bandas métrica y decimétrica.

Coeficientes k	BM ($f = 150$ MHz)	BDM ($f = 856$ MHz)
k_1	24,6	14,81
k_2	-0,10	-6,29
k_3	-3,81	1,43
k_4	$8,42 \cdot 10^{-3}$	1,61
k_5	-0,41	0,67
k_6	6,05	-6,03
k_7	$-6,92 \cdot 10^{-5}$	-0,07
k_8	$4,9 \cdot 10^{-3}$	-0,03
k_9	0,04	$-3,99 \cdot 10^{-3}$
k_{10}	-1,93	1,03

Una vez obtenido el factor de corrección, la pérdida por difracción se halla a partir de la siguiente expresión

$$L_{dif_OG} = L_{dif_OG}(v') + C(d, v). \quad (7)$$

De este modo, las pérdidas en trayectos SVD son

$$A_{SVD} = L_{EL} + L_{dif_OG}. \quad (8)$$

donde L_{EL} es la pérdida básica de propagación en el espacio libre [26, 29].

$$L_{EL} = 32,45 + 20 \log f + 20 \log d. \quad (9)$$

Con el objetivo de valorar la aplicación del algoritmo de obstáculo grueso a escenarios reales, y validar el mismo, en entornos donde pudiera existir tanto uno como múltiples obstáculos, se realiza un análisis comparativo respecto a métodos de carácter más general, tales como: (Deygout, TIREM, Longley-Rice)

por que incluyen el cálculo de la pérdida por difracción en más de un obstáculo del terreno. En las Figs. 3 y 4 se muestran la PBP calculadas en función de la distancia para cada uno de los métodos analizados. L_bf es la pérdida básica en el espacio libre, L_bmed es la pérdida básica medida, $L_bDeygout$, L_bOH , L_bTIREM , L_bLR y L_bOG son las pérdidas básicas calculadas a partir de los procedimientos de Deygout, Okumura-Hata, Longley-Rice y Obstáculo grueso respectivamente.

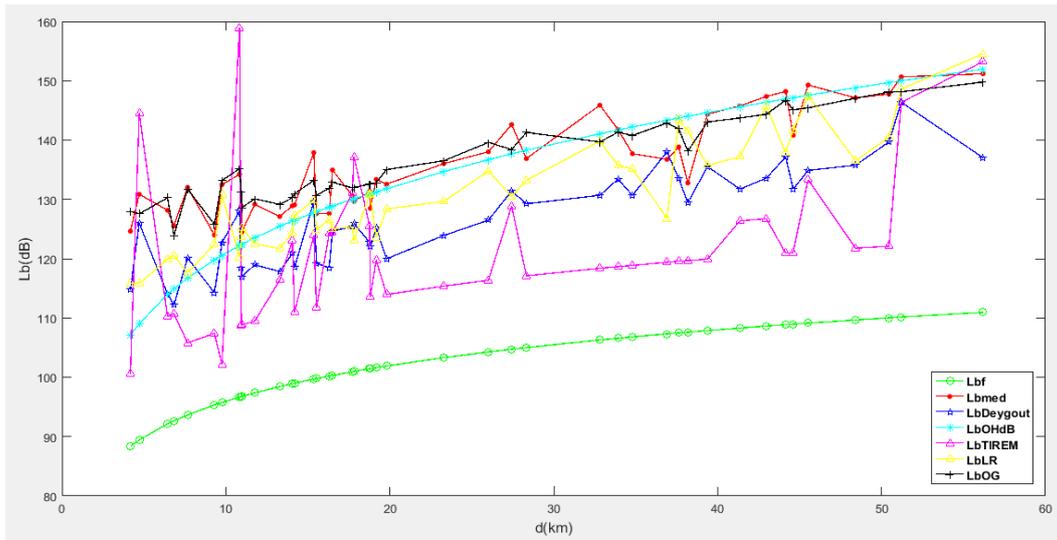


Figura 3: Pérdida básica en función de la distancia a la frecuencia de 150 MHz.

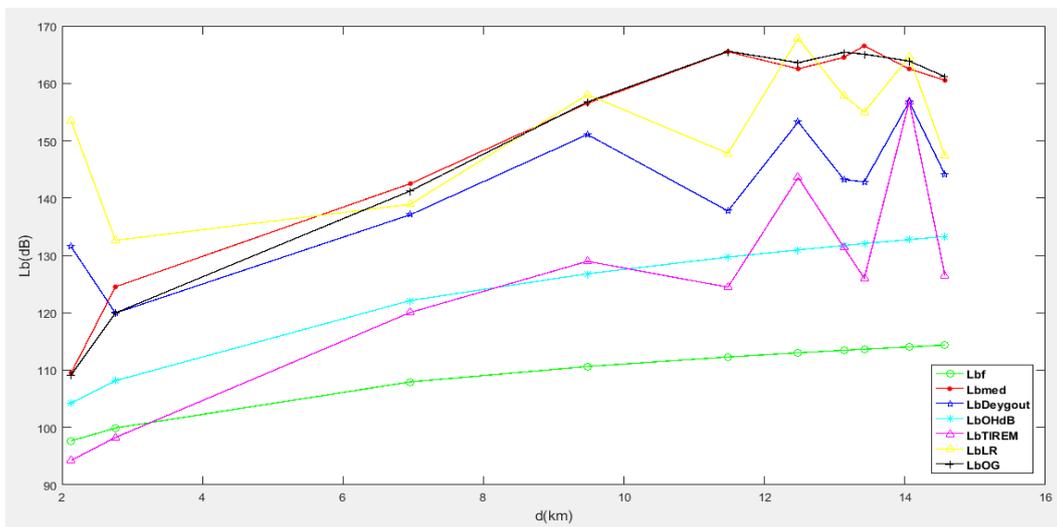


Figura 4: Pérdida básica en función de la distancia a la frecuencia de 856 MHz.

Para valorar la exactitud de los procedimientos analizados en el cálculo de la pérdida básica de propagación al considerar el fenómeno de la difracción se emplean como parámetros de control: el porcentaje de cumplimiento de los criterios establecidos por la UIT en su recomendación UIT-R SM-1447, la media del error de predicción $\overline{\Delta E}$ y la desviación estándar σ .

Tabla 4: Resultados de los parámetros de control en el cálculo de la difracción para $f = 150$ MHz.

No	Método de predicción	f(MHz)	Cantidad de puntos analizados	Cantidad donde $\Delta E \leq \pm 4$ dB	SM.1447 (%)	$\overline{\Delta E}$ (dB)	σ (dB)
1	Epstein-Peterson (Múltiples obstáculos)	150	44	4	9	14,68	11,2
2	Deygout (3 obstáculos)			4	9	9,23	3,43
3	Longley-Rice (2 obstáculos)			17	37	5,02	5,09
4	Obstáculo grueso			40	91	-0,69	2,88

Tabla 5: Resultados de los parámetros de control en el cálculo de la difracción para $f = 856$ MHz.

No	Método de predicción	f(MHz)	Cantidad de puntos analizados	Cantidad donde $\Delta E \leq \pm 4$ dB	SM.1447 (%)	$\overline{\Delta E}$ (dB)	σ (dB)
1	Epstein-Peterson (Múltiples obstáculos)	856	10	0	0	26,49	11,27
2	Deygout (3 obstáculos)			0	0	9,76	14,08
3	Longley-Rice (2 obstáculos)			3	30	-0,82	17,31
4	Obstáculo grueso			9	90	0,33	1,75

Los parámetros de control que demuestran la superioridad en términos de exactitud del modelo obstáculo grueso con respecto al resto de los métodos analizados se relacionan en las Tablas 4 y 5. De ellas se puede concluir que el modelo obstáculo grueso permite determinar la pérdida por difracción que tiene lugar en el obstáculo a partir de la consideración del grosor del mismo. Los resultados de los parámetros de control muestran que para la frecuencia de 150 MHz, de 144 trayectos analizados, el método obstáculo grueso cumple con los criterios de exactitud de la UIT [10] en 40 puntos, lo que representa el 90 % del total de puntos analizados, la media del error es de 0,69 y la desviación estándar de 2,88. Para la frecuencia de 856 MHz los resultados alcanzados son similares, pues para un total de 10 trayectos analizados el método obstáculo grueso cumple con los criterios de exactitud de la UIT en 9, lo que representa el 90 % del total de puntos, con una media del error de 0,33 y una desviación estándar de 1,75.

CONCLUSIONES

El objetivo propuesto ha sido cumplido lo cual se ha demostrado con el cumplimiento satisfactorio de las exigencias presentadas por el órgano regulatorio (UIT) en su Recomendación SM 1447. Esto permite estar en mejores condiciones para el pronóstico más preciso del nivel de campo recibido de las líneas de radio comunicaciones del Servicio Móvil Terrestre, de Radioenlace, radar, etc, en entornos rurales de propagación que son los de aplicación principales de estos métodos.

REFERENCIAS

- [1] Recomendación UIT-R P.370-7 “Curvas de propagación en ondas métricas y decimétricas para la gama de frecuencias comprendidas entre 30 y 1000 MHz. Servicios de radiodifusión”, 1995.
- [2] Recomendación UIT-R P.1546-1 “Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3000 MHz”, 2003.
- [3] Baltazar Zanz, M. V., “Análisis y comparación teórico experimental de la difracción simple y doble sobre una arista conductora en la banda de UHF”, Cartagena, 2017.
- [4] Recomendación UIT-R P.526-19 “Propagación difracción”, 2019.
- [5] Roca Conesa, S., “Caracterización teórico-experimental de la atenuación por propagación producida por un árbol aislado en las bandas UHF y milimétricas”, Cartagena, 2020.
- [6] Chávez Tigrero, M. I., y otros “Diseño e implementación de un método de Ray-Tracing para determinar la influencia de geometría de edificios en un enlace de comunicaciones en la banda de 28 GHz”, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [7] Kalinin A. I., “Propagación de las ondas de radio y trabajo en las radiolíneas”, Editorial Svias, Moscú, 1971.
- [8] Recomendación UIT-R P.1812-5 “Método de predicción de la propagación específico del trayecto para servicios terrenales punto a zona en las bandas de ondas métricas y decimétricas”, 2019.
- [9] Báez Pérez, A. A. y otros, “Enseñanza de sistemas de radiocomunicaciones terrestres con línea de vista mediante software educativo”, Revista Educación en ingeniería. Universidad de Pamplona, Vol. 14, No. 28, pp. 78-87, marzo-julio 2019.
- [10] Herrera Rubio, J., E., “Metodología de medición del espectro con técnicas experimentales para obtener modelos de propagación”, Universidad de Pamplona, Colombia, 2020.
- [11] Camilo Cortés, C. y otros, “Planeación y análisis de cobertura de una red móvil 3G y 4G en la localidad de Chapinero”, septiembre de 2020.
- [12] Bastos Lázaro, D., “Análisis de cobertura de la señal DVT terrestre de los canales públicos en el departamento de Santander”, Tesis de Maestría, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, diciembre de 2021.
- [13] Borrego Jurado, M., J., “Radiolocalización a través de la potencia de las señales de radio”, Proyecto de fin de grado, Universidad de Sevilla, 2020.
- [14] Martínez Gómez, E., “Desarrollo de una herramienta software para el cálculo de cobertura radioeléctrica”, Proyecto de fin de grado, Universidad de Jaén, noviembre de 2022.
- [15] Cabrera Parco, E., I., “Medida y caracterización de la propagación para comunicaciones críticas 5G”, Proyecto de fin de grado, Escuela Técnica superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, julio de 2022.
- [16] Mora Agudo, C., “Herramienta gráfica para la caracterización de pérdidas y cálculo de coberturas en Radioenlaces”, Proyecto de fin de grado, Escuela Técnica superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, julio de 2022.
- [17] Roldán Soler, R. “Método semiempírico para la predicción de la intensidad del campo eléctrico en las bandas de ondas Métricas y Decimétricas”, Tesis de Doctorado, ITM, La Habana, 2022.
- [18] Fresnel, Augustin, J., “Memoir on the diffraction of light”, Annales de Chimie et de Physique, Vol. 1, pp 239-281, March 1816.
- [19] Baker, B. B., y otros, “Mathematical Theory of Huygens Principle”, Oxford, pp 36-40, 1939.
- [20] Huygens, C., “Traite de la Lumiere”, Leyden in 1960.
- [21] Deygout, J., Multiple knife-edge diffraction of microwave, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 14(4), pp 480-489, 1966.
- [22] Hufford, G. A., “ITS Irregular Terrain Model version 1.2.2 The Algorithm”, 1985.
- [23] Anónimo, “9955 RNP 7.2.1 RF Technical Reference Guide”, 3DF 01955 7281 RKZZA ED.02, 2014.
- [24] Longley, A. G. y otros, “Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain”, A Computer Method, ESSA Technical Report, ERL 79-ITS 67, 1968.
- [25] Recomendación UIT-R SM.1447 “Comprobación técnica de la cobertura radioeléctrica de las redes móviles terrestres para verificar su conformidad con una concesión de licencia”.
- [26] Hernando Rábanos, J. M., “Transmisión por Radio”, Centro de estudio Ramón Areces, S.A, 2013.

- [27] Sandianes Gálvez, J. R. y otros. “Sistema computarizado de análisis de las comunicaciones por radio”, Informe anual al premio de la Academia de Ciencias de Cuba, La Habana, 1999.
- [28] Roque Franco, A., “Análisis de cobertura de sistemas de radio móviles terrestres”, Tesis de Maestría, ISPJAE, La Habana, 2004.
- [29] Recomendación UIT-R P.525-4 “Cálculo de la atenuación en el espacio libre”, 2019.

SOBRE LOS AUTORES

• Renato Roldán Soler

Graduado de Ingeniero Radioelectrónico en Comunicaciones, en el Instituto Técnico Militar José Martí orden “Antonio Maceo”, orden “Carlos Juan Finlay” en el año 2009 y de Doctor en Ciencias Técnicas (ITM) en el 2022. Es Especialista en Aseguramiento Técnico de los Equipos y Sistemas de Comunicaciones y posee la categoría docente de Profesor Auxiliar. Actualmente es profesor del ITM “José Martí” y miembro de su Consejo Científico. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica y la Propagación de las Ondas de Radio. Ha presentado trabajos en eventos nacionales e internacionales. Ha recibido reconocimientos por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la Radiopropagación. ORCID: 0009-0000-8720-4310

• Lányer Pérez Garlobo:

Graduado como Ingeniero Radioelectrónico en Comunicaciones en el año 2002, y de Doctor en Ciencias Técnicas (ITM) en el 2010. En la actualidad es Profesor Titular desde el 2015 y Profesor e Investigador del ITM, Miembro de su Consejo Científico y de la Comisión de Grados Científicos. Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica y la Propagación de las Ondas de Radio. Ha presentado trabajos en eventos nacionales e internacionales, participando en varias ediciones de CITTEL. Ha alcanzado premios a nivel nacional y ramal por resultados de investigaciones aplicadas a la rama de la Radiopropagación. ORCID: 0000-0001-7911-7807.

• José R. Sandianes Gálvez:

Graduado de Ingeniero Eléctrico en Telecomunicaciones en la UH en 1969 y de Doctor en Ciencias Técnicas en el Instituto Técnico Militar “Jose Martí” (ITM) en 1985. Profesor Titular en el ITM desde 1982 y en la actualidad en la Universidad Tecnológica de La Habana (UTH). Se desenvuelve en el campo de la Electrodinámica, la Propagación de las Ondas de Radio y las Antenas. Ha contribuido con diferentes trabajos en proyectos y análisis en estas ramas, en diferentes instituciones ramales y nacionales del país. Ha sido miembro de: los Consejos Científicos del ITM y del MINFAR en diferentes períodos y de la Comisión de Grados Científicos y los Tribunales de Categorías Docente Principales en el ITM. En el año 2000 se le confirió la “Distinción Especial del Ministro de Educación Superior a los Profesores Destacados en las Investigaciones Científicas”. Ha participado y expuesto trabajos en varios eventos nacionales e internacionales como: Fóruns de Ciencia y Técnica Nacionales y Ramales, donde ha obtenido diversos premios; Informática 2005 y varias ediciones de CITTEL. Obtuvo el Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba en 1999. ORCID: 0000- 0003-1391-1236.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses entre los autores, ni con ninguna institución a la que cada uno está afiliado u otra institución. Las opiniones expresadas aquí son únicamente responsabilidad de los autores.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Renato Roldán Soler: Su principal contribución consiste en la conceptualización y el desarrollo matemático previo a la propuesta presentada y el procedimiento a seguir durante la simulación. Ha realizado la revisión bibliográfica, el análisis e interpretación de los resultados obtenidos y la redacción de la presentación del artículo.

Lányer Pérez Garlobo: Su principal contribución radica en los programas y datos empírico-experimentales más actualizados que sirvieron de base para la elaboración del artículo. Además, ha

contribuido al mismo con su experiencia en la Propagación de Ondas de Radio lo que influyó en la revisión crítica de su primera versión y la aprobación de la versión final.

José R. Sandianes Gálvez: Su principal contribución consiste en participar en la conceptualización e idea del artículo, revisión crítica de la escritura y desarrollo de cada una de las versiones del borrador y la conformación de la versión final a publicar después de su análisis con los otros autores.

