

Predicción de pérdidas de propagación para sistemas de Televisión Digital Terrestre

Prediction of propagation losses for terrestrial Digital Television System

Enrique Ismael Delgado Cuadro^{1,*}; Joffre Vicente León Acurio^{1,+};
Luis Isaías Bastidas Zambrano^{1,§}; Cristhian Augusto Solórzano Moreno^{1,++};

¹Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador.

{edelgado@utb.edu.ec; jvleon@utb.edu.ec;

lbastidas@utb.edu.ec; csolorzano@utb.edu.ec}

Fecha de recepción: 2 de diciembre de 2019 — **Fecha de aceptación:** 29 de diciembre de 2019

Resumen: Este trabajo es una revisión de los diferentes modelos de predicción de pérdidas de propagación para sistemas de televisión digital terrestre (TDT), tanto para transmisión de datos, audio y video. Dicha revisión es de suma importancia dentro del diseño y montaje de infraestructura de redes de Telecomunicaciones para su planificación y dimensionamiento (PyD), la cual es indispensable antes de construir una red y no caer en el subdimensionamiento ni sobredimensionamiento de equipos e infraestructura. Dentro de esta investigación se comparará los diferentes modelos de medición y se concluirá el de mejor rendimiento en base al RMSE (Root Mean Square Error) para la predicción de pérdidas de propagación en los sistemas antes mencionados..

Palabras clave — Propagación, Pérdidas, Televisión Digital Terrestre.

Abstract: This work is a review of the different propagation loss prediction models for terrestrial digital television system, for both data, audio and video transmission. This review is of the utmost importance in the design and assembly of telecommunications network infrastructure for planning and sizing (P & S), which is essential before building a network and not falling into the undersizing or oversizing of equipment and infrastructure. This research will compare the different measurement models and will conclude the best performance based on the RMSE (Root Mean Square Error) for the prediction of propagation losses in the aforementioned systems.

Keywords — Propagation, Losses, Terrestrial Digital Television.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT), también conocidos como sistemas TDA (Televisión Digital Abierta), hoy por hoy son una de las principales alternativas tecnológicas para la verdadera inclusión social y democratización de la información. Ello en virtud de que el televisor, equipo receptor de la TDT o TDA, es el aparato electrónico que mayor porcentaje de penetración (número de televisores por cada 100 habitantes) tiene a nivel mundial, de acuerdo a cifras de la ITU (*International Telecommunication Union*) [1]. Por tanto, tomando en cuenta que para que un televisor

*Magíster en Telecomunicaciones.

+Magíster en Informática Empresarial.

§Magíster en Informática Empresarial.

++Magíster en Conectividad y Redes de Ordenadores.

tradicional reciba adecuadamente la señal de TDT se requiere solamente un decodificador (STB, *Set-Top Box*), las ventajas de los sistemas TDT quedan a disposición de esa enorme cantidad de usuarios.

Entre las ventajas que presenta la TDT sobre su homóloga analógica tradicional, se tiene [2]: significativa mejora en la calidad del video y audio, con la posibilidad de implementar resolución de alta definición (HD = *High Definition*), superior a la de los DVDs (*Digital Versatile Disc*) y CD (*Compact Disc*); b) aumento del número de canales de TV disponibles (se puedan alojar varios canales de TV en mismo canal de radiofrecuencia); c) transmisión simultánea de programaciones con diferentes contenidos y/o resolución, por parte de una misma operadora de TV; d) recepción en ambientes de movilidad (hasta 350 km/h); e) interactividad, (con acceso, incluso, a Internet), entre otras.

Ahora bien, para poder contar con todas esas ventajas señaladas de los sistemas TDT es necesario, entre otros aspectos, garantizar una adecuada planificación y dimensionamiento (PyD) de los mismos, etapa previa al proceso de implantación física del sistema como tal. El proceso de PyD permite estimar requerimientos tales como la distancia de cobertura para un determinado transmisor, nivel de interferencia que podrá estar presente en el sistema, antenas que pueden ser utilizadas, entre otros. Para dicha estimación, es necesario cumplir ciertos criterios relacionados, por ejemplo, con el nivel de potencia a la entrada del receptor, pérdida máxima permitida para la señal, distancia de cobertura deseada, etc., de acuerdo a los estándares de calidad del sistema establecidos por los entes reguladores.

De los requerimientos señalados en el párrafo anterior, uno de los más importantes es el de la predicción de la cobertura, el cual, en el caso específico de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, como el sistema TDT, centra su precisión principalmente en la acertada selección del modelo de propagación, en la medida que el modelo en cuestión compagine o no con las características de propagación propias de la localidad en la cual se planifique y dimensione el sistema. Un modelo de propagación que no cumpla con ese requerimiento producirá un sobredimensionamiento o subdimensionamiento en la estimación de las pérdidas de propagación del sistema. El primero redundará en una inversión económica adicional innecesaria por parte del operador (en términos de equipos), en tanto que el segundo resultará en insatisfacción para los usuarios (en términos de la cobertura del sistema) [2].

En el caso específico de los sistemas TDT, en la literatura existen algunos modelos de propagación para la estimación de las pérdidas de propagación en dichos sistemas, siendo tal vez los más resaltantes el modelo de Okumura-Hata y los modelos contenidos en las Recomendaciones ITU-R P.1546-5 [3] e ITU-R P.1812-3 [4].

Por tal motivo dentro de esta investigación se realiza la comparación para determinar cuál de los modelos antes mencionados me da el menor margen de error entre la literatura y las medidas reales, para lo cual utilizamos la métrica estadística del RMSE para dicha comparación.

DESARROLLO

Arquitectura de los sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT)

La arquitectura de un sistema TDT es similar a la de un sistema de TV analógica y por lo general suele ser como la mostrada en la Figura 1 [5, 6]. Está conformada principalmente por una cabecera o centro de gestión de contenidos, el telepuerto o centro de transmisión o difusión, centros transmisores y retransmisores locales y el subsistema receptor, el cual a su vez consta de las antenas de recepción, el decodificador, mejor conocido como STB (*Set-Top Box*), externo o integrado y las unidades de usuario propiamente dichas (televisor, celular, tabletas, etc.).

La cabecera entrega a la red del sistema de TDT la señal de video, audio y datos, ya procesada, a ser transmitida a los usuarios del servicio de TV. Dicha cabecera está conformada básicamente por el centro de producción del contenido (que puede ser producción propia o proveniente de otras fuentes) y el centro de transmisión o difusión como tal de esa señal de video, audio y datos.

Los mencionados centros de producción y de transmisión de la señal pueden estar ubicados en un mismo espacio físico, como por ejemplo, en el caso de las operadoras de TV que emiten su señal directamente hasta los usuarios, sin o con retransmisores; pero también pueden estar ubicados en espacios físicos separados, es decir, los centros de producción de contenido se encuentran en las localidades físicas de las operadoras de TV, mientras que el centro de transmisión, también conocidos como telepuertos, puede estar físicamente localizado en instalaciones que sirvan a una o más operadoras para dicha difusión.

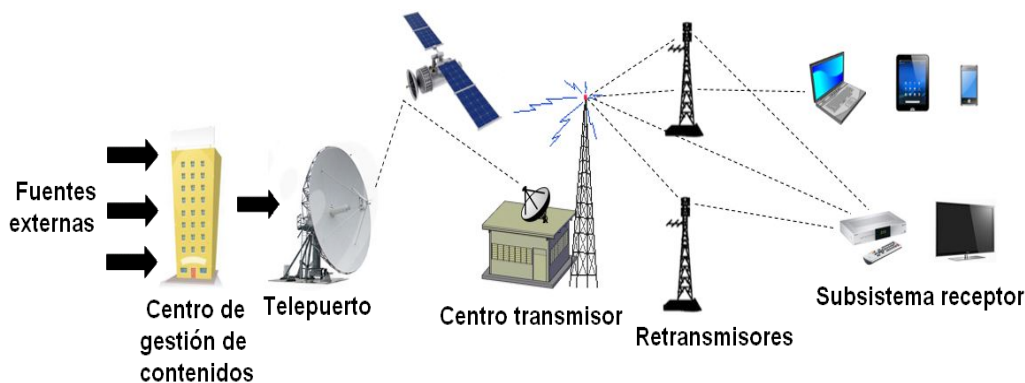


Figura 1. Arquitectura básica de un sistema TDT

Es importante resaltar que la programación que se transmite al usuario puede ser generada en el centro de producción o en parte o su totalidad fuera del mismo, en ambos casos, mediante cámaras digitales o tradicionales. Si las señales de audio y video son provenientes desde lugares externos al centro de producción, las mismas son transmitidas al centro a través de sistemas de telecomunicaciones tales como radioenlaces fijos (enlaces de microondas), enlaces satelitales o enlaces de fibra óptica.

En cualquier de los casos, es decir, programación generada en su totalidad o no en el centro de producción, en éste tienen lugar los procesos del procesamiento digital de la señal, tales como compresión, multiplexación de los diferentes flujos (incluyendo el de datos, logos, marcas, etc.), re-multiplexado, codificación de canal, inserción de bytes de corrección y detección de errores. El flujo resultante se transmite al centro de difusión o telepuerto, a través de enlaces de microondas y/o enlaces de fibras ópticas.

En el centro de transmisión la señal provenientes del centro de producción de contenido se demodula para que en el transmisor como tal sea sometido al proceso OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) o COFDM (*Code OFDM*) y seguidamente al filtrado, amplificación y envío a las antenas de transmisión.

Conforme fue mencionado anteriormente, la señal proveniente desde el centro de difusión o telepuerto puede ser transmitida directamente al usuario a través de retransmisores locales (ver Figura 2) o ser retransmitida a un satélite de comunicaciones, para de esa manera poder transportar dicha señal hasta otras regiones de un país y desde allí, mediante centros transmisores y/o retransmisores locales, brindar señal a los usuarios, tal como muestra la Figura 3.

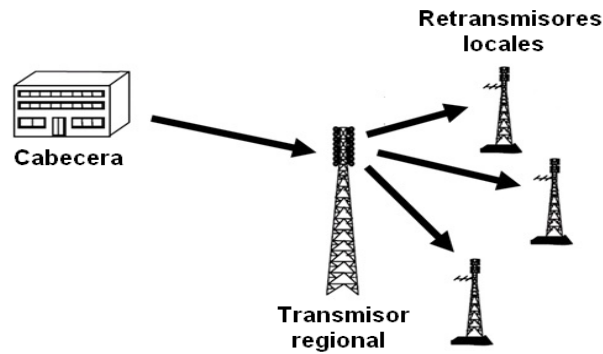


Figura 2. Red de transmisión de la señal TDT sin auxilio de satélite

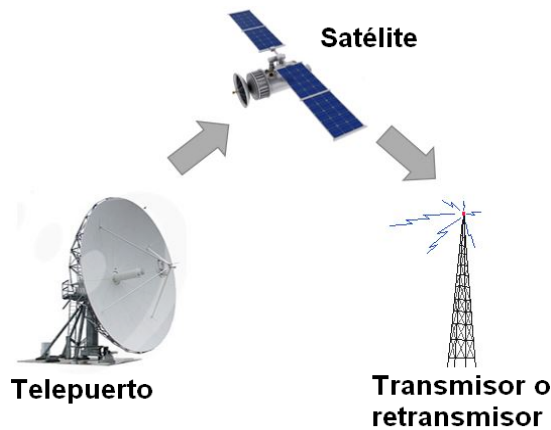


Figura 3. Retransmisión de la señal TDT a través de satélite

Desde los retransmisores locales la señal se transporta, siempre de manera inalámbrica, hasta el subsistema receptor conformado, tal como ya fue mencionado, por:

- Las antenas de recepción, que pueden de exteriores (generalmente colocadas en las azoteas de las casas o edificios) o de interiores (localizadas directamente en el interior de las residencias, oficinas comerciales, etc.).
- El decodificador o STB (*Set-Top Box*), que puede ser externo o estar incorporado internamente en el televisor.
- Las unidades de usuario, es decir, televisor, computador, celular, tabletas y otros

Es oportuno destacar que se cuenta también con subsistemas receptores de TDT integrados en unidades similares a los *pendrive* para computadoras. En este caso, en dicha unidad se encuentra la antena receptora (visible o no), el decodificador y la interfaz con el computador. En la Figura 4, se muestra un receptor de TDT como el mencionado [7].



Figura 4. Receptor de TDT

Principales aspectos de propagación para sistemas inalámbricos

Debido a las bandas de frecuencia en las que operan los sistemas inalámbricos, es decir, VHF (*Very High Frequency*) y, más frecuentemente, UHF (*Ultra High Frequency*), la onda electromagnética que se propaga desde los transmisores o retransmisores locales hasta el subsistema receptor, se ve sometida a [2, 8]:

- La atenuación que sufre toda señal con la frecuencia de operación y la distancia entre el transmisor y receptor.
- Los mecanismos de refracción, reflexión, difracción y dispersión.

La refracción es la desviación que sufre la onda electromagnética cuando la misma atraviesa medios con diferentes índices de refracción, tal como ocurre en la propagación troposférica, que es la que tiene lugar en los sistemas inalámbricos.

Por su parte, la reflexión se refiere al fenómeno producido cuando una onda electromagnética incide sobre un medio eléctricamente diferente, por lo que una porción de la energía asociada a la onda es reflejada hacia el medio inicial, en otra dirección diferente a la de incidencia.

A su vez, la difracción está asociada a la redistribución que sufre la energía de la onda en varias direcciones cuando ésta pasa “rodeando” o “eléctricamente muy próxima” a un obstáculo.

Finalmente, la dispersión es similar a la difracción, pero tiene lugar cuando dicha onda se consigue en su trayectoria a un obstáculo cuyas dimensiones son comparables a la longitud de onda de la onda.

Múltiple trayectoria

El efecto de al menos uno de los mecanismos de propagación señalados en la sección anterior, hace con que la señal recibida por la antena receptora de un sistema inalámbrico sea, en realidad, la suma vectorial de las distintas versiones de la señal que arriban a la antena desde diversas direcciones. Este fenómeno es el conocido como múltiple trayectoria, ilustrado en la Figura 5.

La magnitud y fase con la que arriba cada versión de la señal al receptor es aleatoria, por lo que para fines de planificación y dimensionamiento de un sistema de telecomunicaciones sujeto a la múltiple trayectoria, se recurre a distribuciones estadísticas que tienden a representar el canal. Específicamente, cuando se trata de un canal de radio con múltiple trayectoria, se producen rápidas fluctuaciones sobre el nivel de señal recibido, por lo que la distribución estadística que mejor representa a dicho canal es la de Rayleigh [9], debido a que no hay ni línea de vista entre transmisor y receptor.

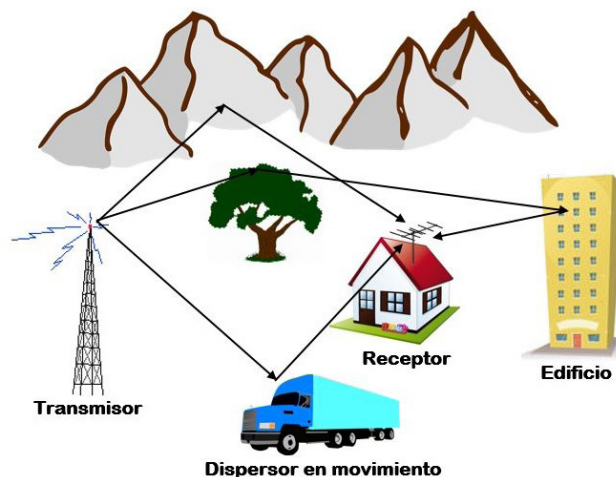


Figura 5. Propagación por múltiple trayectoria

Desvanecimiento

Debido a que la suma de las señales que alcanzan a la antena receptora es aleatoria, el efecto de la múltiple trayectoria en el nivel de campo eléctrico o nivel de potencia en el receptor puede ser constructivo o destructivo; en este último caso, la señal recibida sufrirá desvanecimientos (*fading*) de pequeña escala (cortas duración) que puede ser de gran profundidad, ocasionando que el sistema quede fuera de operación durante los intervalos de tiempo en los que tienen lugar dicho desvanecimiento. En las Figura 6 y 7, se puede observar el efecto de la propagación por trayectoria múltiple en el nivel de señal recibido en un sistema de telecomunicaciones [10, 11].

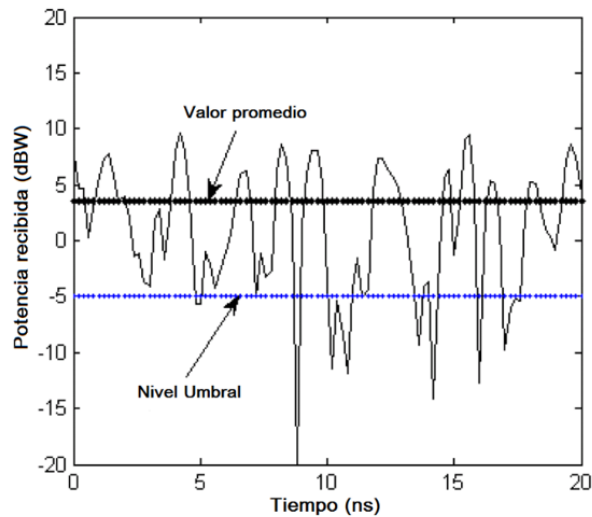


Figura 6. Efecto de la propagación por múltiple trayectoria, en el nivel de potencia recibida.

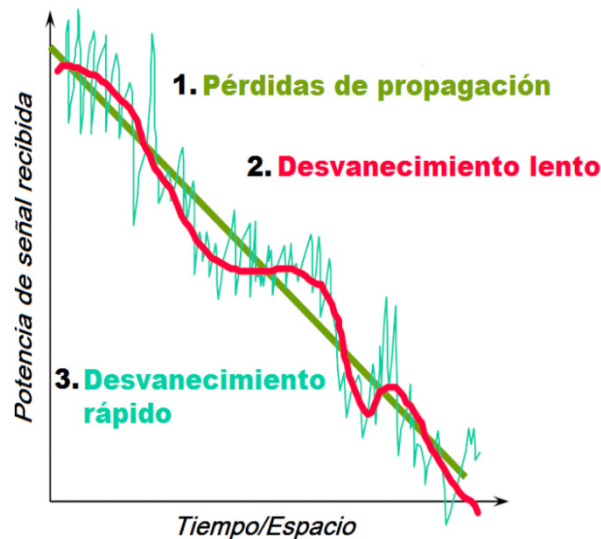


Figura 7. Variación en el nivel de potencia recibida, debido a las diferentes fuentes de desvanecimiento

Retardo de propagación

Cada versión de la señal que arriba a la antena del subsistema receptor sigue un camino diferente, recorriendo distancias también diferentes entre el transmisor y el receptor, lo que provoca que cada versión de la señal alcance a la mencionada antena en instantes de tiempo diferente, es decir, llegan con retardos en relación a la primera que haga el arribo.

Por ello, la señal en el receptor en realidad estará conformada por un conjunto de señales dispersos en el tiempo, tal como se muestra en la Figura 8 [10].

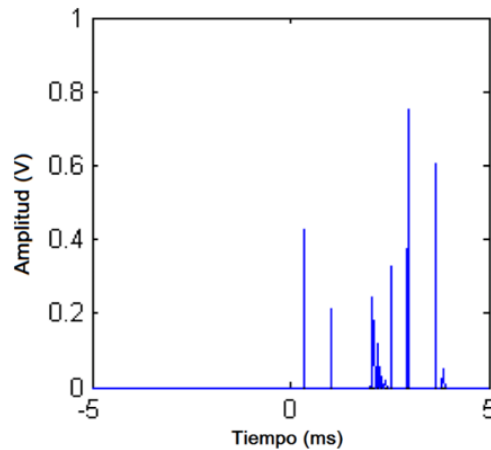


Figura 8. Señal recibida en un canal de múltiple trayectoria.

Si la mencionada dispersión, conocida como *delay spread*, es mayor que la duración del símbolo (relacionado con la velocidad de transmisión del sistema), se produce interferencia intersimbólica (ISI, *Intersymbol Interference*), lo que trae como consecuencia un deterioro en el BER (*Bit Error Rate*) a la entrada del receptor que pudiera ser mayor al máximo permitido, causando interrupción de la comunicación.

Ahora bien, la técnica COFDM, utilizada en sistemas TDT y muchos otros sistemas inalámbricos, e incluso sistemas de telecomunicaciones cableados, tiene como principal objetivo combatir el desvanecimiento por múltiple trayectoria, así como la ISI (*Intersymbol Interference*), mediante la división de la portadora en varias subportadoras de banda estrecha, transmitidas de manera simultánea (con lo cual se incrementa la duración del símbolo), así como con la adición de un código convolucional en las subportadoras y un bloque de entrelazado (*interleaving*) de bits [12, 13].

Por otra parte, el retardo de la propagación en sistemas TDT también es empleado para determinar el intervalo de guarda necesario para ayudar a combatir la ISI, de manera tal que las versiones de la señal que lleguen con retardos mayores lo hagan dentro del intervalo de guarda, durante el cual no se transmite información útil [11].

Modelos de propagación usados en sistemas inalámbricos

Tal como se mencionó anteriormente, existen diversos modelos en la literatura que pueden ser utilizados para la estimación de las pérdidas de propagación en sistemas de Televisión Digital Terrestre (TDT). No obstante, entre los más utilizados están:

- Okumura-Hata.
- Recomendación ITU-T 1546-5.
- Recomendación ITU-T 1812-3.

Okumura-Hata

El modelo de Okumura-Hata [2, 14] permite predecir el valor de la pérdida de propagación para las siguientes condiciones:

- Rango de frecuencia (f): 150 MHz a 1500 MHz.
- Altura de la antena transmisora o estación base (h_t): 30 m - 200 m.

- Altura de la antena receptora o estación móvil (h_2): 1 m - 10 m.
- Distancia transmisor al receptor (d): 1 km a 20 km.

Por otra parte, los entornos o ambientes de aplicación del modelo Okumura-Hata son:

- Áreas urbanas:
 - Ciudades grandes.
 - Ciudades pequeñas o medianas.
- Áreas suburbanas.
- Áreas rurales.

El valor medio de la pérdida básica de propagación, L_b , se obtiene mediante [2, 14]:

$$L_b(\text{dB}) = A + B \log(d) + C \quad (4.1)$$

Donde:

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2) \quad (4.2)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_2) \quad (4.3)$$

Donde $a(h_2)$ es un factor de corrección dependiente de la altura de la antena receptora o estación móvil y del tipo de área de servicio; mientras que C depende de la frecuencia y del ambiente de aplicación, según:

Áreas urbanas

Ciudades grandes:

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54h_2)]^2 - 1,1 & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(11,57h_2)]^2 - 4,97 & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$C = 0$$

Ciudades medianas o pequeñas:

$$a(h_2) = [1,1 \log(f) - 0,7]h_2 - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (4.5)$$

$$C = 0$$

Áreas suburbanas:

$$C = -2[\log(\frac{f}{28})]^2 - 5,4 \quad (4.6)$$

Áreas rurales o abiertas:

$$C = -4,78[\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,98 \quad (4.7)$$

Es importante resaltar que para áreas suburbanas y rurales, el valor de $a(h_2)$ se determina igual que para el caso de ciudades medianas y pequeñas de acuerdo a la expresión (4.5). Cabe resaltar que, en las expresiones (4.1) hasta (4.7), “d” está en km, “f” en MHz, mientras que h_1 y h_2 son dadas en metros.

Una variación del modelo, conocida como Modelo COST231-Hata o Modelo Hata Extendido, permite ampliar el rango de frecuencias de aplicación del modelo Okumura-Hata de 1500 MHz a 2000 MHz, mediante la siguiente definición para los parámetros A y B de la expresión (4.1) [2, 14]:

$$A = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_1) - a(h_2) + C_M \quad (4.8)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_2) \quad (4.9)$$

Donde $a(h_2)$ se calcula con las mismas expresiones (4.4) a (4.7), según el entorno de aplicación y la frecuencia de operación; C_M igual a 0 dB en ciudades medianas y pequeñas y C_M igual a 3 dB en ciudades grandes.

Recomendación ITU-R P.1546-5

Se trata de un método para la predicción de la intensidad de campo eléctrico en sistemas punto-área, especialmente en los servicios de radiodifusión móvil terrestre y móvil marítimo, así como determinados servicios fijos (por ejemplo, los que emplean sistemas punto a multipunto), en la banda de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz y para distancias entre transmisor y receptor entre 1 km y 1000 km [2, 3].

En general, el modelo consiste en la interpolación de valores de intensidad de campo eléctrico, obtenidos a partir de curvas que representan la intensidad de campo eléctrico para una potencia radiada aparente (p.r.a.) de 1 kW en función de parámetros como la altura de la antena transmisora, para los valores nominales de frecuencia de 100 MHz, 600 MHz y 2000 MHz y para porcentajes de tiempo, también nominales, de 1%, 10% y 50%.

El procedimiento o algoritmo completo para la estimación del campo eléctrico en un determinado punto localizado a cierta distancia del transmisor, es bastante minucioso y aparece en la Recomendación ITU-R P.1546-5 [3]. Un resumen de los detalles de dicho algoritmo es encontrado en el trabajo de grado de maestría de Uzcátegui [2].

En todo caso, la pérdida de propagación estimada mediante la Recomendación ITU-R P.1546-5, se puede determinar a partir de:

$$L(\text{dB}) = 139,3 - E + 20 \log(f) \quad (4.10)$$

Donde “E” corresponde al valor de intensidad de campo eléctrico (dB μ V/m) estimado por Recomendación ITU-R P.1546-5 (con las correspondientes correcciones a las que haya lugar según lo establecido por el método) y “f” es la frecuencia en MHz.

Recomendación ITU-R P.1218-3

El modelo permite predecir la intensidad del campo eléctrico excedida durante un determinado porcentaje de tiempo (p%) de un año promedio, en el rango de $1\% \leq p \leq 50\%$ y un porcentaje de las ubicaciones ($p_L\%$), en el rango de $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Se aplica a sistemas terrestres de comunicaciones punto-área, operando en la gama de frecuencias de 30 MHz a 3000 MHz, con trayectos desde 250 m hasta 3000 km y con receptores ubicados hasta 3 km de altura sobre la superficie terrestre [2, 4].

La Recomendación ITU-R P.1812-3, que en realidad es considerada un complemento a la Recomendación ITU-R- P.1546-5, implica en términos generales [2, 4]:

- Cálculo de las pérdidas de transmisión básicas no excedidas durante el p (%) del tiempo.
- Cálculo de los efectos de variabilidad de la ubicación del receptor y penetración en edificios.
- Conversión de la intensidad de campo eléctrico a potencia radiada aparente (p.r.a.).

El procedimiento para la estimación de la intensidad de campo eléctrico descrito en la Recomendación ITU-R P.1812-3 se realiza en un trayecto específico; por tanto, la predicción punto-área consiste en un conjunto de predicciones punto a punto en el área de interés. Por ello, desde un punto de vista práctico, la aplicación del modelo en cuestión requiere contar con una base de datos digital de las elevaciones del terreno en la zona de interés, lo cual hace del modelo mencionado un método más preciso para la predicción de las pérdidas de propagación que el de la Recomendación ITU-R P.1546-5.

Los factores o elementos que considera el modelo para la estimación de la intensidad de campo eléctrico son [2, 4]:

- Visibilidad directa o LOS.
- Difracción.
- Dispersión troposférica.
- Propagación por ductos, reflexión, etc.
- Variación por la ocupación del terreno y la ubicación del receptor.
- Penetración en edificios.

El algoritmo para la predicción de las pérdidas de propagación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812.-3 es incluso más minucioso que el de la Recomendación ITU-R P.1546-5. Por tanto, en este trabajo no se detalla el mismo. Sin embargo, dicho algoritmo aparece de forma completa en la Recomendación ITU-R P.1812.-3 [4], mientras que un resumen de ese algoritmo se encuentra en el trabajo de grado de maestría de Uzcátegui [2].

Finalmente, en caso de ser requerido, se puede determinar, a partir del valor de pérdidas L_b , el valor de intensidad de campo eléctrico para una potencia radiada aparente (p.r.a) de 1 kW, según:

$$E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad (4.11)$$

Comparación de modelos

En este caso, las mediciones ha ser tomadas en cuenta son las correspondientes al nivel del campo eléctrico recibido en diversos puntos del distrito Metropolitano de Quito, realizadas con los estándares ISDB-T (original japonés), ISDB-Tb (versión modificada en Brasil de ISDB-T), con motivo de las pruebas de campo que se llevaron a cabo en la mencionada localidad durante el año 2010, por parte de la entonces Superintendencia de Telecomunicaciones (SUPERTEL) del Ecuador, en el marco del proceso que conllevó a la adopción del estándar de Televisión Digital Terrestre (TDT) en el país.

Características técnicas de los equipos utilizados en las mediciones

Para los tres modelos que se compararán se han utilizado las características técnicas expresadas en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de transmisión

Parámetros	Valores
Frecuencia de operación, f (MHz)	671 (canal 47 UHF)
Potencia de transmisión, P_T (W)	500
Ganancia de la antena transmisora, G_T (dBd / dBi)	11,0 dBd / 13,15 dBi
Altura del centro de radiación sobre el nivel del suelo (m)	30
Pérdida del alimentador/conectores, L_T (dB)	1,5

Tabla 2. Puntos de medición

Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)
1	-0,103806	-78,512667	31	-0,123417	-78,471750	59	-0,208722	-78,519083
2	-0,122500	-78,512944	32	-0,172528	-78,482111	60	-0,234972	-78,524194
3	-0,083806	-78,507889	33	-0,174667	-78,497028	61	-0,241417	-78,528472
4	-0,128806	-78,511333	34	-0,184500	-78,483056	62	-0,259583	-78,522944
5	-0,111556	-78,507222	35	-0,189722	-78,469222	63	-0,272750	-78,528583
6	-0,128500	-78,503750	36	-0,196778	-78,440472	64	-0,280833	-78,526833
7	-0,114500	-78,493278	37	-0,200889	-78,462972	65	-0,244639	-78,539306
8	-0,094167	-78,482778	38	-0,211778	-78,404806	66	-0,257917	-78,542417
9	-0,094167	-78,478500	39	-0,185083	-78,498889	67	-0,272333	-78,543194
10	-0,051444	-78,457111	40	-0,191222	-78,486944	68	-0,286639	-78,545639
11	-0,033722	-78,453500	41	-0,180028	-78,516139	69	-0,257194	-78,553861
12	-0,131639	-78,499380	42	-0,186361	-78,502222	70	-0,271694	-78,558000
13	-0,118583	-78,487417	44	-0,210167	-78,482389	71	-0,297444	-78,565139
14	-0,102556	-78,473944	45	-0,189028	-78,505667	72	-0,220306	-78,512000
15	-0,120667	-78,450333	46	-0,199361	-78,497750	73	-0,185167	-78,486556
16	-0,140139	-78,493917	47	-0,219111	-78,483833	74	-0,195639	-78,492806
17	-0,126472	-78,477000	48	-0,192889	-78,511361	75	-0,308972	-78,453222
18	-0,117306	-78,457028	49	-0,204444	-78,506500	76	-0,306583	-78,449167
19	-0,103944	-78,445889	50	-0,219750	-78,499694	77	-0,291861	-78,477444
20	-0,080556	-78,418194	51	-0,232972	-78,486667	78	-0,223194	-78,489194
23	-0,116056	-78,436778	52	-0,210111	-78,509944	79	-0,004083	-78,452333
24	-0,151972	-78,488694	53	-0,223806	-78,505250	80	-0,325306	-78,520222
26	-0,159472	-78,484306	54	-0,257306	-78,491528	81	-0,117972	-78,461417
27	-0,156694	-78,463861	55	-0,214333	-78,518611	82	-0,210722	-78,489417
28	-0,166306	-78,485167	56	-0,229694	-78,514889	83	-0,374083	-78,551861
29	-0,164500	-78,447333	57	-0,244944	-78,515500	84	-0,189139	-78,339083
30	-0,157333	-78,439444	58	-0,252611	-78,509278	-	-	-

A partir de los de parámetros de la Tabla 1, se determina la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE), como sigue [15]:

$$\text{PIRE (dBm)} = 10 \log P_T \text{ (mW)} + G_T \text{ (dBi)} - L_T \quad (5.1)$$

Resultando la PIRE igual a 68,64 dBm.

Seguidamente, se determina la potencia radiada aparente (p.r.a), mediante [16]:

$$\text{p. r. a (dBm)} = \text{PIRE} - 2,15 \quad (5.2)$$

$$\text{p.r.a} = 66,49 \text{ dBm}$$

Pérdidas de Propagación Medidas en la ciudad de Quito

Dado que en este caso, las mediciones correspondieron fue al nivel de campo eléctrico recibido, se debe calcular previamente la potencia recibida a partir de [17]:

$$P_r \text{ (dBW)} = E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) - 20 \log f \text{ (GHz)} - 167,25 \quad (5.3)$$

Donde “E” se refiere al campo eléctrico recibido.
 La ecuación (5.3) es equivalente a:

$$P_r(\text{dBm}) = E \left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} \right) - 20 \log f(\text{GHz}) - 137,25 \quad (5.4)$$

A título de ejemplo, a continuación se calcula las pérdidas de propagación para el punto 50 que especifica en la tabla 2.

De la tabla 1, se tiene que:

$$P_T = 500 \text{ W} = 500 \times 10^3 \text{ mW}$$

$$G_T = 13,15 \text{ dBi}$$

$$L_T = 1,5 \text{ dB}$$

$$f = 0,671 \text{ GHz}$$

Por tanto, de la ecuación (5.1), la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) resulta ser:

$$\text{PIRE} = 68,64 \text{ dBm}$$

Ahora bien, dado que para el punto 50 la medición reportó un campo eléctrico recibido igual a 72,15 dBμV/m, de la ecuación (5.1) se tiene:

$$P_r = 72,15 - 20 \log(0,671) - 137,25 = -61,58 \text{ dBm}$$

Por lo que, utilizando la ecuación (5.3), las pérdidas por propagación en el mencionado punto son:

$$L = 68,64 - (-61,58) = 130,22 \text{ dB}$$

Comparación entre los valores estimados y los valores medidos

Con el fin de poder tener una apreciación más objetiva del desempeño de cada uno de los tres (3) modelos de la literatura considerados en este trabajo para su comparación con los valores experimentales, se recurre a la métrica denominada raíz cuadrada del error medio cuadrático (RMSE, *Root Mean Square Error*), dada por [18]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{m,i} - V_{c,i})^2}{N-1}} \quad (5.6)$$

Donde:

$V_{m,i}$ = Valor de pérdida medida en cada punto “i”.

$V_{c,i}$ = Valor de pérdida estimada en cada punto “i”, por el modelo de propagación.

N = Número de puntos de mediciones considerados.

Tabla 3. Valores de RMSE de modelos de propagación

	ITU-R P.1812-3	ITU-R P.1546-5	OH
RMSE (dB)	25,99	36,36	14,42

En la Tabla 3, se observa que para el caso de la ciudad de Quito el modelo de propagación que menor RMSE arroja es el de Okumura-Hata, con 14,42 dB, mientras que el modelo que presenta el desempeño más bajo en la estimación de los valores de propagación es el de la Recomendación ITU-R P.1546-5.

CONCLUSIONES

Para este artículo se compararon tres modelos para predicción de pérdidas de propagación para sistemas TDT que existen en la literatura, como son el modelo Okumura-Hata, la recomendación ITU-R P. 1546-5 y la Recomendación ITU-R P. 1812-3, dichos resultados fueron comparados con las medidas reales en base al RMSE. Para dicho comparación se usaron medidas realizadas en 84 diferentes puntos de la ciudad de Quito, Ecuador. Al comparar los valores medidos con dichos valores estimados se observó que el modelo Okumura-Hata fue el que arrojó un menor RMSE (14,42 dB).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Medición de la Sociedad de la Información (Resumen Ejecutivo). Ginebra, Suiza, 2013.
2. J. R. Uzcátegui, Implementación de la Recomendación ITU-R P.1812-3 para la Estimación de las Pérdidas de Propagación en Televisión Digital Abierta (TDA). Tesis de Grado de Maestría en Telecomunicaciones, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2015.
3. International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITU-R P.1546-5: Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Ginebra, Suiza, 2013.
4. International Telecommunication Union (ITU). Recommendation ITUR P.1812-3: A Path-specific Propagation Prediction Method for Point-to-area Terrestrial Services in the VHF and UHF Bands. Ginebra, Suiza, 2013.
5. L. R. Calle, D. O. Guzmán, Migración a TDT de un Canal de TV Local: Alternativas de Uso de Espectro y Financiamiento. Informe de Materia de Graduación, Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015.
6. TDA (2015). Cobertura [En línea]. Disponible en: <http://www.tdavenezuela.gob.ve/node/18> (consultada en enero 2016).
7. AliExpress (2015). Mini-ISDB-T-Digital-TV [En línea]. Disponible en: http://es.aliexpress.com/store/product/New-Mini-ISDB-T-Digital-TV-Stick-Video-Recorder-USB-TV-Receiver-Remote-Control/1919027_32501866769.html (consultada en enero 2016).
8. N. Pérez, Radioenlaces. Notas de Aula, Semestre B-2104, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2014.
9. V. K. Garg, Wireless Communications and Networking. Elsevier, 2007.
10. F. M. A. Al-Raie (2010). Simulation of Multipath Fading Effects in Mobile Radio Systems [En línea]. Disponible en: http://www.microwavejournal.com/ext/resources/BGDownload/1/6/Multipath_Fading.pdf?1326826600 (consultada en octubre 2015).
11. M. Olfat, Spatial Processing, Power Control, and Channel Allocation for OFDM Wireless Communications. Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Maryland, United States, 2003.
12. A. Rahmati Azmi. Iterative P. Reconstruction of Oversampled OFDM Signals over Deep Fading Channels. 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications (ECCSC 2008), Bucharest, Romania, 2008.
13. N. Marchetti, M. I. Rahman, S. Kumar, R. Prasad, OFDM: Principles and Challenges. Chapter 2 of New Directions in Wireless Communications Research. Springer, 2009, pp. 29-62.

14. A. F. Molish, *Wireless Communications*. Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
15. N. Pérez, *Cálculo de Cobertura de Sistemas WLL e LMDS*. Tesis de Maestría, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/Rio), Brasil, 2000.
16. J. S. Seybold, *Introduction to RF Propagation*. John Wiley & Sons, 2005.
17. International Telecommunications Union (ITU). *Recommendation ITU-R P.525-2: Calculation of Free-Space Attenuation*. Ginebra, Suiza, 1994.
18. J. Wu, D. Yuan, *Propagation Measurements and Modeling in Jinan City*. The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Boston, MA, USA, 1998.