



Modelo para Estimación de Pérdidas de Propagación en Sistema de Televisión Digital Abierta

Ángel D. Pinto, Juan M. Torres, Alberto S. García Bello, Nelson A. Pérez, José R. Uzcátegui

RESUMEN / ABSTRACT

Ante la amplia implementación a nivel mundial de la Televisión Digital Abierta (TDA) o Televisión Digital Terrestre (TDT), se hace necesario contar con modelos que permitan predecir las pérdidas de propagación en dichos sistemas con la mayor precisión posible de acuerdo a las características propias de propagación de las localidades en la que se implantarán tales sistemas. En este artículo, se desarrollan dos nuevos modelos con esa finalidad, los cuales están basados en mediciones del nivel de señal recibido realizadas en ambientes exteriores de la ciudad de Caracas, Venezuela. Uno de los modelos se ampara en la conocida tendencia lineal de las pérdidas en función del logaritmo de base 10 de la distancia entre transmisor y receptor, mientras que el otro modelo es una optimización del modelo Okumura-Hata original. El desempeño de los dos nuevos modelos, evaluado en términos de la raíz del error medio cuadrático (RMSE = *Root Mean Square Error*) es considerablemente superior al mostrado por los modelos Okumura-Hata y los de las Recomendaciones ITU-R P.1546-5 e ITU-R P.1812-4.

Palabras claves: Televisión Digital Abierta, modelo de propagación, ambientes exteriores

Given the global widespread implementation of Digital Terrestrial Television (DTT) or Digital Open Television, it is required to have models able to predict the propagation path loss in such systems, accurately as possible, according to propagation characteristics of environments where systems are to be implemented. Therefore, in this paper two novel models were developed, they both are based on measurements at the received signal level; the measurements are performed in outdoor environments in Caracas, Venezuela. One of the models relies on the known linear relationship between losses and distance between transmitter and receiver, when losses and distance are transformed into logarithmic (base 10) scales. The other model is the result of optimizing the original Okumura-Hata model. The performance of the new proposed models are evaluated in terms of the root mean square error (RMSE) and results show considerable improvements over the non-modified Okumura-Hata model, ITU-R P.1546-5 Recommendation and ITU-R P.1812- 4 Recommendation.

Key words: *Digital Terrestrial Television, propagation model, outdoor environments*

Model for prediction of propagation path loss in Digital Terrestrial Television

1.- INTRODUCCIÓN

Es conocido el gran despliegue que la Televisión Digital Abierta (TDA), también conocida como Televisión Digital Terrestre (TDT), ha venido presentando a nivel mundial, especialmente en la última década [1-6], lo que ha permitido contar con una televisión cuyas ventajas en relación a su homóloga analógica son, entre otras [7]: calidad de video y audio similares a las de los DVDs (*Digital Video Disc*) y CDs (*Compact Disc*), respectivamente; mayor capacidad en virtud de la transmisión de más de una programación por canal de radiofrecuencia (RF) con la misma o diferentes resoluciones de video; uso de transmisores con menores potencia de transmisión; recepción de señal en ambientes densamente urbanos;

recepción por parte de receptores con movilidad vehicular; transmisión de datos (incluyendo Internet de baja velocidad) e interactividad.

Ahora bien. para garantizar el éxito de los sistemas TDA, en términos de cobertura y desempeño, una vez que los mismos han sido implementados, es necesario previamente llevar a cabo una correcta planificación y dimensionamiento (PyD) de dichos sistemas en el segmento de radio propagación, para de esa manera disminuir la probabilidad de subdimensionamiento, es decir, utilización de una cantidad insuficiente de equipos (transmisores, antenas, entre otros) para el cumplimiento de un determinado objetivo de cobertura y desempeño, o de sobredimensionamiento, que redundaría en la utilización de más equipos de los realmente requeridos para un dicho objetivo de cobertura y desempeño [8].

Por su parte, la adecuada planificación y dimensionamiento (PyD) del sistema TDA y, en general, de cualquier otro sistema inalámbrico de telecomunicaciones, radica principalmente en la selección del o de los modelos que mayor precisión garanticen en la estimación de las pérdidas de propagación de la señal, las cuales impactan directamente en la distancia de cobertura. La referida precisión dependerá de la correlación que exista entre las características típicas de propagación propias del ambiente (clima, topografía, morfología, etc.) en el cual se implementará el sistema y las características de propagación que fueron consideradas en el desarrollo de dichos modelos [9-12].

En ese sentido, en la literatura están reportados diversos modelos de propagación que pueden ser aplicados a la planificación y dimensionamiento de los sistemas TDA, como por ejemplo, Longley-Rice, también conocido como modelo de terreno irregular (ITM = *Irregular Terrain Model*) [13], modelo de terreno irregular con obstrucciones (ITWOM = *Irregular Terrain with Obstructions Model*) [14], modelo de Fernandez [15], modelo de Wang [16], Okumura-Hata [17], Recomendación ITU-R P.1546-5 [18], Recomendación ITU-R P.1812-4 [19], entre otros. Empero, ninguno de esos modelos ha sido desarrollado en concreto para las características de propagación propias de la ciudad de Caracas, Venezuela, por lo que la aplicación de los mismos en la predicción de las pérdidas de propagación en dicha ciudad incrementa la probabilidad de que un sistema TDA planificado y dimensionado en la misma resulte subdimensionado o sobredimensionado.

Por esa razón, en este trabajo se desarrollan dos nuevos modelos para la estimación de pérdidas de propagación para sistemas TDA, a partir de mediciones del nivel de señal recibido (potencia recibida) en ambientes exteriores que fueron realizadas en Caracas. Los modelos en cuestión también podrán ser aplicados con el mismo objetivo, en ambiente exteriores de otras localidades cuyas características de propagación sean similares a las de la referida ciudad.

En este artículo, primero se lleva a cabo una revisión bibliográfica acerca de los modelos de propagación existentes en la literatura, utilizados para sistemas TDA en ambientes exteriores, que son considerados en este trabajo para la evaluación del desempeño del nuevo modelo. Posteriormente, se describe el experimento realizado en la ciudad de Caracas, Venezuela, para las mediciones de la potencia recibida. Seguidamente, se desarrollan los dos nuevos modelos como tal y se compara su desempeño con el de los modelos de la literatura seleccionados para tal fin.

2.- MODELOS DE PROPAGACIÓN PARA PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS EN SISTEMAS TDA

En esta sección se hará una sucinta revisión de los modelos que serán utilizados en este trabajo para la evaluación de los modelos desarrollados, los cuales serán denominados modelo TDA-Venezuela-I y modelo Okumura-Hata modificado.

2.1.- MODELO OKUMURA-HATA

Desarrollado por Masaharu Hata en 1980 y basado en los resultados de las mediciones realizadas por Yoshihisa Okumura en la ciudad de Tokio, Japón, consiste en un conjunto de ecuaciones que permite estimar las pérdidas de propagación en diferentes tipos de zonas (urbana, semiurbana y abierta o rural) [17, 20, 21]. Es uno de los modelos más utilizados en la planificación y dimensionamiento del segmento de propagación de sistemas inalámbricos de telecomunicaciones, incluyendo los sistemas TDA.

Las pérdidas de propagación L para una zona urbana son dadas por [20]:

$$L = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d \quad (1)$$

f : Frecuencia de operación, válida entre 150 MHz y 1500 MHz

d : Distancia entre transmisor y receptor, entre 1 km y 20 km
 h_1 : Altura efectiva de la antena transmisora, entre 30 m y 200 m
 h_2 : Altura efectiva de la antena receptora, entre 1 m y 10 m

Además, $a(h_2)$ es un factor de corrección que depende de la altura de la antena receptora, frecuencia y tipo de área o zona de servicio y se calcula mediante [20]:

- Para ciudades medianas y pequeñas:

$$a(h_2) = (1,1 \log f - 0,7)h_2 - 1,56 \log f + 0,8 \quad (2)$$

- Para ciudades grandes:

$$a(h_2) = \begin{cases} 8,29[\log(1,54 h_2)]^2 - 1,1; & f < 300 \text{ MHz} \\ 3,2[\log(11,75 h_2)]^2 - 4,97; & f \geq 300 \text{ MHz} \end{cases} \quad (3)$$

Para el caso de áreas suburbanas, las pérdidas de propagación, L_{su} , son determinadas a partir de [17, 21]:

$$L_{su} = L_u - 2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5,4 \quad (4)$$

Donde L_u corresponde a las pérdidas de propagación para áreas urbanas dadas por la expresión (1).

Por su parte, para zonas rurales o abiertas, las pérdidas de propagación, L_r , son dadas por [17, 21]:

$$L_r = L_u - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad (5)$$

Dado que el modelo Okumura-Hata es válido hasta 1500 MHz, el comité de trabajo COST-231 de la EURO-COST (*European Cooperative for Scientific and Technical*) desarrolló una versión extendida del mencionado modelo conocida como modelo COST-231 Hata o modelo Hata Extendido, en la cual las pérdidas de propagación se calculan a través de [22]:

$$L = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + [44,9 - 6,55 \log h_1] \log d + C_M \quad (6)$$

Donde f está comprendida en 1500 MHz y 2000 MHz, C_M es igual a 0 dB para ciudades medianas y áreas suburbanas e igual a 3 dB para áreas metropolitanos.

Las alturas efectivas del transmisor y el receptor, así como la distancia entre transmisor y receptor están en los mismos rangos del modelo Okumura-Hata. Asimismo, el factor $a(h_2)$ se calcula mediante las expresiones (2) y (3).

2.2.- MODELO DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.1546-5

Es un método para la estimación 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 [18].

La recomendación ITU-R P-1546-5, que considera de manera implícita la topografía del terreno existente entre el transmisor y el punto en el cual se predice la intensidad del campo eléctrico, está basada en un gran número de mediciones de campo eléctrico que fueron realizadas durante varios años y han sido condensadas en un conjunto de curvas que representan la intensidad de campo eléctrico recibido para una potencia radiada aparente (p.r.a.) de 1 kW y un porcentaje de ubicaciones del 50%, en función de parámetros como la distancia (entre 1 km a 1000 km) y la altura de la antena transmisora (entre 10 m y 1200 m), 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%.

Además, el modelo hace una distinción entre la propagación sobre trayecto terrestre (referida de mediciones realizadas principalmente en América del Norte y Europa, mar frío (relacionada a mediciones realizadas en el océano Atlántico) y mar cálido (basada en mediciones llevadas a cabo en el mar de Mediterráneo, como por ejemplo el Mar Rojo). Es por ello, que el

conjunto de curvas arriba mencionado se divide entre esos tres tipos de propagación. En la Figura 1 se ilustra un ejemplo de una de las mencionadas curvas [18].

Ahora bien, para la aplicación del método de la Recomendación ITU-R P.1546-5 se deben considerar los parámetros de entrada que aparecen en la Tabla 1 [18].

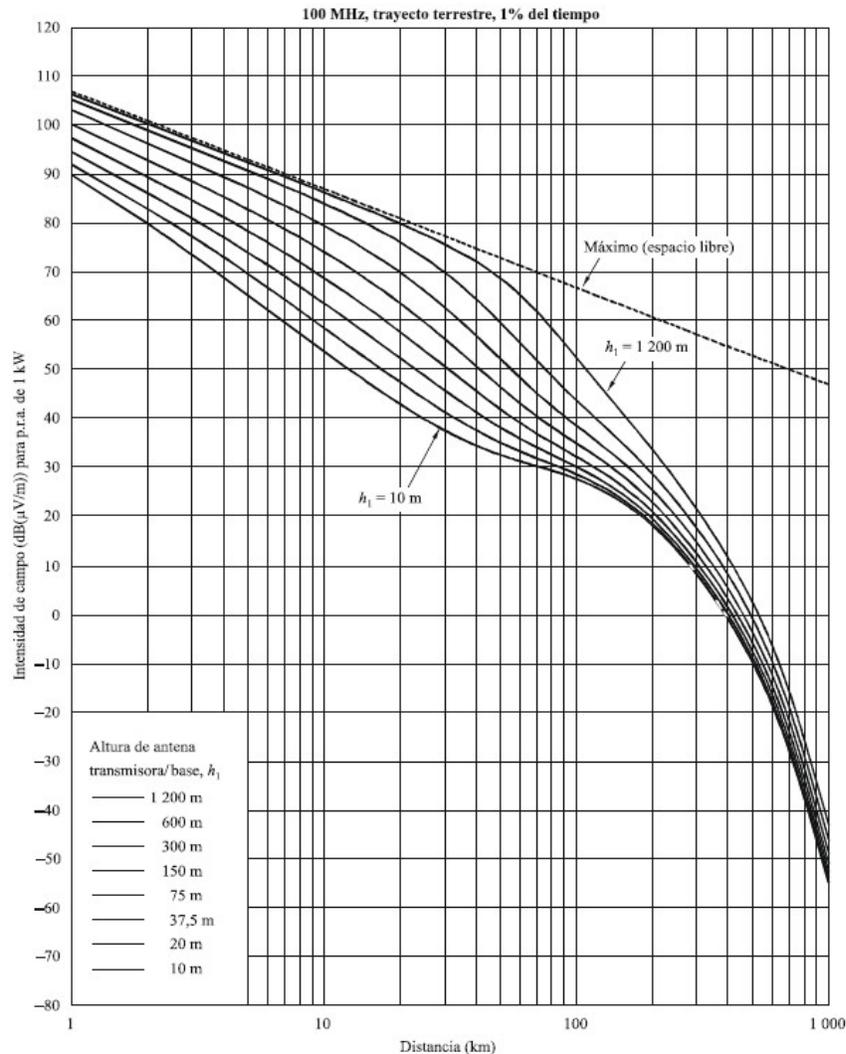


Figura 1

Curva de intensidad de campo eléctrico versus distancia, para 100 MHz, trayecto terrestre y 1% del tiempo

En todo caso, el procedimiento o algoritmo completo para la estimación del campo eléctrico en un determinado punto localizado a cierta distancia del transmisor es bastante minucioso; sin embargo, en líneas generales, el método consiste en determinar el valor (o los valores, en caso de requerirse interpolación) de la intensidad de campo eléctrico a partir de curvas de intensidad de campo eléctrico recibido para una p.r.a. de 1 kW (como la mostrada en la Figura 1) y de una terna de valores específicos correspondiente a la frecuencia, longitud de trayecto y porcentaje de tiempo excedido, así como también del tipo de trayecto. De ser necesario, se deben incluir factores de corrección para la altura de la antena receptora, transmisor en un terreno con obstáculos o adyacente al mismo, ángulo de despeje del terreno, variabilidad en las ubicaciones del receptor y dispersión troposférica. El método también incluye el procedimiento para estimar la intensidad de campo eléctrico para distancias menores a 1 km.

Una vez calculada la intensidad de campo eléctrico E , las pérdidas de propagación L , se determinan a partir de [8]:

$$L(\text{dB}) = 139,3 - E + 20 \log f \quad (7)$$

Donde E está dado en $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ y f en MHz.

Tabla 1
Parámetros de entrada para la aplicación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1546-5

Parámetro	Descripción	Valor
f (MHz)	Frecuencia de operación	30 a 3000
d (km)	Longitud del trayecto	1 a 1000
p (%)	Porcentaje medio del tiempo anual en que se excede el nivel de señal calculado	1 a 50
h_1 (m)	Altura de la antena transmisora/base. Se define según la longitud y tipo de trayecto (terrestre, marítimo)	1 a 3000
h_2 (m)	Altura de la antena receptora/móvil	1 a 3000
R_1 (m)	Ocupación del terreno en la ubicación del transmisor	Ninguno
R_2 (m)	Ocupación del terreno en la ubicación del receptor	Ninguno
Tipo de trayecto	Especifica el tipo de trayecto	Terrestre, marítimo, mixto

2.3.- MODELO DE LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.1812-4

Es considerado como un complemento del modelo de la Recomendación ITU-R P-1546-5. Apropiado para sistemas terrestres punto-área, permite estimar las pérdidas de propagación en la banda de frecuencias entre 30 MHz y 3 GHz, sobre trayectos de 250 m a 3000 km y con el transmisor y receptor ubicados hasta 3 km de altura sobre el suelo. La predicción aplica para porcentajes de tiempo p entre 1% y 50% y porcentaje de ubicaciones p_L entre 1% y 99%. Además, el método considera explícitamente el perfil del terreno existente entre transmisor y receptor [19].

Para la predicción de las pérdidas de propagación, el método considera los siguientes factores o elementos:

- Condición de línea de vista ($\text{LOS} = \text{Line of Sight}$).
- Difracción (incluye efecto de la curvatura de la Tierra, terrenos irregulares y caso de sub-trayectos).
- Dispersión troposférica.
- Propagación anómala (debida a ductos y a reflexión/refracción en capas de la atmosfera).
- Variación por la ocupación del terreno y por la ubicación del receptor.
- Pérdidas de penetración en edificios.

Los parámetros de entrada requeridos para la aplicación del modelo se resumen en la Tabla 2 [19].

Tabla 2
Parámetros de entrada para el modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-4

Parámetro	Descripción	Valores
f (GHz)	Frecuencia de operación	0,03 a 3
p (%)	Porcentaje medio del tiempo anual en que se excede el nivel de señal calculado	1 a 50
p_L (%)	Porcentaje de ubicaciones para las que se excede el nivel de señal calculado	1 a 99
φ_t (°)	Latitud de la ubicación del transmisor	-80 a +80
φ_r (°)	Latitud de la ubicación del receptor	-80 a +80
ψ_t (°)	Longitud de la ubicación del transmisor	-180 a +180
ψ_r (°)	Longitud de la ubicación del receptor.	-180 a +180
h_{tg} (m)	Altura de la antena transmisora sobre el nivel del suelo	1 a 3000
h_{rg} (m)	Altura de la antena receptora sobre el nivel del suelo	1 a 3000

Adicionalmente, es necesario contar con una base de datos digital de elevación del terreno en función de la distancia que permita obtener, para cada punto del perfil del terreno, la siguiente información [9]:

- d_i : Distancia del transmisor al i -ésimo punto (km)
- h_i : Altura sobre el nivel del mar del i -ésimo punto (m)
- g_i : Igual a h_i más la altura representativa de la ocupación del terreno en el i -ésimo punto (m)

La consideración, por parte del modelo, de los efectos de difracción y obstrucción ocasionados por obstáculos, es posible gracias a la incorporación de un factor denominado “altura de ocupación del terreno” el cual permite obtener una representación más detallada del perfil. Dicho factor puede considerarse de manera general para todo el trayecto, en base a los valores que aparecen en la Tabla 3 [19].

Tabla 3
Altura de ocupación del terreno para distintas áreas o zonas de servicio

Tipo de ocupación del suelo (equivalente a área o zona de servicio)	Altura representativa de ocupación del terreno (m)
Agua o mar	0
Abierta o rural	0
Suburbana	10
Urbana o árboles o bosques	15
Urbana densa	20

En comparación con el modelo de la Recomendación ITU-R 1546-5, el procedimiento de cálculo de las pérdidas de propagación mediante el modelo de la Recomendación 1812-4 es incluso más minucioso; no obstante, de manera general se puede resumir a los siguientes pasos [19]:

- Definir las variables y parámetros relacionados con el tipo de ubicación del receptor (ambiente interior o exterior), gradiente medio del índice de refracción (ΔN) y refractividad (N_o) y tipo de zona radiometeorológica (tierra interior, tierra exterior o mar). Además, previamente se deben calcular los parámetros que consideran los efectos de la propagación por ductos (β_0), valor medio del radio efectivo de la Tierra (a_e), valor del radio efectivo de la Tierra excedido durante un porcentaje de tiempo β_0 (a_{β}), así como también un conjunto de parámetros definidos a partir del perfil de terreno tales como la distancia desde las antenas transmisora (d_t) y receptora (d_r) a sus respectivos horizontes, ángulo de elevación de la línea que une el transmisor y el receptor con respecto a sus horizontes (θ_t y θ_r , respectivamente), altura de la antena transmisora y receptora respecto al nivel del mar (h_{ts} y h_{rs} , respectivamente), entre otros.
- Calcular de las pérdidas básicas de propagación para el $p\%$ del tiempo y el 50% de las ubicaciones. Dichas pérdidas consideran la propagación por línea directa, difracción, dispersión troposférica, propagación por ductos y capas, así como la combinación de esos mecanismos. La componente de las pérdidas básicas de propagación por línea incluye las pérdidas de propagación en el espacio libre (L_{bfs}) más un factor de corrección por múltiple trayectoria, E_s . La componente de las pérdidas básicas de propagación debida al fenómeno de difracción se calcula a través el método denominado “delta-Bullington”, el cual combina el modelo de difracción de Bullington (difracción por múltiples obstáculos del tipo “filos de cuchillo”) y el modelo de difracción por tierra esférica.
- Determinar los factores de corrección de las pérdidas debido a la ocupación del suelo en los entornos de las antenas transmisora y receptora, el factor de corrección debido a la variabilidad de las ubicaciones del receptor y el factor de corrección debido a la penetración de la señal en edificios.
- Hallar las pérdidas de transmisión no excedidas durante el $p\%$ del tiempo y el $p_L\%$ de las ubicaciones.

Para cualquier $p\%$, un p_L igual a 50% y considerando los efectos de las pérdidas por ocupación del suelo, las pérdidas de transmisión, L_{bc} , son dadas por [19]:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad (8)$$

Donde:

L_{bu} : Pérdidas de transmisión (en dB), no excedidas durante el $p\%$ del tiempo y el 50% de las ubicaciones, sin considerar los efectos de la ocupación del suelo en las que están ubicados el transmisor y el receptor

A_{ht} , A_{hr} : Pérdidas adicionales (en dB), debido a los entornos en los que están localizados el transmisor y receptor.

En caso de que p_L sea diferente al 50%, se le debe agregar a la ecuación (8) una pérdida adicional producto de la pérdida por variabilidad de las ubicaciones. Un valor sugerido es 5,5 dB [19].

Asimismo, para ambientes interiores se deben sumar a la ecuación (8) las pérdidas por penetración en edificios, las cuales oscilan entre 9 dB y 11 dB [19].

3.- MEDICIONES REALIZADAS

Las mediciones a ser consideradas para el desarrollo del modelo TDA-Venezuela forman parte de un conjunto de pruebas de campo realizadas para la evaluación del desempeño de los estándares ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial*), DVB-T/H (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial/Handheld*) y DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*), en la ciudad de Caracas. En dichas pruebas fueron considerados hasta tres tipos de ambiente: exterior con recepción fija, exterior con recepción móvil y entorno interior. Para el caso del presente trabajo, el interés se centra en las mediciones realizadas del nivel de señal recibido o potencia recibida en ambientes exteriores con recepción fija.

3.1.- CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Para cada uno de los estándares de TDA arriba mencionados, se midió el nivel de señal recibido en puntos distribuidos sobre varios radiales partiendo del transmisor distanciados, en un alcance aproximado hasta los 16 km, partiendo desde 1 km..

El transmisor, instalado en la estación Los Meedores, Parque Nacional El Ávila, en las coordenadas geográficas 10,5284° latitud Norte y -66,8776° longitud Oeste y a una altura sobre el nivel del mar de 1.773,6 metros, se configuró para operar en el canal 48 de la banda UHF (*Ultra High Frequency*), cuya frecuencia central es 677 MHz. La potencia del equipo se fijó en 500 W (57 dBm) y se utilizó un arreglo de antenas ubicado a una altura de 35 m sobre el nivel del suelo. En las Figuras 2a y 2b se muestran el mencionado arreglo y su diagrama de radiación horizontal.

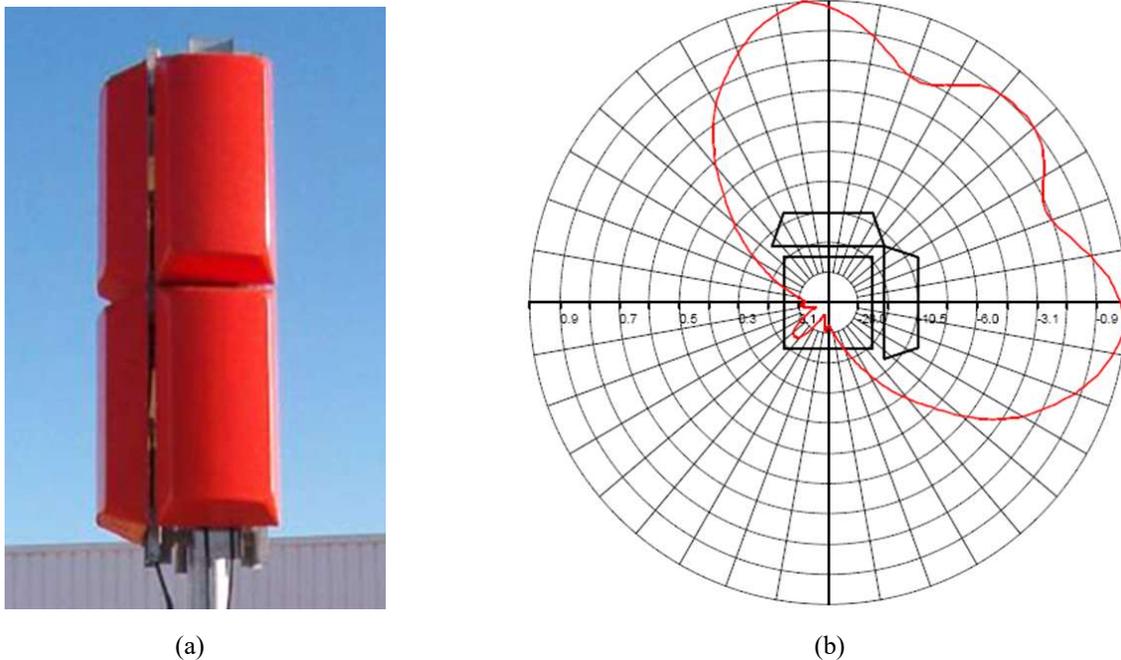


Figura 2

a) Arreglo de antenas utilizada en el transmisor; b) Diagrama de radiación horizontal del arreglo

Tabla 4
Coordenadas geográficas y alturas sobre el nivel del mar de los puntos de medición

Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altura sobre el nivel del mar (m)	Punto	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altura sobre el nivel del mar (m)
C07	10,5131	-66,8235	1167,7	H06	10,4860	-66,8851	884,2
C09	10,5045	-66,7979	1088,7	H07	10,4709	-66,8858	1029,2
C10	10,5012	-66,7893	1039,8	I06	10,4855	-66,9020	891,5
D04	10,5091	-66,8476	968,5	I07	10,4788	-66,9093	899,2
D07	10,4968	-66,8333	884,4	I10	10,4609	-66,9145	913,0
D09	10,4789	-66,8137	853,3	I11	10,4471	-66,9260	924,8
D10	10,4731	-66,8068	856,4	I12	10,4388	-66,9295	934,9
E06	10,4928	-66,8517	879,1	I13	10,4319	-66,9335	970,4
E07	10,4780	-66,8422	875,1	I16	10,4076	-66,9477	1278,0
E09	10,4686	-66,8374	906,1	J05	10,5030	-66,9096	1773,6
E10	10,4602	-66,8332	940,9	J09	10,4877	-66,9325	910,8
E11	10,4430	-66,8326	1133,1	J11	10,4713	-66,9540	927,7
F07	10,4699	-66,8650	901,0	J13	10,4695	-66,9645	932,3
F08	10,4634	-66,8643	899,9	J16	10,4571	-66,9896	951,1
F09	10,4522	-66,8607	1081,9	K04	10,5234	-66,9083	987,4
F12	10,4262	-66,8558	1102,6	K05	10,5168	-66,9161	993,1
G05	10,4872	-66,8750	876,3	K07	10,5133	-66,9270	946,7
G07	10,4691	-66,8754	994,5	K09	10,5044	-66,9516	995,5
G09	10,4513	-66,8727	936,4	K11	10,4952	-66,9760	1213,0

En las Figuras 5a y 5b, se ilustra, a modo de ejemplo, la vista en tres (3) dimensiones (3D) de partes de la ciudad de Caracas en las que se llevaron a cabo la mayoría de las mediciones. Se puede apreciar el ambiente densamente urbano circundante de los puntos de medición, ambiente que torna difícil la tarea de seleccionar más puntos de medición sobre los radiales seleccionados, así como la tarea de seleccionar otros radiales. Además, es oportuno mencionar que, debido también a esas características del ambiente, en varios de los puntos de medición se reportaron niveles de potencia recibida muy cercana al nivel de ruido, razón por la cual los mismos fueron descartados para el análisis.

4.- DESARROLLO DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

Para el desarrollo del modelo de propagación objeto del presente trabajo, previamente se analizan los resultados obtenidos de las mediciones con el fin de evaluar el comportamiento estadístico de dichos resultados y, por tanto, vislumbrar la tendencia de las pérdidas de propagación en relación a la o las variables independientes que hayan de ser consideradas.

4.1.- RESULTADOS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS EN CARACAS

Para determinar las pérdidas de propagación, L_b , a partir de las medidas obtenidas del nivel de señal recibido, se aplica la clásica ecuación de cálculo de enlace, también conocida como *link budget* [8]:

$$L_b(\text{dB}) = PIRE(\text{dBm}) - P_r(\text{dBm}) \quad (9)$$

Donde:

P_r : Nivel de señal recibido (medido)

$PIRE$: Potencia isotrópica radiada equivalente, dada por:

$$PIRE \text{ (dBm)} = P_t \text{ (dBm)} + G_{t\theta} \text{ (dBi)} - L_t \text{ (dB)} \quad (10)$$

Donde P_t , y L_t son iguales a 57 dBm y 3,2 dB, respectivamente; mientras que $G_{t\theta}$ es la ganancia de antena transmisora en dirección del acimut hacia cada punto de medición.



Figura 5

Partes de Caracas en las que se realizaron mediciones: a) Vista desde una parte del Parque Nacional El Ávila; b) Vista desde una parte de la ciudad (al fondo parte del Parque Nacional El Ávila)

En la Figura 6 se muestran los resultados de las pérdidas de propagación medidas obtenidas en la ciudad de Caracas.

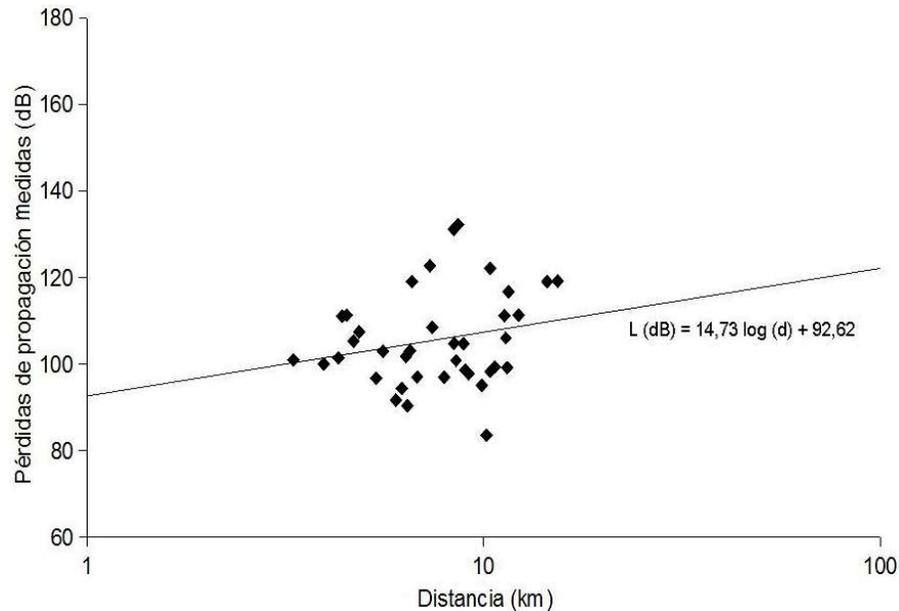


Figura 6

Pérdidas de propagación en sistemas de televisión digital abierta medidas en Caracas, Venezuela

En la Figura 6 se puede apreciar que, como era de esperarse, las pérdidas de propagación se incrementan con la distancia entre transmisor y receptor. Asimismo, se observa que dicho aumento es con tendencia a una línea recta en función del logaritmo de base 10 de la distancia, lo cual también es cónsono con lo esperado [8].

Es oportuno resaltar que, tal como se muestra en la Figura 6, que el exponente de pérdidas resultante es igual 1,473, es decir, menor a 2. Este valor, que no es común para propagación ambientes exteriores, describe un comportamiento que puede ser debido a una propagación tipo “túnel” producto de los efectos de múltiples trayectos por reflexiones en edificios, que asemejan las características de la propagación a las del caso de ambientes interiores.

4.2.- DESARROLLO DE LOS MODELOS Y EVALUACIÓN DE SU DESEMPEÑO

De acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 6 una primera aproximación del modelo a ser desarrollado en el presente trabajo consiste en la ecuación general del modelo de propagación en la cual las pérdidas de propagación L varían linealmente con el logaritmo de base 10 con la distancia, es decir, en ese caso:

$$L = 92,62 + 14,73 \log d \quad (11)$$

Con el fin de evaluar el desempeño de esa primera aproximación del modelo, es decir, TDA-Venezuela-I, se procede a implementar el modelo Okumura-Hata, así como los modelos de las Recomendaciones ITU-R P.1546-5 e ITU-R P.1812-4. Para ello, se deben considerar los parámetros generales que aparecen en la Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros generales

Parámetro	Valor
Frecuencia (GHz)	0,677
p (%)	50
p_L (%)	50
φ_t (°)	10,52765
ψ_t (°)	-66,87832
h_{tg} (m)	35
h_{rg} (m)	10
Ubicación del receptor	Exterior
Altura de la antena transmisora sobre el nivel del mar (m)	1773,6
ΔN	58
N_o	370
Zona radiometeorológica	A2 (tierra interior)

Es importante resaltar que para la aplicación del modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-4 objeto del presente artículo, el hecho de considerar p_L igual a 50% implica que no existirá pérdida adicional por la variabilidad de las ubicaciones. Adicionalmente, la pérdida por penetración en edificios será considerada igual a cero (0), debido a que los puntos en los cuales se calcularán las pérdidas de propagación están en ambientes exteriores.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos para los valores estimados por medio de los modelos de propagación considerados, incluyendo el modelo TDA-Venezuela-I, así como los valores correspondientes a las mediciones. Asimismo, se muestran los valores obtenidos de las mediciones.

De manera cualitativa, en la Figura 7 se puede observar que el modelo que mejor se ajusta a las medidas es precisamente el modelo TDA-Venezuela-I, mientras que los modelos más alejados en sus predicciones son el de la Recomendación ITU-R P.1812-4 y más aún el modelo Okumura-Hata. No obstante, una apreciación más precisa se obtiene al medir cuantitativamente el error entre los valores medidos o valores reales y los valores estimados por cada uno de los modelos considerados; específicamente, se trata de la raíz cuadrada el error medio cuadrático (RMSE = *Root Mean Square Error*), dado por [23]:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (V_{mi} - V_{ci})^2}{N-1}} \quad (12)$$

Donde:

V_m : Valor de pérdida de propagación medido en cada punto

V_c : Valor de pérdida de propagación estimado por el modelo de propagación en cada punto

N: Número de puntos de mediciones considerados

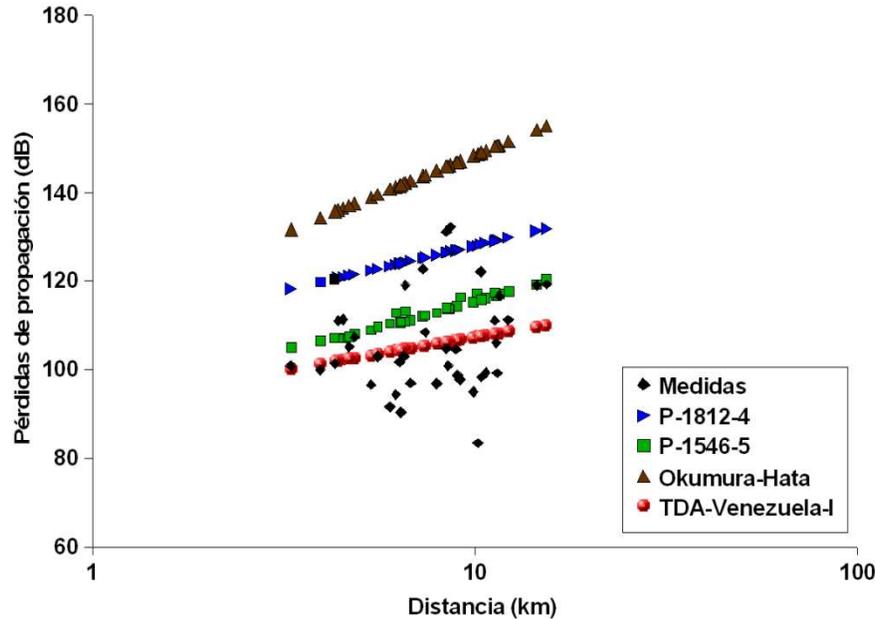


Figura 7

Pérdidas de propagación estimadas y medidas en Caracas, Venezuela

En la Tabla 6 se muestran los valores del RMSE obtenidos para cada uno de los modelos de propagación considerados, incluyendo el modelo TDA-Venezuela-I.

Tabla 6
 Valores RMSE para los modelos de propagación

	Okumura-Hata	ITU-R P.1546-5	ITU-R P.1812-4	TDA-Venezuela-I
RMSE (dB)	40,63	23,29	22,65	10,73

Tal como se puede observar en la Tabla 6, el valor del RMSE es significativamente menor cuando se aplica el modelo TDA-Venezuela-I. Asimismo, se puede apreciar que el modelo que mayor error arroja para la estimación de las pérdidas de propagación en la ciudad de Caracas, Venezuela es el modelo Okumura-Hata, mientras que modelo de la Recomendación ITU-R P.1812-4 presenta un desempeño ligeramente superior al del modelo de la Recomendación ITU-R P.1546-5, aunque ambos con elevados RMSE.

Ahora bien, el modelo TDA-Venezuela-I, si bien presenta un RMSE considerablemente menor a los arrojados por los modelos de la literatura incluidos en la comparación, tiene la desventaja de que sólo depende de la distancia entre transmisor y receptor. Por tal razón, se desarrolla una segunda aproximación para el modelo, aquí llamada Okumura-Hata Modificado, que toma en cuenta la frecuencia de operación del sistema, así como las alturas del transmisor y receptor, tal como lo hace el modelo de Okumura-Hata, pero incorporando un par de factores, x_1 y x_2 , que disminuyan el RMSE asociado al modelo de Okumura-Hata. Es decir, la expresión general de esa segunda aproximación del modelo es:

$$L = x_1 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + x_2 (44,9 - 6,55 \log h_1) \log d \quad (12)$$

El factor $a(h_2)$ se calcula mediante la expresión (3) debido a que Caracas es considerada una ciudad grande.

Por otra parte, los parámetros x_1 y x_2 se obtienen aplicando regresión no lineal, mediante el uso de la técnica Quasi-Newton [24], resultando ser 0,725 y 0,136, respectivamente.

Por tanto, las pérdidas de propagación de acuerdo al modelo Okumura-Hata Modificado son dadas por:

$$L = 50,42 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_1 - a(h_2) + (14,19 - 2,07 \log h_1) \log d \quad (13)$$

El valor de RMSE que se produce al implementar el modelo Okumura-Hata Modificado en Caracas es de 10,86 dB, es decir, ligeramente superior al arrojado por el modelo TDA-Venezuela-I; sin embargo, se trata de un modelo más completo desde el punto de vista físico, pues permite estimar las pérdidas de propagación a partir de una mayor cantidad de parámetros, específicamente, la frecuencia de operación, las alturas de las antenas transmisora y receptora y el tipo de ambiente en el que está inmerso el receptor.

5.- CONCLUSIONES

En este artículo se han propuesto dos nuevos modelos para la predicción de las pérdidas de propagación en sistemas de Televisión Digital Abierta (TDA) o Televisión Digital Terrestre (TDT). Para ello, se recurrieron a mediciones de dichas pérdidas realizadas con los estándares ISDB-T, DVB-T/H y DTMB, en la ciudad de Caracas, Venezuela, específicamente, en ambientes exteriores, en un rango de distancias entre 1 km y 16 km.

El primer modelo, llamado TDA-Venezuela-I, fue basado en la clásica ecuación de la variación lineal de las pérdidas de propagación con el logaritmo base 10 de la distancia, mientras que el segundo modelo, que se denominó Okumura-Hata Modificado, consistió en la incorporación al modelo de Okumura-Hata original, de dos factores de ajuste que fueron obtenidos utilizando regresión no lineal.

El desempeño de ambos modelos, en términos del RMSE, en la estimación de las pérdidas de propagación fue similar y significativamente superior al presentado por los modelos Okumura-Hata, Recomendación ITU-R P.1546-5 y Recomendación ITU-R P.1812-4.

Es importante resaltar que la propuesta de modificación del modelo de Okumura-Hata implementada en este artículo, es aplicable a cualquier otra localidad en el mundo, siempre y cuando se cuente con mediciones realizadas en el referido local. Por tanto, se recomienda el despliegue de campañas de medición tanto en TDA como en otros sistemas inalámbricos de telecomunicaciones en los que el modelo Okumura-Hata puede ser utilizado. En ese sentido, es aconsejable que se realicen la mayor cantidad de mediciones que sea posible, incorporando la mayor cantidad también factible de variables independientes (por ejemplo, frecuencia de operación, alturas de antenas, entre otros) en dichas mediciones, lo cual redundará en el aumento de la precisión de los modelos que se desarrollen.

REFERENCIAS

1. Uzcátegui JR, Torres JF, Pérez N, Duque L, Bruzual Z. Directrices para la Elaboración de un Plan para la Migración a Televisión Digital Terrestre (TDT) en Venezuela. *TELEMATIQUE*. 2010; 9(2): 1-11.
2. Páez X. Medición de Parámetros de Calidad de las Señales de Televisión Digital Terrestre (TDT) en Sitios Identificados como Zonas de Sombra dentro del Distrito Metropolitano de Quito. *Revista Politécnica*. 2015; 35(1): 1-8.
3. Angulo J, Calzada J, Estruch A. Selection of Standards for Digital Television: The Battle for Latin America. *Telecommunications Policy*. 2011; 35(8): 773-787.
4. Martínez A, Martínez R, Guillén GA. Evaluación de Parámetros de Calidad Seleccionados de Cajas Decodificadoras para el Estándar DTMB. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones (RIELAC)*. 2015; XXXVI(2): 62-82.
5. Sarrina SH. Digital Television Adoption: Comparing the Adoption of Digital Terrestrial Television with the Adoption of Digital Cable in Taiwan. *Telematics and Informatics*. 2014; 31(1): 126-136.
6. El-Hajjar M, Hanzo L. A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013; 15(4): 1924-1949.

7. Kibona L, Sam A. A Review on Performance Evaluation of DVB-T2 Network and Its Optimization Recommendations a Case of Dar Es Salaam, Tanzania. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2014; 4(4): 806-819.
8. Pérez-García N, Herrera J, Uzcátegui JR, Bernardo P. Modelo de Propagación en las Ciudades de Mérida (Venezuela) y Cúcuta (Colombia) para Redes WLAN, Operando en 2.4 GHz, en Ambientes Exteriores. *Revista Universidad Ciencia y Tecnología, UNEXPO-Puerto Ordaz*. 2012; 16(2): 54-64.
9. Fernandes LC, Martins-Soares AJ. Simplified Characterization of the Urban Propagation Environment for Path Loss Calculation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2010; 9: 24-27.
10. Azpilicueta L, López-Iturri P, Aguirre E, Mateo I, Astrain JJ, Villadangos J, et al. Analysis of Radio Wave Propagation for ISM 2.4 GHz Wireless Sensor Networks in Inhomogeneous Vegetation Environments. *Sensors*. 2014; 14(12): 23650-23672.
11. Farjow W, Raahemifar K, Fernando X. Novel Wireless Channels Characterization Model for Underground Mines. *Applied Mathematical Modelling*. 2015; 39(19): 5997-6007.
12. Ojo JS, Rotimi OC. Diurnal and Seasonal Variations of Rain Rate and Rain Attenuation on Ku-Band Satellite Systems in a Tropical Region: A Synthetic Storm Techniques Approach. *Journal of Computer and Communications*. 2015; 3(4): 1-10.
13. Ferreira AM. Parallel Prediction of Radio Propagation. MSc Thesis. School of Engineering, Cranfield University, England; 2015. Disponible en <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/63356/1/000151126.pdf>
14. Shumate S. Deterministic Equations for Computer Approximation of ITU-R P.1546-2. In *International Symposium on Advanced Radio Technologies/ClimDiff 2008*. Boulder, Colorado; United States of America; 2008. P. 86-95.
15. Fernández JR, Quispe M, Kemper G, Samaniego J, Díaz D. Adjustments of Log-Distance Path Loss Model for Digital Television in Lima. In *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'12)*. Brasília; Brasil; 2012. p. 1-4.
16. Wang Z, Jin R, Jin Y. Path Loss Prediction for Mobile Digital TV Propagation under Viaduct. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2011; 57(1): 37-45.
17. Thomas T, MV V. Path loss Determination Using Hata Model and Effect of Path loss in OFDM. *International Journal of Advanced Research in Biology, Ecology, Science and Technology (IJARBEST)*. 2015; 1(8): 19-25.
18. International Telecommunications Union. Recommendation ITU-R P.1546-5: Method for Point-to-area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz. Geneva; Switzerland; 2013.
19. International Telecommunications Union. Recommendation ITU-R P.1812-4: A Path-specific Propagation Prediction Method for Point-to-area Terrestrial Services in the VHF and UHF Bands. Geneva; Switzerland; 2015.
20. Alim MA, Rahman MM, Hossain MM, Al-Nahid A. Analysis of Large-Scale Propagation Models for Mobile Communications in Urban Area. *International Journal of Computer Science and Information Security*. 2010; 7(1): 135-139.
21. Hata M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radioservices. *IEEE Transactions Vehicular Technology*. 1980; VT-29(3): 317-325.
22. Mawjoud S. Path Loss Propagation Model Prediction for GSM Network Planning. *International Journal of Computer Applications*. 2013; 84(7): 30-33.
23. Ajose SO, Imoize AL. Propagation Measurements and Modelling at 1800 MHz in Lagos Nigeria. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*. 2013; 6(2): 165-174.
24. Martínez JM. Practical Quasi-Newton Methods for Solving Nonlinear Systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2000; 124(1-2): 97-121.

AUTORES

Ángel D. Pinto Mangones, Ingeniero de Sistemas, M.Sc. en Redes (área Telemática), Ph.D. en Gerencia de Tecnología, Profesor (categoría Titular) de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad del Sinú, Montería, Colombia. E-mail: angelpinto@unisinu.edu.co, anpimal@hotmail.com

Juan M. Torres Tovia, Ingeniero de Sistemas, Ph.D. en Gerencia de Tecnología, Profesor (categoría Titular) de la Escuela de Ingeniería de Sistemas de la Universidad del Sinú, Montería, Colombia. E-mail: juantorrest@unisinu.edu.co, jtorrestovio@yahoo.com

Alberto Segundo García Bello, Ingeniero de Sistemas, M.Sc. (Candidato) en Dirección Estratégica de Telecomunicaciones, Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería de Sistemas en la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN), Montería, Colombia. E-mail: albertogarciabello@gmail.com

Ángel D. Pinto, Juan M. Torres, Alberto S. García Bello, Nelson A. Pérez, José R. Uzcátegui
RIELAC, Vol. XXXVII 2/2016 p. 67-81 Mayo - Agosto ISSN: 1815-5928

Nelson A. Pérez García, Ingeniero Electricista, M.Sc. em Engenharia Elétrica (Área: Eletromagnetismo Aplicado), D.Sc. em Engenharia Elétrica (Área: Eletromagnetismo Aplicado), Profesor (categoría Titular) de la Escuela de Ingeniería de Eléctrica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. E-mail: perezn@ula.ve, nelsonp90@hotmail.com

José Rafael Uzcátegui, Ingeniero Electricista, M.Sc. en Telecomunicaciones, Profesor (categoría Agregado) de la Escuela de Ingeniería de Eléctrica de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. E-mail: joseu@ula.ve, joserum@gmail.com