Desarrollo del Simulador para un modelo de propagación del análisis de cobertura en conformidad con el estándar IEEE 802.16-2009 (Fixed Wireless MAN OFDM)

Jaime Leonardo Jarrín Valencia
Departamento de Eléctrica y Electrónica
Escuela Politécnica del Ejército
Sangolquí, Ecuador
jaime.jarrin.valencia@gmail.com

Resumen— **El presente documento describe el diseño e implementación en un simulador del modelo de propagación propuesto por Yon Soo Cho, el cual permite estimar las pérdidas del canal inalámbrico para comunicaciones basadas en WiMAX, IEEE 802.16-2009 Fixed WirelessMAN OFDM. Se utiliza la herramienta computacional MATLAB® para programar el simulador, el cual estime las pérdidas del canal y refleje sus efectos sobre la capa física (PHY). El transmisor y receptor WiMAX está basado en el estándar IEEE 802.16-2009 con las modulaciones: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM; a diferentes tasas de codificación de canal. El programa permite obtener gráficas de Pérdidas del Canal, Potencia de transmisión Vs. BER(Bit Error Rate), Potencia de transmisión Vs. Eb/No. Con el fin de diseñar el canal se relaciona las pérdidas ocasionadas por el medio inalámbrico considerando únicamente con *shadowing*, valorando un canal AWGN con una desviación estándar obtenida a través de la Eb/No producida por la potencia del transmisor. El modelo de estudio fue contrastado a 3.5 GHz para la obtención del BER con otros modelos de propagación conocidos como lo es SUI y espacio libre, obteniendo como resultado que el modelo de propagación es similar a SUI pero difiera en la forma de considerar el *shadowing* puesto que el modelo propuesto es válido para zonas rurales únicamente a diferencia de que SUI es más genérico.**

Palabras Clave – WiMAX, SUI, IEEE 802.16-2009, PHY FIXED WIRELESS MAN OFDM

I. INTRODUCCIÓN

Toda tecnología estandarizada para comunicaciones inalámbricas posee modelos matemáticos que permiten prever cual será el comportamiento de un enlace, mediante el análisis de las potencias de transmisión, las modulaciones utilizadas, modelos de propagación y determinar si es viable la implementación del mismo, es decir, los modelos son esenciales para definir las características de un enlace. Por ello el objetivo principal de este trabajo es entregar un simulador para la capa física IEEE 802.16-2009[2], basado en el estudio realizado por Yon Soo Cho publicado en [1].

Para cumplir con el objetivo principal de este documente se realizan varios estudios sobre el estándar IEEE 802.16-2009 el cual es una enmienda que revisa y consolida todas las versiones anteriores del estándar dejándolos como obsoletos. Corresponde a la versión más estable hasta el momento de WiMAX, el cual ha sido estudiado a fondo e interpretado en [3]. Este trabajo se centra únicamente en el estudio de la capa física FIXED WirelessMAN OFDM sobre el cual se realizarán los estudios y análisis.

El modelo de propagación propuesto por Yon Soo Cho es una llave, la cual motiva al desarrollo de este trabajo ya que con el modelo matemático de las pérdidas del canal se diseña un canal inalámbrico para poder simular la manera en la que el ruido afecta a cada uno de los símbolos transmitidos por el mismo y conocer el modo de funcionamiento e importancia de todas las etapas de WiMAX que se plantean en el estándar IEEE 802.16-2009.

Para realizar la implementación del simulador se utiliza la herramienta computacional MATLAB® en la versión 7.10.0.499 (R2010a), y se programa únicamente utilizando los comandos disponibles en el modo edit y la interface GUIDE.

El resto de este trabajo está organizado en 4 Secciones, la Sección II, indica los parámetros más importantes de la capa física WirelessMAN OFDM para poder entender el diseño del canal inalámbrico; la Sección III, presenta el diseño del programa, desde la formulación matemática hasta el diagrama de bloques que forman parte del programa, la Sección IV, muestra y analiza los resultados primordiales obtenidos de las simulaciones como la convalidación del modelo de propagación, pruebas realizadas, ventanas del simulador entre otros; finalmente, la sección V enlista las conclusiones y recomendaciones encontradas al final de este trabajo.

II. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE IEEE 802.16-2009

Es importante destacar las características principales que define el estándar que son necesarias para comprender el diseño del canal inalámbrico, si se desea observar todos los elementos del estándar consultar [2] lo referente a la capa física Fixed WirelessMAN OFDM.

A. Esquemas de Modulación

Se define 4 tipos de modulaciones disponibles: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM; en las cuales el número de bits de información (M) es igual a 1, 2, 4 y 6 respectivamente.

B. Tasas de codificación

El codificador de canal se forma a través de la concatenación de un bloque de Reed-Solomon y un codificador convolucional, el cual, mediante el uso del proceso conocido como 'punctured' obtiene diversas tasas de codificación. En la TABLA I. se indica la forma del codificador Reed-Solomon, la rata del codificador convolucional y la rata que resulta de la concatenación de ambos codificadores, la cual se usará para realizar los cálculos para el diseño del canal inalámbrico. [4]

TABLA I. RATAS DE CODIFICACIÓN

Modulación	Código RS	Rata de Código CC	Rata combinada
BPSK	(12,12,0)	1/2	1/2
QPSK	(32,24,4)	2/3	1/2
QPSK	(40,36,2)	5/6	3/4
16-QAM	(64,48,8)	2/3	1/2
16-QAM	(80,72,4)	5/6	3/4
64-QAM	(108,96,6)	3/4	2/3
64-QAM	(120,108,6)	5/6	3/4

C. Parámetros de la señal OFDM

Define los elementos que caracterizarán la señal que se enviará a través del canal inalámbrico.

1) Parámetros primitivos

- BW: Ancho de banda nominal de canal.
- Nused: Número de subportadoras usadas.
- n: Factor de muestreo. Este parámetro, en conjunción con el BW y Nused determinan el espaciado entre subportadoras y el tiempo útil de símbolo.
- G: Esta es la proporción del tiempo prefijo cíclico (CP) para el tiempo útil de símbolo.

2) Parámetros derivados

- N_{FFT}: Tamaño de la FFT, su valor es de 256.
- Frecuencia de muestreo

$$Fs=floor(n \times BW/8000)x8000 \quad (1)$$

- Espaciamiento de subportadoras

$$\Delta f=Fs/N_{FIT} \quad (2)$$

- Tiempo útil de símbolo

$$Tb=1/\Delta f \quad (3)$$

- Tiempo CP

$$Tg=G \times Tb \quad (4)$$

- Tiempo de Símbolo OFDM

$$Tsym=Tb+Tg \quad (5)$$

- Tiempo de Muestreo

$$Tsam= Tb/N_{FIT} \quad (6)$$

III. DISEÑO DEL PROGRAMA

A. Modelo de Propagación

El modelo propuesto por Yon Soo Cho se basa en estudios realizados sobre un canal log-normal con mediciones sobre un canal con *Shadowing* obtenidos por la empresa AT&T sobre su red WiMAX en zonas rurales, a partir de esto se destacan tres tipos de terrenos como se muestra en la TABLA II.

TABLA II. TIPOS DE TERRENO

Tipo de Terreno	Descripción
A	Terreno montañoso con densidad de obstrucciones moderadas o densas.
B	Terreno intermedio, con baja densidad de obstáculos, pérdidas en el canal intermedias.
C	Terreno plano con baja densidad de obstáculos.

Cada terreno se considera un valor de *shadowing* diferente en función del número de obstáculos que presente, y es necesario calcular todos los parámetros que se describen a continuación para poder estimar las pérdidas del canal.

1) Coeficiente de Correlación de la frecuencia

Permite que el modelo sea compatible con todas las frecuencias de operación.

$$C_f=6\log_{10}\left(\frac{f_c}{2000}\right) \quad (7)$$

2) Coeficiente de correlación de antena receptora

Permite realizar las correcciones de predicción de *shadowing* en el receptor, depende del tipo de terreno que se está estimando.

$$C_{RX}=\begin{cases} -10.8\log_{10}\left(\frac{h_{Rx}}{2}\right) & \text{para tipo A y B} \\ -20\log_{10}\left(\frac{h_{Rx}}{2}\right) & \text{para tipo C} \end{cases} \quad (8)$$

3) Factor del terreno

Describe las características del terreno en el modelo matemático

$$\gamma=a-bh_{tx}+\frac{c}{h_{tx}} \quad (9)$$

Los parámetros a, b, c dependen del tipo de terreno y se describen en la TABLA III. ; h_{tx} representa la altura del transmisor en metros.

TABLA III. VALORES DE LOS PARÁMETROS

Parámetro	Modelo de Propagación		
	Tipo A	*Tipo B*	*Tipo C*
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.005
c	12.6	17.1	20

4) Distancia de referencia modificada

Realiza una corrección al modelo para que el modelo sea compatible a cualquier distancia.

$$d_0' = d_0 10^{-\frac{c_f + C_{RX}}{10\gamma}} \quad (10)$$

Finalmente, utilizando (1), (2), (3), (4) y (5) se puede calcular la pérdida del canal de propagación del canal inalámbrico como se muestra en (6).

$$PL[dB] = \begin{cases} 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) & \text{para } d \le d_0' \\ 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0'}{\lambda}\right) + 10\gamma\left(\frac{d}{d_0}\right) + C_f + C_{RX} & \text{para } d > d_0' \end{cases} \quad (11)$$

donde:

λ: longitud de onda de la portadora
d: distancia en metros
PL: Pérdidas en dB del canal.

B. Diseño del canal inalámbrico

Lo primero que se debe hacer es el presupuesto de enlace, lo cual se muestra en la Figura 1. en el que se consideran las ganancias y pérdidas del sistema de comunicación, esto se calcula como se indica en (12) y (13).

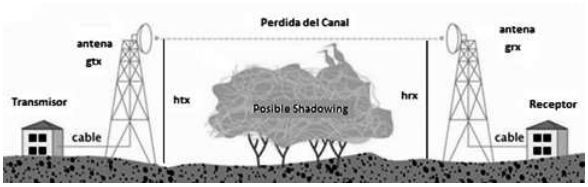

Figura 1. Presupuesto de enlace

$$PRx_{dBm} = PTx_{dBm} + GTx + GRx - L \text{ [dBm]} \quad (12)$$

$$L = Pathloss + Pérdida\ Cables + Pérdida\ Conectores \text{ [dB]} \quad (13)$$

Donde:
PRx: Potencia de Recepción en dBm.
GTx: Ganancia de Antena de Transmisión.
GRx: Ganancia de Antena de Recepción.
L: Pérdidas.
Pathloss: Pérdidas en el canal inalámbrico en dB.
Pérdida Cables: Pérdida en cables dB.
Pérdida Conectores: Pérdida Conectores dB.

Conocida la potencia de recepción, lo siguiente es calcular la relación señal a ruido (SNR)

$$SNR_{Rx} = PRx_{dB} - 10\log\square(K \times Ta \times B) \quad (14)$$

donde:

PRxdB: Potencia de Rx en dB (dB=dBm-30)
Ta: Temperatura Ambiente en el Ecuador (aproximadamente 18 y 25°C) en Kelvin
K: Constante de Boltzman $1{,}380 \times 10^{-23}$
B: Ancho de banda del receptor en Hz

Luego con el SNR es posible calcular el Eb/No (Relación energía de bit por densidad espectral de potencia de ruido):

$$\frac{Eb}{No}(dB) = 10\log\left(\frac{Tsym}{Tsam}\right) + SNR - 10\log(M) \quad (15)$$

donde:

Tsym: Tiempo de símbolo (véase (5))
Tsam: Tiempo de muestreo (véase (6))
M: Número de bits de información por símbolo

Con esto, finalmente se puede obtener la desviación estándar (σ) del canal AWGN (Additive White Gaussian Noise) con *shadowing* que se pretende diseñar, el cual se sumará con a la información enviada por el canal.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{rata * 2 * \frac{Eb}{No}}} \quad (16)$$

donde:

rata: Corresponde a la tasa de codificación usada.

C. Implementación del Transmisor WiMAX

En la Figura 2. se presenta el diagrama de bloques del transmisor WiMAX, el cual está programado en MATLAB®, según lo que establece el estándar IEEE 802.16-2009, realizando codificación de canal mediante la concatenación del codificador Reed-Solomon y el codificador convolucional.

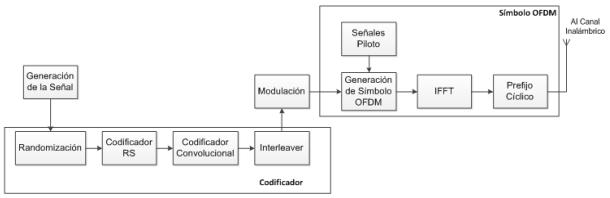

Figura 2. Diagrama de bloques del transmisor

D. Implementación del canal inalámbrico

En la Figura 3. se presenta la implementación de lo explicado en la sección B, esto permite generar el ruido AWGN a cada símbolo OFDM transmitido.

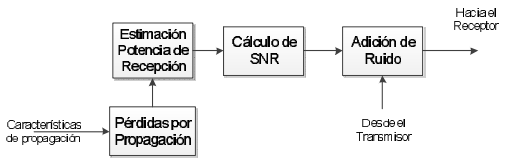

Figura 3. Diagrama de bloques del transmisor

E. Implementación delReceptor WiMAX

De igual forma que el transmisor, el receptor WiMAX está programado en MATLAB® como se indica en la Figura 4. , considerando todos los parámetros indicados en el estándar; utilizando la característica de un demodulador de distancia mínima y un decodificador de canal implementado con Viterbi de decisión fuerte.

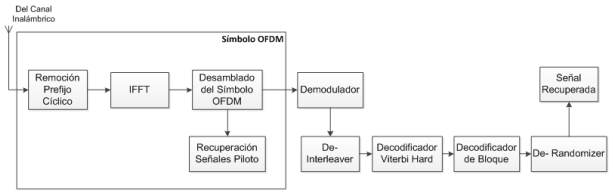

Figura 4. Diagrama de bloques del receptor

F. Interfaz Gráfica

La interfaz Gráfica o GUI, está programada puramente en GUIDE de MATLAB® y brinda un ambiente didáctico para el usuario y permite realizar las siguientes funciones:

- Simulación con una cadena de Bits predefinida
- Simulación con una señal de Audio
- Gráfica de Pérdidas del Canal en función de la distancia
- Gráfica BER Vs Eb/No
- Gráfica Potencia de Transmisión Vs. BER
- Gráfica Potencia de transmisión Vs. Eb/No

IV. RESULTADOS

A. Simulador

En la Figura 5. y Figura 6. Se presenta dos ventanas del GUI, las cuales permiten obtener las pérdidas del canal y obtener las gráficas del BER frente a la Eb/No. Estas dos ventanas sólo representan un ejemplo del simulador, cada una de las gráficas mencionadas en la sección III literal F. Interfaz Gráfica se podrá obtener a través de esta forma.

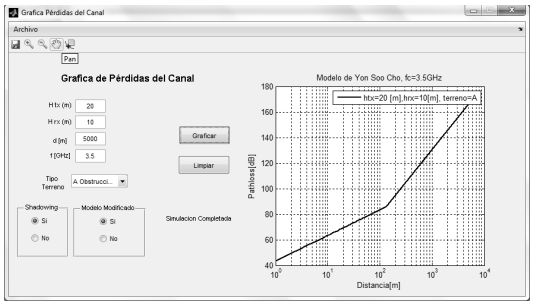

Figura 5. Interfaz pérdidas del canal

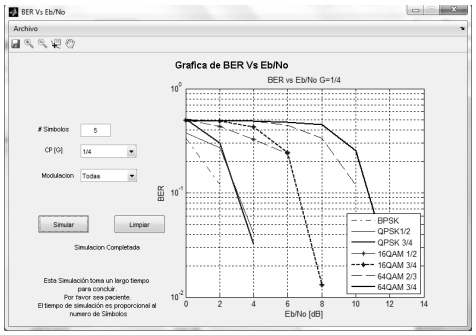

Figura 6. Interfaz BER Vs. Eb/No

B. Pérdidas del canal inalámbrico

Para estimar las pérdidas se utiliza la frecuencia de 3.5GHz con una altura de transmisor a 20m y el receptor a 10m para estimar ambientes rurales con el caso más crítico de obstrucciones el terreno A. En la Figura 7. se presenta las pérdidas del canal inalámbrico sin la corrección de *shadowing* en el cual se estima una pérdida de 169.6 dB a 5Km, mientras que, en la Figura 8. es presenta las pérdidas del canal pero con la modificación del valor de *shadowing* y se estima una pérdida de 165.9 dB.

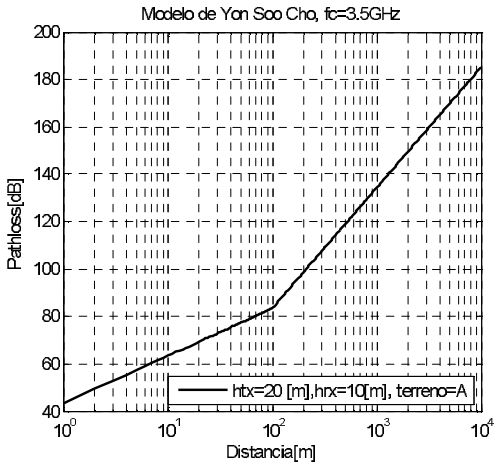

Figura 7. Terreno A sin correccion de shadowing

La diferencia de 3.7dB en ambos casos se debe al factor de corrección de *shadowing* propuesto por AT&T, el cual al estar medido sobre su red rural WiMAX, acota que se producen menores pérdidas de propagación.

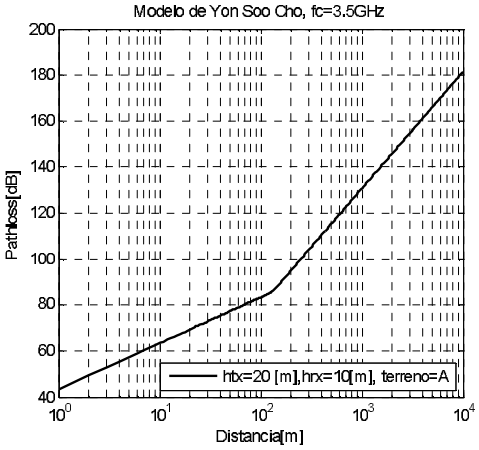

Figura 8. Terreno A con correccion de shadowing

C. Convalidación del modelo de propagación

Debido a que el modelo de propagación propuesto es nuevo es primordial compararlo frente a otros ya establecidos, en este caso se han seleccionado el modelo del SUI (Standford University Interim), el cual es diseñado exclusivamente para WiMAX para zonas urbanas y adaptado para zonas rurales, ver [5]; y el modelo de espacio libre, el cual es un modelo genérico

que solamente considera las pérdidas por el canal sin obstrucciones. Para las simulaciones se probará los tres ambientes consideraron las mismas características: alturas de antena, ancho de banda, presupuesto de enlace a 5Km, terreno tipo A y la modulación 64QAM ¾.

En la Figura 9. se muestran las pérdidas de propagación entre los tres modelos de estudio; a 5Km las pérdidas del modelo de Yon Soo Cho es igual a 165.94 dB, SUI, 171.74 dB y del espacio libre es, 117.3 dB. Entre el espacio libre y el modelo de Yon Soo Cho existe una diferencia de 47.7 dB debido a que el modelo de espacio libre no considera todas las características del terreno; pero, frente al modelo de SUI, el modelo de Yon Soo Cho estima 5.8 dB menos.

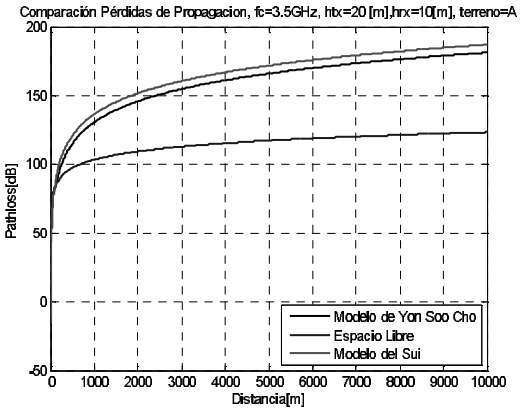

Figura 9. Comparación pérdidas de propagación

Corroborando con lo anterior, en la Figura 10. se observa los resultados del envío de bits a través de los tres canales; como se mencionó previamente debido a que el modelo de espacio libre tiene tan bajas pérdidas su probabilidad de error de bit (Pb_{error}) siempre es cero, mientras que entre SUI y el modelo de Yon Soo Cho existe una diferencia de 0.2W. La diferencia radica en las consideraciones de *shadowing* de cada modelo, mientras que SUI utiliza un valor fijado en 8.2dB, el modelo propuesto realiza correcciones para predecir el *shadowing*, a esto se debe la diferencia de 5.8dB entre los modelos, indicando que en ambientes rurales hay menos obstrucciones por lo que el *shadowing* es menor y lo que resulta que se requiere menor potencia para conseguir una transmisión sin errores.

D. Relaciones entre la Potencia de transmisión y el BER

En una transmisión real, al momento de realizar el cálculo del presupuesto de enlace siempre se trata de buscar una potencia de transmisión la cual nos permita reducir el BER, en el caso de que no se puede aumentar la ganancia de las antenas; es por ello que con este simulador se puede realizar esta estimación, para el caso de estas simulaciones se utiliza una potencia de transmisión entre 0 y 1W con intervalos de 100mW, altura de la antena transmisora de 20m, antena receptora 10m, cálculo del presupuesto de enlace a 5Km, pérdidas adicionales 2.8dB, BW igual a 3.5MHz, G=1/16.

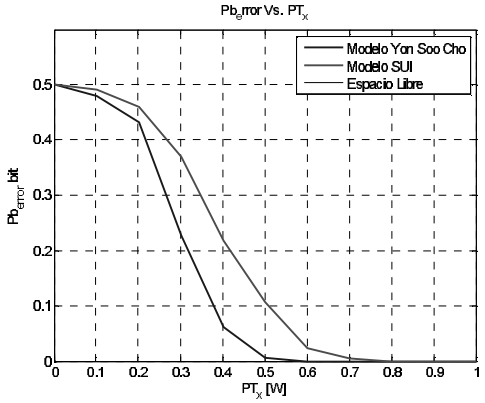

Figura 10. Convalidación del Modelo

El resultado de esta simulación se muestra en Figura 11. en la cual se observa el comportamiento del BER de todas las modulaciones con todas las ratas de codificación definidas en el estándar, esto se encuentra relacionado con la Eb/No.

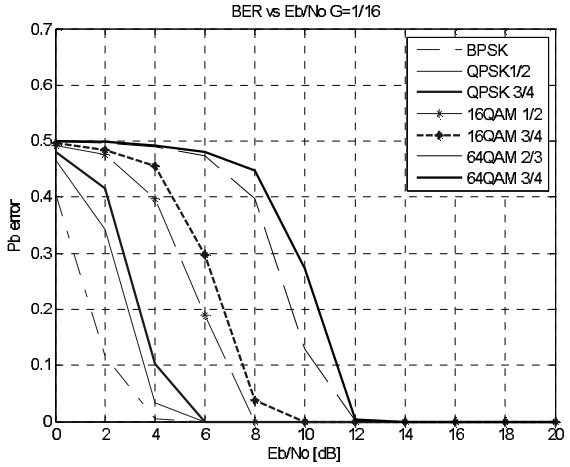

Figura 11. BER Vs.Eb/No

Pero lo que se quiere obtener es una relación entre la Ptx y el BER, para esto se hace necesario el uso de la Figura 12. en la cual se indica la relación entre la potencia de transmisión y la Eb/No indicada previamente en la Figura 11. Entonces, con el resultado obtenido de las figuras previas se puede obtener la TABLA IV. la cual es un resumen de los resultados obtenidos, y que permite saber cual es la potencia de transmisión necesaria para cada una de las modulaciones para obtener una comunicación sin errores (BER=0).

TABLA IV. RELACIÓN ENTRE PT_X Y E_B/N_O

Modulación	Eb/No [dB] para BER=0	Ptx [mW]
BPSK	4	<100
QPSK 1/2	6	<100
QPSK 3/4	6	<100
16 QAM 1/2	8	<100
16 QAM 3/4	10	200
64 QAM 2/3	12	400
64 QAM 3/4	12	600

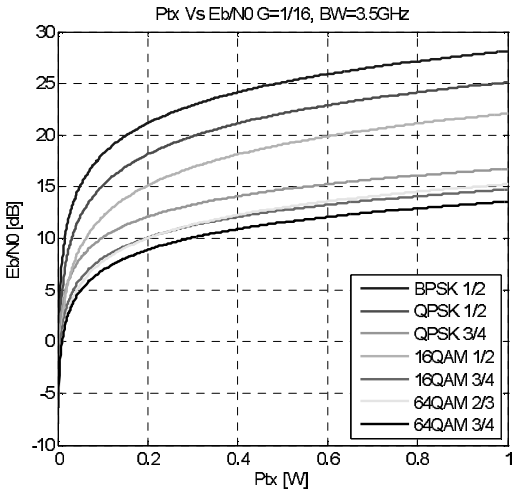

Figura 12. Ptx Vs. Eb/No

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizar una comparación con el modelo del SUI, el modelo de propagación propuesto por Yon Soo Cho es válido, y se destaca su funcionalidad únicamente para zonas rurales, sobre las cuales está diseñado inicialmente.

Si se desea utilizar una modulación con una tasa de codificación superior, se requiere mayor potencia de transmisión para obtener una Eb/No que permita una comunicación sin errores en la transmisión.

El simulador contempla las características elementales de WiMAX por lo que se puede mejorar su eficiencia mediante el cambio del codificador de canal implementado mediante la concatenación de Reed-Solomon y Códigos convolucionales y en su lugar utilizar códigos turbo que se describen en la parte avanzada del estándar IEEE 802.16-2009, mismos que consideran las situaciones para implementar un decodificador de Viterbi de decisión suave.

REFERENCIAS

[1] Soo Cho, Yong, "MIMO-OFDM WIRELESS COMMUNICATIONS WITH MATLAB ", Wiley-IEEE PRESS, Noviembre 2010.

[2] IEEE, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks.Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2009.pdf

[3] Barajas, Héctor, "WiMAX", http://es.scribd.com/doc/63052555/Equipo-2-WiMax-Documento, publicado 16 de Febrero de 2011.

[4] Haykin, Simon "MODERN WIRELESS COMMUNICATIONS", Segunda Edición, Prentice Hall, Estados Unidos de América 2005.

[5] Shahajahan, Mohammad, "Analysis of Propagation Models for WiMAX at 3.5 GHz", http://es.scribd.com/doc/54217861/28/Stanford-University-Interim-SUI-Model. Yánez, Álex, "Diseño de una red WIMAX (IEEE 802.16e) que brinde servicios de voz y datos en el sector de Sangolquí", Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí Septiembre 2008

[6] Galvis, Alexander "Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX", Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín 2006.

[7] Signal To Noise Ratio, http://www.rfcafe.com/references/electrical /snr.html .

RECONOCIMIENTOS

A los directores de este proyecto el Ing. Paúl Bernal, Ing. Román Lara y un colaborador el Ing. Daniel Altamirano quienes apoyaron el desarrollo del mismo.

BIOGRAFÍA

Jaime L. Jarrín Valencia, nació en Quito, Ecuador, el 16 de Septiembre de 1988. Estudió Ingeniería electrónica y Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica del Ejército desde el año 2007 hasta el año 2012. Entre los campos de interés están los sistemas de comunicaciones de banda ancha y el despliegue de nuevas tecnologías celulares como LTE.