

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO EN 2.4 GHZ



ANEXOS

**Maury Vanessa Tumbajoy Navia
Pedro Pablo Ortega Varón**

Directora: Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL
GNTT Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, 2012**

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA PROTOTIPO DE COMUNICACIÓN DE DATOS MULTIPROPÓSITO VÍA RADIO EN 2.4 GHZ



ANEXOS

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

**Maury Vanessa Tumbajoy Navia
Pedro Pablo Ortega Varón**

Directora: Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e InALámbricas -GRIAL
GNTT Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones
Señales y Sistemas de Acceso y Difusión Basados en Radio
Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de
Telecomunicaciones
Popayán, 2012**

CONTENIDO

	Pág.
ANEXO A	1
A.1 TECNICAS DE MODULACION	1
A.1.1 Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK).....	1
A.1.2 Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiana (GFSK).....	5
A.2 REGISTROS DE CONFIGURACION	9
ANEXO B	18
B.1 INTRODUCCION A LA HERRAMIENTA WIRELESS INSITE®.....	18
B.1.1 Diseño e Implementación	18
B.1.1.1 Características Principales	20
B.1.1.2 Pruebas y resultados.....	23
B.1.1.2.1 Simulaciones para Interiores segundo piso de Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.....	23
B.1.1.2.2 Simulaciones para Interiores tercer piso de Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.....	28
B.1.1.2.3 Simulaciones para Escenarios en Exteriores	30
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura A.1 Transformada de Fourier de un Pulso de Duración Finita	2
Figura A.2 Espectro de la Señal FSK.....	3
Figura A.3 Respuesta en Frecuencia de un Filtro Ideal Pasa Bajo	5
Figura A.4 Respuesta en Frecuencia de un Filtro Práctico Pasa Bajo	6
Figura A.5 Filtro Pasa Bajo nRF24LU1	7
Figura A.6 Transformada de Fourier de un Pulso Ensanchado.....	7
Figura A.7 Esquema de Modulación GFSK.....	8
Figura B.1 Escenario Modelado en Wireless Insite Correspondiente al Segundo Piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones ...	19
Figura B.2 Escenario Modelado en Wireless Insite Correspondiente al Tercer Piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones	19
Figura B.3 Ventana de Configuración de la Antena Receptora	21
Figura B.4 Ventana de Configuración de la Antena Transmisora.....	22
Figura B.5 Ventana de Configuración de la Onda Sinusoidal.....	22
Figura B.6 Simulación 1 a -12 dBm y -85 dBm.....	24
Figura B.7 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 1	24
Figura B.8 Simulación 2 a -18 dBm y -85 dBm.....	25
Figura B.9 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 2	25
Figura B.10 Simulación 3 a -12 dBm y -82 dBm.....	26
Figura B.11 Simulación 4 a -18 dBm y -82 dBm.....	26
Figura B.12 Simulación 5 a 0 dBm y -85 dBm.....	27
Figura B.13 Trazado de rayos simulación 5	27
Figura B.14 Simulación 5 a -12 dBm y -85 dBm.....	27
Figura B.15 Simulación 5 a -18 dBm y -85 dBm.....	28
Figura B.16 Simulación 6 0dBm y -85 dBm.....	28
Figura B.17 Simulación 6 -12dBm y -85 dBm.....	29
Figura B.18 Simulación 6-18dBm y -85 dBm.....	29
Figura B.19 Escenario Centro Deportivo Universitario (CDU)	30

Figura B.20 Simulación 1 0 dBm y -85 dBm.....	31
Figura B.21 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 1	31
Figura B.22 Simulación 2 -12 dBm y -85 dBm.....	32
Figura B.23 Potencia Recibida vs Distancia.....	32
Figura B.24 Simulación 3 a -18 dBm y -85 dBm.....	33

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla A.1 Registro de Configuración (CONFIG)	9
Tabla A.2 Registro EN_AA <i>Enhanced ShockBurst</i>	10
Tabla A.3 Registros EN_RXADDR	10
Tabla A.4 Registros SETUP_AW	11
Tabla A.5 Registros SETUP_RETR	11
Tabla A.6 Registros RF_CH.....	12
Tabla A.7 Registros RF-SETUP	12
Tabla A.8 Registros STATUS.....	12
Tabla A.9 Registros OBSERVE_TX	13
Tabla A.10 Registros CD.....	14
Tabla A.11 Registros RX_ADDR.....	14
Tabla A.12 Registro TX_ADDR	15
Tabla A.13 Registro RX_PW canal 0	15
Tabla A.14 Registro RX_PW canal 1	15
Tabla A.15 Registro RX_PW canal 2	15
Tabla A.16 Registro RX_PW canal 3	16
Tabla A.17 Registro RX_PW canal 4	16
Tabla A.18 Registro RX_PW canal 5	16
Tabla A.19 Registro FIFO_STATUS	16
Tabla A.20 Registro DYNPD	17
TABLA B.1 Parámetros del Modelo <i>Full 3D</i>	20
TABLA B.2 Parámetros de Configuración del Sistema a Simular	23
TABLA B.3 Potencia de Recepción para la Simulación 2.....	32
TABLA B.4 Potencia de Recepción para la Simulación 3.....	34

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACK	<i>Acknowledgement</i> , Reconocimiento.
ASK	<i>Amplitude Shift keying</i> , Modulación por Cambio de Amplitud.
BPSK	<i>Bi-phase Shift keying</i> , Modulación por Cambio Doble de Fase.
CD	<i>Carrier Detect</i> , Detección de Portadora.
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> , Verificación de Redundancia Cíclica.
DYNPD	<i>Enable Dynamic Payload Length</i> , Habilitar la Longitud Dinámica de la Carga útil.
EN_AA	<i>Enable Auto Acknowledgment</i> , Habilitar el Reconocimiento Automático.
FIFO	<i>First Input First Output</i> , Primero Entra Primero Sale.
FM	<i>Frequency Modulation</i> , Modulación en Frecuencia.
FSK	<i>Frequency Shift keying</i> , Modulación por Cambio de Frecuencia.
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiana.
GPIO	<i>Input/Output Port</i> , Puerto de Entrada y Salida.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia Intersimbólica.
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> , Amplificador de Bajo Ruido.
MAX_RT	<i>Maximum Number of TX Retransmits Interrupt</i> , Interrupción del Número Máximo de retransmisiones.
MSB	<i>Most Significant Bit</i> , Bit más Significativo.
PLL	<i>Phase Loop Locked</i> , Lazo de Enganche de Fase.
PSK	<i>Packet Error Rate</i> , Tasa de Error de Paquete.
QPSK	<i>Quaternary Phase Shift keying</i> , Modulación de Cambio de Fase de Cuatro Símbolos.

Rx	<i>Receiver, Receptor.</i>
RX_ADDR	<i>Receive Address, Dirección del Receptor.</i>
RX_DR	<i>Receive Data Ready, Datos Recibidos.</i>
RX_EMPTY	<i>Receive Empty, Receptor Vacío.</i>
RX_FULL	<i>Receive Full, Receptor Lleno.</i>
RX_PW	<i>Receive Payload Number, Número de bytes de la Carga Útil.</i>
RT	<i>Ray Tracing, Trazado de Rayos.</i>
SBR	<i>Shooting-and-Bouncing Ray, Método de Disparo y Rebote de Rayos.</i>
STATUS	<i>Status, Estado.</i>
Tx	<i>Transmitter, Transmisor.</i>
TX_ADDR	<i>Transmit Address, Dirección del Transmisor.</i>
TX_DS	<i>Transmit Data Sent, Datos Enviados.</i>
TX_EMPTY	<i>Transmit Empty, Transmisor Vacío.</i>
TX_FULL	<i>Transmit Full, Transmisor Lleno.</i>
UTD	<i>Uniform Theory of Diffraction, Teoría Uniforme de la Difracción.</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio, Relación de Ondas Estacionarias.</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network, Red de Área Local Inalámbrica.</i>

ANEXO A

Este anexo presenta el estudio del espectro de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK, Frequency Shift keying) y Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK, *Gaussian Frequency Shift Keying*), a partir del cual se calcula el ancho de banda de la señal.

A.1 TECNICAS DE MODULACION

La modulación es el proceso de variar la amplitud, frecuencia, o fase de una portadora de acuerdo a la señal de datos, esto implica el uso de una señal de datos en banda base, desplazando el espectro de la señal de datos hasta la frecuencia de la portadora [1]. El desplazar el espectro a altas frecuencias alta evita que las señales que se transmiten a través del espacio libre se interfieran [2].

Además, la modulación permite obtener eficiencia tanto de potencia como de ancho de banda, ofreciendo ventajas tales como alta inmunidad al ruido, facilidad de procesamiento, menor consumo de energía y menor costo, dando una mayor eficiencia al sistema, logrando de esta manera una mayor capacidad para transmitir grandes cantidades de información [3].

Dependiendo del tipo de modulación usada, la portadora puede variar en amplitud Modulación por Cambio de Amplitud (ASK, *Amplitude Shift Keying*), o en frecuencia Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK), o en fase Modulación por Cambio de Fase (PSK, *Phase Shift Keying*), y finalmente, en una combinación tanto de fase y amplitud [1].

La técnica de modulación usada por el módulo radio nRF24LU1 es la modulación GFSK [9]. Para determinar el ancho de banda de una señal con Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) se debe determinar con anterioridad el ancho de banda de una señal con Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK), ya que el funcionamiento de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) se deriva de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK).

A.1.1 Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK)

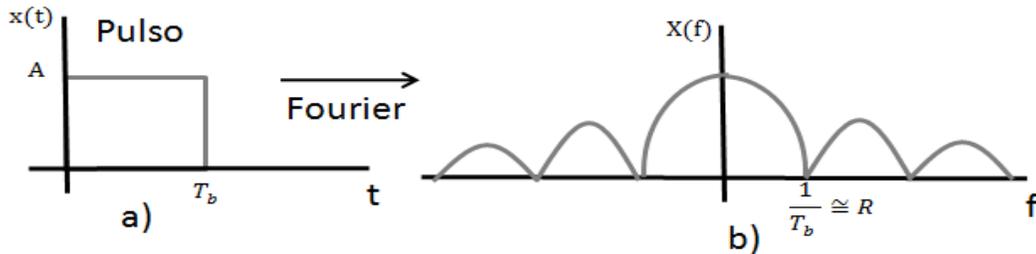
La transformada de Fourier¹ es una representación de las señales basada en la frecuencia.

En la figura A.1 (b) se observa la transformada de Fourier de un pulso rectangular de duración igual a T_b y amplitud A , que corresponde a un espectro continuo.

¹ El físico Francés, Joseph Fourier (1768-1830) desarrolló la transformada de Fourier.

Una medida del ancho espectral se toma en $\frac{1}{T_b}$ ya que para $X(f) < \frac{1}{T_b}$ se concentra la mayor cantidad de energía, siendo el ancho de banda aproximadamente igual a la velocidad de transmisión de datos R [4].

Figura A.1 Transformada de Fourier de un Pulso de Duración Finita



La Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK), es una modulación donde la amplitud de la señal portadora permanece constante, los 1s y los 0s binarios de la señal de datos son transmitidos conmutando la frecuencia de la portadora entre dos valores, así un 1 binario en la señal de datos ajusta la frecuencia de la portadora a la frecuencia de marca f_m y un 0 binario en la señal de datos ajusta la frecuencia de la portadora a la frecuencia de espacio f_s . Como la señal de datos cambia entre 1 y 0, la frecuencia de la señal analógica generada por el modulador FSK cambia entre f_m y f_s , el espectro de una señal con Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) se asemeja al espectro sobrepuesto de dos señales con Modulación por Cambio de Amplitud (ASK) en diferentes frecuencias portadoras [1].

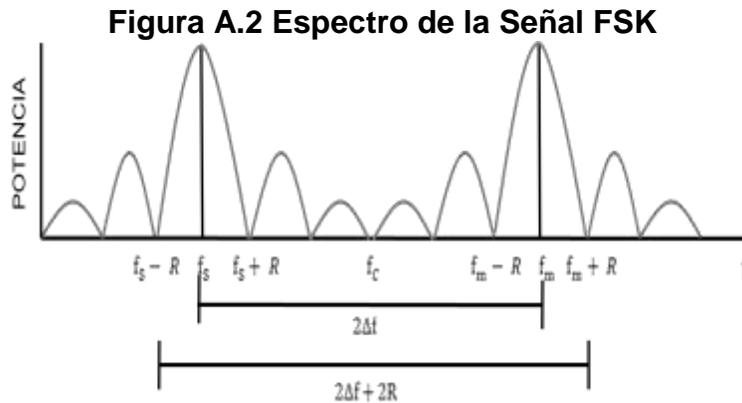
El estudio de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) se facilita estudiando las características en frecuencia, es decir el espectro de la señal FSK, donde se encuentra la frecuencia central² y la desviación de frecuencia³. De acuerdo a la figura A.2 la señal $X(f)$ se traslada alrededor de las frecuencias de marca f_m y espacio f_s , donde f_c es la frecuencia central. La desviación de frecuencia Δf es la magnitud de la diferencia entre la frecuencia central y ya sea f_m o f_s , como lo indica la ecuación A.1. También se observa que la magnitud de la diferencia entre las frecuencias de marca y espacio es igual a dos veces la desviación de la frecuencia como se muestra en la ecuación A.2 [1].

$$\Delta f = |f_c - f_m| = |f_c - f_s| \quad (A.1)$$

² La frecuencia central f_c es una frecuencia media entre las frecuencias de marca y espacio de un modem FSK.

³ La desviación de frecuencia Δf es la magnitud de la diferencia entre la frecuencia central y ya sea la frecuencia de marca o la frecuencia de espacio de un modem FSK.

$$2\Delta f = |f_s - f_m| \quad (\text{A.2})$$



El proceso de modulación genera energía sobre un amplio espectro, el espectro de una señal FSK depende de las frecuencias y de la tasa de bits usada, la relación $\frac{\Delta F}{R}$ determina la forma del espectro, donde ΔF es la desviación de frecuencia y R es la velocidad de transmisión de datos. Si la relación aumenta es porque ΔF aumenta o R disminuye, entonces el espectro se asemeja a dos espectros de señales ASK sobrepuestas con diferentes frecuencias de portadora y con una potencia pequeña entre los dos picos, es decir, el proceso de modulación genera energía en el espectro alrededor de las dos frecuencias usadas, lo que permite distinguir las frecuencias de marca y espacio. Por otro lado si la relación disminuye puede ocurrir que ΔF disminuye o R aumente, entonces la potencia entre la frecuencia de marca y espacio será mayor, lo que no permite distinguir la separación entre las frecuencias f_m y f_s [1].

En conclusión cuando la relación $\frac{\Delta F}{R}$ disminuye para una velocidad de transmisión de datos alta las frecuencias de marca y espacio se traslapan.

Suponiendo que los máximos del espectro de potencia contienen la mayor parte de la energía, el ancho de banda mínimo para pasar una señal FSK se puede aproximar como la ecuación A.3 [5].

$$Bw = |(f_s + R) - (f_m - R)| \quad (\text{A.3})$$

$$Bw = (|f_s - f_m|) + 2R$$

4 Δf para el módulo radio nRF24LU1 es de 160 KHz [9].

5 R para el módulo radio nRF24LU1 es de 1 Mbps y 2 Mbps [9].

Y como se muestra en la figura A.2 $|f_s - f_m|$ es igual a $2\Delta f$, el ancho de banda aproximado es como en A.4.

$$Bw = 2(\Delta f + R) \quad (A.4)$$

Donde:

R : Velocidad de transmisión de datos.

Además, y de acuerdo al espectro de la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) de la figura A.2 se obtiene el ancho de banda nulo a nulo de la señal, y se expresa en la ecuación A.5:

$$BW_{FSKnulo-nulo} = 2\Delta f + 2R \quad (A.5)$$

La Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) es una Modulación en Frecuencia (FM, *Frequency Modulation*) y el ancho de banda para sistemas FM analógicos está dado por la regla de Carlson.

Carlson estableció una regla general para estimar el ancho de banda de los sistemas con modulación angular, independiente del índice de modulación, la cual lleva por nombre regla de Carlson, esta regla establece que el ancho de banda necesario para transmitir una onda con modulación angular, es igual a dos veces la suma de la desviación máxima de frecuencia y la frecuencia máxima de señal moduladora, como se expresa en la ecuación A.6 [5].

$$B = 2(\Delta f + f_m) \text{ [Hz]} \quad (A.6)$$

Donde:

Δf : Desviación máxima de frecuencia [Hz].

f_m : Frecuencia máxima de la señal moduladora [Hz].

Al adaptar la regla de Carlson para la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK), f_m se convierte en R o velocidad de transmisión como lo indica la ecuación A.7

$$BW_{FSK} = 2(R + \Delta f) \text{ [Hz]} \quad (A.7)$$

Por lo tanto, se demuestra que el ancho de banda que se obtiene de la regla de Carlson, es igual al que se obtuvo de manera gráfica.

A.1.2 Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK)

En las comunicaciones de Radio Frecuencia (RF, *Radio Frequency*), es importante hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico, ya que este es un recurso limitado, por lo tanto, se debe reducir a un mínimo el ancho de banda ocupado, utilizando un filtro de Conformación de Pulsos (*Pulse Shaping*⁶). El propósito del filtro es hacer más adecuada la señal para su transmisión por el canal de comunicación, al reducir o limitar el ancho de banda ocupado, en comparación con el ancho de banda ocupado por los pulsos rectangulares [6].

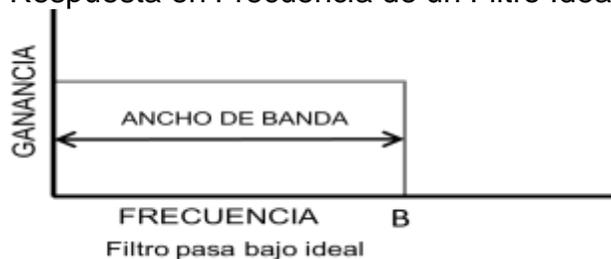
El filtro de conformación de impulsos se coloca antes de la modulación, debido a que este filtro ensancha y suaviza el pulso, atenuando las componentes altas de frecuencia, reduciendo el espectro y por lo tanto disminuyendo su ocupación, sin embargo y debido al ensanchamiento de los pulsos se puede introducir distorsiones aumentando el riesgo de Interferencias Intersimbólicas (ISI, *Intersymbol Interference*) que llegaría a degradar la calidad de la transmisión de los datos. Existen diferentes métodos para el diseño de filtros de conformación de impulsos, entre los tipos de filtros conocidos están PCM (*Pulse-Code Modulation*), BPSK (*Bi-phase Shift keying*), QPSK (*Quaternary Phase Shift keying*), GMSK (*Gaussian Filtered Minimum Shift keying*), y GFSK [7].

En este trabajo de grado se usa la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), que hace uso de un filtro pasa bajo gaussiano, este filtro limita las frecuencias que pueden ser transmitidas sin atenuación de acuerdo al valor del parámetro BT_b . La limitación de las frecuencias que se transmite por un sistema se denomina limitación de anchura de banda o limitación de banda [7].

En la figura A.3 se muestra la respuesta en frecuencia de un filtro ideal pasa bajo, todas las frecuencias de 0 Hz a la frecuencia de corte, se transmiten bien, pero las frecuencias mayores que la frecuencia de corte no se transmiten. La gama de frecuencias que se transmiten definen el ancho de banda B del sistema, para un filtro pasa bajo el ancho de banda es igual a la frecuencia de corte.

Un filtro ideal de pasa bajo eliminará todos las componentes de frecuencia que sean mayores que la frecuencia de corte B [8].

Figura A.3 Respuesta en Frecuencia de un Filtro Ideal Pasa Bajo

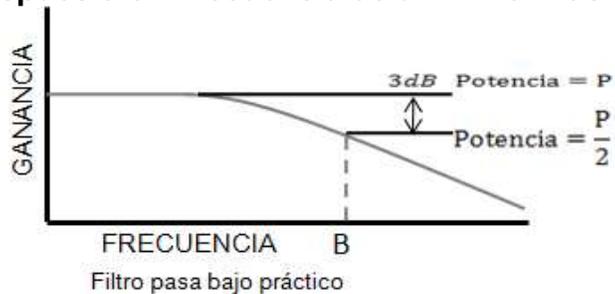


⁶Proceso de cambiar la forma de onda de los pulsos que se van a transmitir.

En la realidad no se pueden tener filtros ideales, en la práctica los filtros tienen una respuesta en frecuencia bastante constante dentro de una cierta gama, y gradualmente atenúan frecuencias que exceden estos límites.

La figura A.4 muestra la respuesta en frecuencia de un filtro práctico pasa bajo, las frecuencias que están muy por debajo de la frecuencia de corte son transmitidas uniformemente mientras que las frecuencias altas son atenuadas, la cantidad de atenuación de las frecuencias altas varía con la frecuencia, entre más alta es la frecuencia mayor será la atenuación. La frecuencia de corte de un filtro práctico es la frecuencia donde la potencia de la señal transmitida es reducida a la mitad ó 3 dB, lo que corresponde a una atenuación en la amplitud de $\frac{1}{2}$ veces la amplitud original, por lo tanto, el ancho de banda es la gama de frecuencias en que la ganancia se mantiene dentro de los 3 dB, el grado de atenuación en la frecuencia de corte del filtro es igual a 3 dB [8].

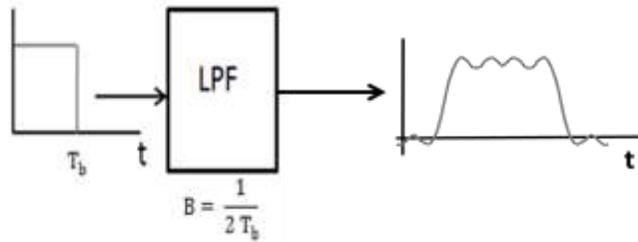
Figura A.4 Respuesta en Frecuencia de un Filtro Práctico Pasa Bajo



Al aplicar una señal al filtro pasa bajo en la salida se obtendrá una señal de banda limitada. Un pulso rectangular contiene componentes significativas de alta frecuencia, las cuales son atenuadas por el filtro pasa bajo, en la figura 4.5 se muestra un pulso de duración T_b e inicio en $t=0$, a la entrada de un filtro pasa bajo, en la salida del filtro se observa que la señal está distorsionada debido al parámetro B^7 , por lo que para transmitir de manera correcta un pulso, es necesario tener un buen ancho de banda, tal que: $B \gg \frac{1}{T_{bmin}}$, donde T_{bmin} representa una duración muy pequeña del pulso, sin embargo para detectar el envío de un pulso o medir su amplitud, es suficiente con $B \gg \frac{1}{2T_{bmin}}$ [4].

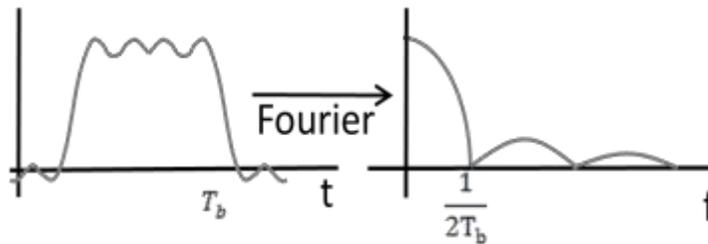
⁷ El parámetro BT para la tarjeta Nordic es de $\frac{1}{2}$, información brindada directamente por el fabricante.

Figura A.5 Filtro Pasa Bajo nRF24LU1



De acuerdo al análisis anterior, se observa en la figura A.6 una reducción espectral después de que el pulso ha sido suavizado por el filtro, atenuando las frecuencias que se encuentran por encima de la frecuencia de corte del filtro⁸.

Figura A.6 Transformada de Fourier de un Pulso Ensanchado



De la figura A.7, se tiene que la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), limita las frecuencias de acuerdo al parámetro BT_b , al ser este valor igual a $\frac{1}{2}$, el parámetro B se puede representar mediante la ecuación A.8.

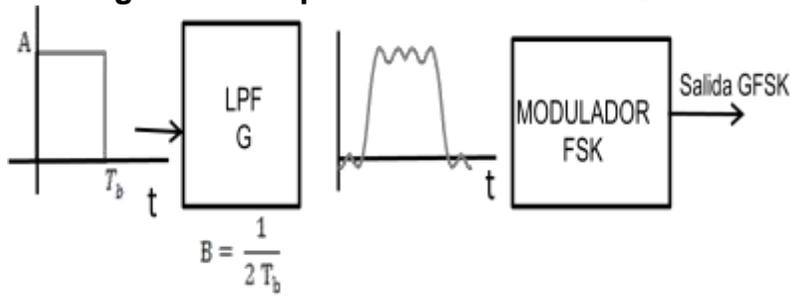
$$B = \frac{R_b}{2} \quad (A.8)$$

De acuerdo a lo anterior, se observa que al realizar la transformada de Fourier a un pulso de duración T_b , el filtro pasa bajo gaussiano atenúa las componentes de frecuencia superiores a $\frac{R_b}{2}$.

En la figura A.7 se muestra el esquema usado para la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), en la primer etapa se muestra un filtro pasa bajo gaussiano, al cual entra la señal de datos para ser modulada en la siguiente etapa por un modulador FSK, el objetivo de este tipo de modulación es obtener un sistema más eficiente en la ocupación del espectro con respecto a la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK), logrando un espectro de frecuencias significativamente más angosto.

⁸ La frecuencia de corte del filtro es $\frac{1}{2T_b}$.

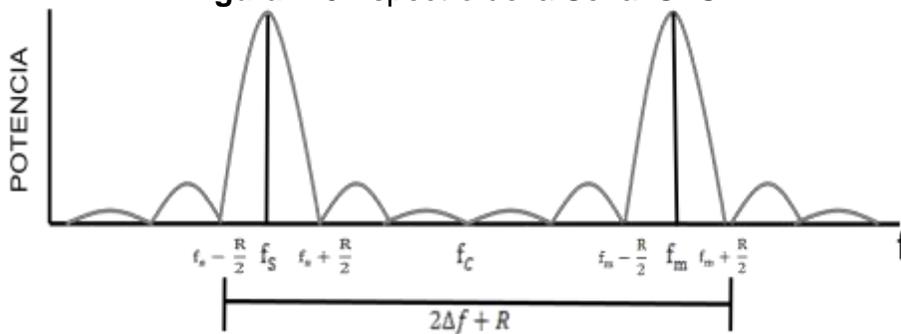
Figura A.7 Esquema de Modulación GFSK



De igual forma que la Modulación por Cambio de Frecuencia (FSK) el espectro de la señal se traslada alrededor de las frecuencias de marca y espacio, el ancho de banda nulo a nulo de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) sugiere reemplazar el término $2R$ por R como se evidencia en la figura A.8, la cual muestra el espectro de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK), por lo tanto la ecuación de ancho de banda nulo a nulo para la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) se escribe como la ecuación A.9:

$$BW_{GFSKnulo-nulo} = 2\Delta f \text{ [Hz]} + R \text{ [Hz]} \quad (A.9)$$

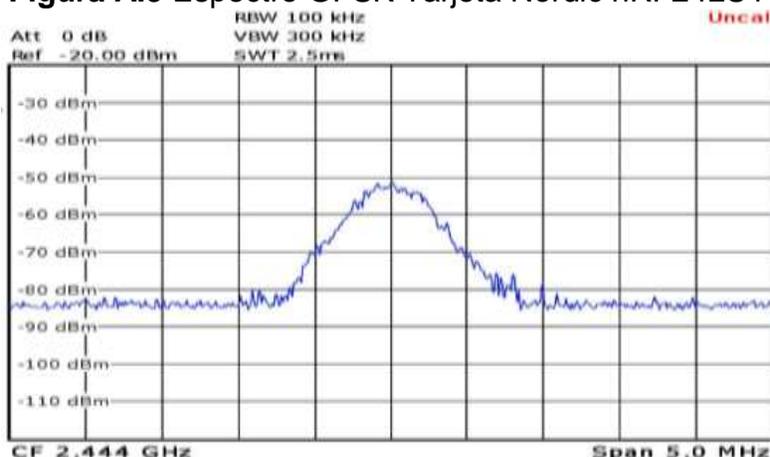
Figura A.8 Espectro de la Señal GFSK



El espectro de la Modulación por Cambio de Frecuencia Gaussiano (GFSK) del módulo radio nRF24LU1 se muestra en la figura A.9, se evidencia que la potencia entre f_m y f_s es alta, debido a la relación $\frac{\Delta F}{R}$, que para el módulo radio es igual a $0,16 * 10^{-3}$, en otras palabras, al disminuir relación $\frac{\Delta F}{R}$ ⁹ los espectros alrededor de las frecuencias de marca y espacio se traslapan dificultando su identificación, como se aprecia en la figura A.9.

⁹Valor común de la relación $\frac{\Delta F}{R}$ es de 0.3 [1].

Figura A.9 Espectro GFSK Tarjeta Nordic nRF24LU1



A.2 REGISTROS DE CONFIGURACION

Los registros de configuración se describen en la tabla A.1, los cuales ayudan a configurar y controlar los módulos radio [9].

Tabla A.1 Registro de Configuración (CONFIG)

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7	
MASK_RX_DR	6	0: Refleja que se activó RX_DR
MASK_TX_DS	5	0: Refleja que se activó TX_DS
MASK_MAX_RT	4	0: Refleja que se activó MAX_RT
EN_CRC	3	1: Habilita CRC. Se establece en alto cuando se habilita EN_AA
CRCO	2	Esquema de codificación 0: 1 byte 1: 2 bytes
PWR_UP	1	1: Encendido 0: Apagado
PRIM_RX	0	Control Rx/Tx 0: Tx 1: Rx

En la tabla A.2 se encuentran los registro para habilitar o deshabilitar la función de auto Reconocimiento (ACK).

Tabla A.2 Registro EN_AA Enhanced ShockBurst

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
ENAA_P5	5	1: Habilita ACK canal de datos 5
ENAA_P4	4	1: Habilita ACK canal de datos 4
ENAA_P3	3	1: Habilita ACK canal de datos 3
ENAA_P2	2	1: Habilita ACK canal de datos 2
ENAA_P1	1	1: Habilita ACK canal de datos 1
ENAA_P0	0	1: Habilita ACK canal de datos 0

La tabla A.3 muestra los registros para habilitar la dirección del receptor.

Tabla A.3 Registros EN_RXADDR

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
ERX_P5	5	1: Habilita canal de datos 5
ERX_P4	4	1: Habilita canal de datos 4
ERX_P3	3	1: Habilita canal de datos 3
ERX_P2	2	1: Habilita canal de datos 2
ERX_P1	1	1: Habilita canal de datos 1
ERX_P0	0	1: Habilita canal de datos 0

Los Registro usados para configurar la longitud del campo de dirección tanto de transmisión como de recepción, común a todos los canales de datos, se muestran en la tabla A.4.

Tabla A.4 Registros SETUP_AW

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:2	
AW	1:0	Longitud del campo de dirección Rx/Tx 00: No se usa 01: 3 bytes 10: 4 bytes 11: 5 bytes

En la tabla A.5 se describen los registros necesarios para la configuración de las retransmisiones automáticas.

Tabla A.5 Registros SETUP_RETR

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
ARD	7:4	Retardo de la retransmisión automática 0000: esperar 250µs 0001: esperar 500µs 0010: esperar 750µs 1111: esperar 4000µs
ARC	3:0	Contador de las retransmisiones automáticas 0000: Deshabilitar retransmisiones 0001: Hasta 1 retransmisión 1111: Hasta 15 Retransmisiones

El registro usado para la configuración de la frecuencia del canal de Radio Frecuencia (RF) se muestra en la tabla A.6.

Tabla A.6 Registros RF_CH

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7	
RF_CH	6:0	Establece la frecuencia de operación del canal RF en el transceptor

La tabla A.7 describe los registros necesarios para la configuración de los parámetros de Radio Frecuencia (RF), tales como la velocidad de transmisión, la potencia de transmisión, entre otros.

Tabla A.7 Registros RF-SETUP

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:5	
PLL_LOCK	4	Forzara la señal de bloqueo PLL
RF_DR	3	Velocidad de datos 0: 1 Mbps 1: 2 Mbps
RF_PWR	2:1	Establece la potencia de salida RF en el modo Tx 00: -18 dBm 01: -12 dBm 10: -6 dBm 11: 0 dBm
LAN_HCURRE	0	1: Establece ganancia LNA

Los registros de estado indican si los registros FIFO están llenos, vacíos y además muestran la llegada de nuevos datos, estos registros se muestran en la tabla A.8.

Tabla A.8 Registros STATUS

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7	
RX_DR	6	0: Indica cuando llegan nuevos datos RX FIFO 1: Clarea el bit

Tabla A.8 (Continuación)

TX_DS	5	0: Indica cuando el paquete es transmitido. Si se activa EN_AA este bit se coloca en 1 solo cuando se recibe ACK 1: Clarea el bit
MAX_RT	4	0: Interrupción del número máximo de retransmisiones del TX 1: Clarea el bit
RX_P_NO	3:1	Número de canales de datos de carga útil disponibles para ser leídos desde RX_FIFO. 000-101: Número de canales de datos 110: No se usa 111: Registro RX FIFO vacío
TX_FULL	0	Bandera para indicar que el registro FIFO TX está lleno 1: TX FIFO lleno 0: Disponibilidad en TX FIFO

En la tabla A.9 se describen los registros del transmisor usados para contar los paquetes perdidos y los paquetes retransmitidos.

Tabla A.9 Registros OBSERVE_TX

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
PLOS_CNT	7:4	Cuenta los paquetes perdidos
ARC_CNT	3:0	Cuenta los paquetes retransmitidos, el contador se resetea cuando empieza la transmisión de nuevos paquetes

La tabla A.10 muestra el registro de detección de Portadora.

Tabla A.10 Registros CD

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:1	
CD	0	Señal de detección de portadora. Detecta los sistemas de frecuencia fija (WLAN)

La tabla A.11 describe los registros que reciben las direcciones de los receptores.

Tabla A.11 Registros RX_ADDR

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
RX_ADDR_P0	39:0	E7E7E7E7E7, Recibe la dirección del canal de datos 0, máximo 5 bytes de longitud
RX_ADDR_P1	39:0	C2C2C2C2C2, Recibe la dirección del canal de datos 1, máximo 5 bytes de longitud
RX_ADDR_P2	7:0	C3, Recibe la dirección del canal de datos 2, solo LSB y los bytes MSB son igual al RX_ADDR_P1
RX_ADDR_P3	7:0	C4, Recibe la dirección del canal de datos 3, solo LSB y los bytes MSB son igual al RX_ADDR_P1
RX_ADDR_P4	7:0	C5, Recibe la dirección del canal de datos 4, solo LSB y los bytes MSB son igual al RX_ADDR_P1
RX_ADDR_P5	7:0	C6, Recibe la dirección del canal de datos4, solo LSB y los bytes MSB son igual al RX_ADDR_P1

Los registros para recibir la dirección del transmisor se muestran en la tabla A.12.

Tabla A.12 Registro TX_ADDR

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
TX_ADDR	39:0	E7E7E7E7E7, Recibe la dirección del transmisor. Se establece igual a la dirección del RX_ADDR_P0 para el manejo del ACK si se habilita el protocolo <i>Enhanced ShockBurst</i> en el dispositivo transmisor

Las tablas A.13, A.14, A.15, A.16, A.17 y A.18 muestran los registros para recibir el tamaño de los datos o carga útil en los receptores.

Tabla A.13 Registro RX_PW canal 0

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P0	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos 0 (1 a 32 bytes)

Tabla A.14 Registro RX_PW canal 1

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P1	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos1 (1 a 32 bytes)

Tabla A.15 Registro RX_PW canal 2

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P2	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos2 (1 a 32 bytes)

Tabla A.16 Registro RX_PW canal 3

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P3	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos3 (1 a 32 bytes)

Tabla A.17 Registro RX_PW canal 4

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P4	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos 4 (1 a 32 bytes)

Tabla A.18 Registro RX_PW canal 5

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
RX_PW_P5	5:0	Número de bytes de los datos en el canal de datos5 (1 a 32 bytes)

La tabla A.19 muestra los registros de estados FIFO.

Tabla A.19 Registro FIFO_STATUS

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7	
TX_REUSE	6	Usado para reutilizar los últimos datos transmitidos
TX_FULL	5	Bandera de lleno Tx FIFO 1: Tx FIFO lleno 0: Disponibilidad en Tx FIFO
TX_EMPTY	4	Bandera de vacio TX FIFO 1: Tx FIFO vacio 0: Datos en Tx FIFO
Reservado	3:2	

Tabla A.19 (Continuación)

RX_FULL	1	Bandera de lleno Rx FIFO 1: Rx FIFO lleno 0: Disponibilidad en Rx FIFO
RX_EMPTY	0	Bandera de vacío RX FIFO 1: Rx FIFO vacío 0: Datos en Rx FIFO

La tabla A.20 muestra los registros para activar la longitud dinámica de los datos o carga útil.

Tabla A.20 Registro DYNPD

NOMBRE	BIT	DESCRIPCION
Reservado	7:6	
DPL_P5	5	Longitud dinámica canal de datos 5
DPL_P4	4	Longitud dinámica canal de datos 4
DPL_P3	3	Longitud dinámica canal de datos 3
DPL_P2	2	Longitud dinámica canal de datos 2
DPL_P1	1	Longitud dinámica canal de datos 1
DPL_P0	0	Longitud dinámica canal de datos 0

ANEXO B

Este anexo realiza el análisis de la cobertura de un sistema radio de comunicación de datos multipropósito de corto alcance en la banda de 2.4 GHz en ambientes interiores y exteriores, mediante una serie de simulaciones con la herramienta de predicción de propagación *Wireless InSite*, usando la Técnica de Trazado de Rayos (RT, *RayTracing*) y el modelo de propagación *Full 3D* [10].

B.1 INTRODUCCION A LA HERRAMIENTA WIRELESS INSITE®

La herramienta *Wireless InSite*®, permite el análisis y diseño de sistemas de comunicación inalámbricos, modelando un escenario de simulación de forma bastante aproximada al escenario real, donde se especifican las características físicas del escenario, tales como longitud, ancho y altura de la estructura, además de la ubicación, tamaño y material de cada elemento que constituye la misma, como puertas, ventanas, corredores, salones, entre otros.

La herramienta es bastante precisa y considera las propiedades físicas de cada material, que constituye la estructura seleccionada tales como grosor, permitividad y conductividad, además de permitir que sean modificadas.

La herramienta proporciona representaciones visuales de los resultados, como áreas de cobertura, potencia recibida, pérdida de trayecto, entre otras.

A continuación se presenta la implementación de los parámetros del sistema prototipo de comunicación de datos implementado con la herramienta de desarrollo nRF24LU1 y los resultados de cobertura obtenidos para los diferentes escenarios interiores y exteriores.

Para cada una de las simulaciones se modifican los parámetros de configuración del sistema de comunicación como potencia de transmisión y velocidad, los resultados que se esperan obtener son el nivel de potencia recibido y los trayectos de la señal.

B.1.1 Diseño e Implementación

Los escenarios de simulación para interiores, corresponden a los pasillos del segundo y tercer piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, el modelado de los escenarios se realizó en los trabajos de grado titulados “Análisis de Cobertura de un Sistema Wi-Fi en Interiores, mediante la Técnica de Trazado de Rayos” [11] y “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el Modelo Peer-to-Peer” respectivamente.

Una vez identificados y caracterizados los materiales y los objetos que hacen parte de la estructura se procede a la construcción del plano en el editor de plano de planta de la herramienta, la cual brinda una perspectiva en dos y en tres dimensiones, la figura B.1 muestra el escenario en tres dimensiones del segundo piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones, y la figura B.2 muestra el escenario del tercer piso de la Facultad.

Figura B.1 Escenario Modelado en *Wireless Insite* Correspondiente al Segundo Piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones

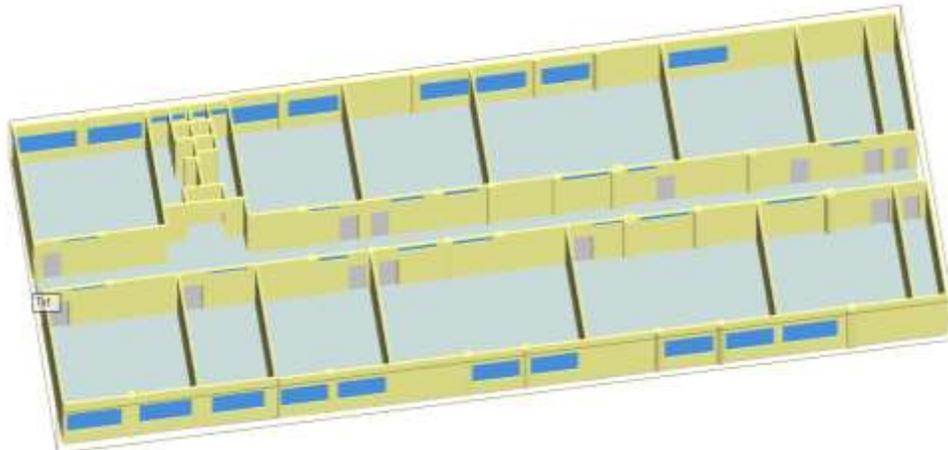
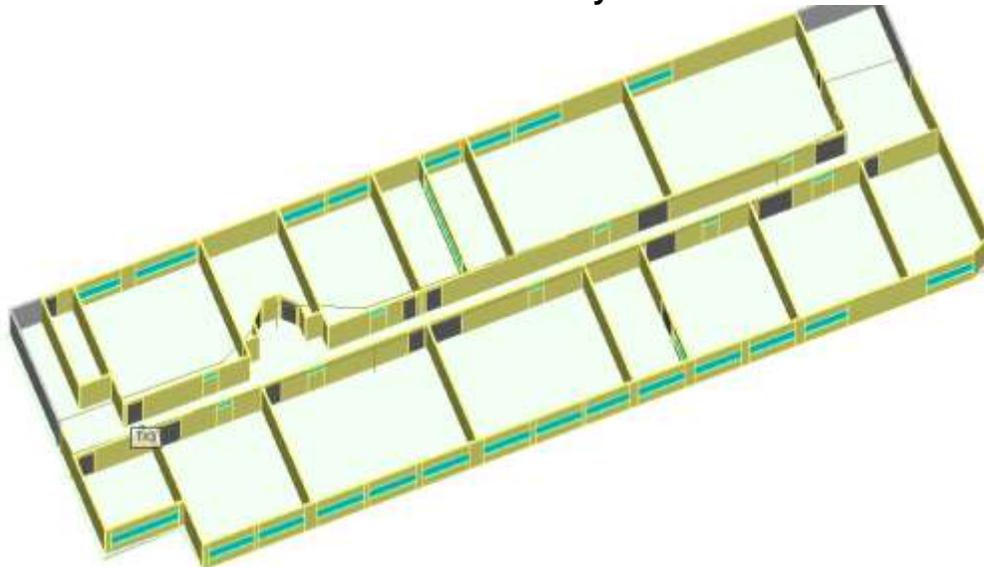


Figura B.2 Escenario Modelado en *Wireless Insite* Correspondiente al Tercer Piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones



B.1.1.1 Características Principales

- Área de Estudio

El área de estudio define una región del proyecto en la que se realiza la simulación. La herramienta permite configurar una o varias áreas de estudio, por lo que para las simulaciones en el segundo piso se definen diferentes áreas de estudio y para el tercer piso se limita el pasillo como área de estudio.

El modelo de propagación para estimar la cobertura en interiores es el modelo *Full 3D*, este modelo no tiene restricciones en cuanto a la forma de las estructuras, considera objetos con todo tipo de irregularidades, tiene en cuenta transmisiones a través de las superficies de los objetos y reflexiones en pisos, paredes y techo, por lo cual es el modelo más completo con el que cuenta la herramienta *Wireless Insite* para el análisis en escenarios interiores [10]. El modelo *Full 3D* es un modelo de trazado de rayos basados en la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*¹⁰), este modelo permite ajustar el espacio entre rayos, el número de reflexiones, difracciones, y transmisiones, los tres últimos valores representan la cantidad máxima que una trayectoria del rayo puede experimentar. Los parámetros para la aplicación del modelo *Full 3D* se muestra en la tabla B.1 [10].

TABLA B.1 Parámetros del Modelo *Full 3D*

Máximas reflexiones	30, asumiendo que no hay traspaso de señal en la superficie
Máximas difracciones	4 (SBR)
Transmisiones máximas	30, asumiendo que no hay reflexiones
Ambiente	Todos
Terreno	Todos
Interiores	Todos
Objetos	Todos
Alcance	Varía de acuerdo a la aplicación
Altura de las antenas	Todas
Tipo de antenas	Todos
Trazado de rayos	SBR
Frecuencia mínima	100 MHz
Frecuencia máxima	Depende de la aplicación

¹⁰La difracción de un rayo es la redistribución de la energía dentro de un frente de onda al interactuar con un objeto de tamaño aproximado a la longitud de onda de la energía radiante, el cual actúa como un foco emisor secundario [12].

El tiempo en el cálculo de los trayectos depende de la cantidad de reflexiones y transmisiones, este tiempo se incrementa cuando se establece la máxima cantidad de reflexiones y transmisiones posibles, incrementando además el tiempo de respuesta debido al procesamiento [11]. Por lo tanto para disminuir el tiempo de procesamiento se configura en 3 el número de reflexiones, en 1 el número de transmisiones y en 2 el número de difracciones.

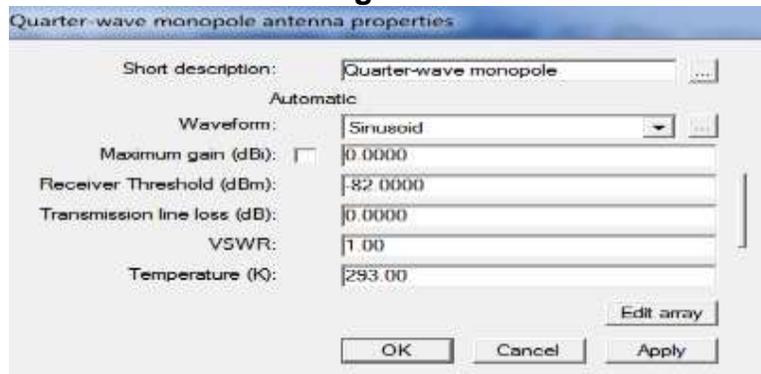
El método aplicado en la simulación es el método de Disparo y Rebote de Rayos (SBR, *Shooting-and-Bouncing Ray*)¹¹, el cual consiste en lanzar una serie finita de rayos con una separación angular constante desde la antena transmisora trazando el rayo con el fin de detectar si este incide sobre algún objeto o es recibido por la antena receptora, si el rayo incide sobre un objeto, se produce reflexión, refracción, dispersión o difracción, dependiendo de las propiedades geométricas del objeto. Cuando el rayo alcanza el terminal receptor, el campo eléctrico asociado a dicho rayo es calculado según el modelo de propagación implementado [13].

- Antena Receptora

La antena receptora se modela de acuerdo a los parámetros configurados en el módulo radio receptor nRF24LU1, la herramienta software cuenta con una base de datos para escoger el tipo de antena y su respectiva configuración.

En la figura B.3 se encuentra la configuración de los parámetros de la antena receptora, tipo de antena, sensibilidad¹², ganancia, y Medida de Desadaptación (VSWR, *Voltage Standing Wave Ratio*).

Figura B.3 Ventana de Configuración de la Antena Receptora



La figura de ruido para la antena receptora se configura en 7 dB¹³.

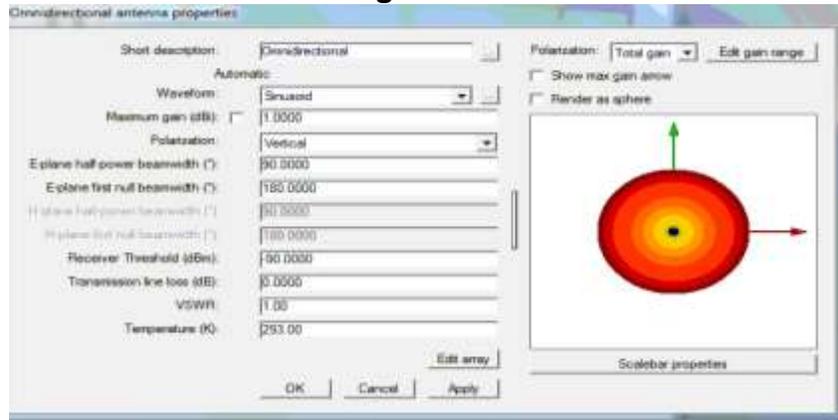
¹¹ El método de disparo y rebote de rayos se escogió de acuerdo a las conclusiones presentadas en la tesis “Análisis de cobertura de un sistema Wi Fi en interiores, mediante la técnica de trazado de rayos” [11].

¹² El receptor tiene una sensibilidad de -85 dBm a 1 Mbps y de -82 dBm a 2 Mbps.

- Antena Transmisora

La antena transmisora se configura de acuerdo al módulo radio transmisor nRF24LU1, la figura B.4 muestra la configuración de los parámetros de la antena transmisora, tipo de antena omnidireccional, ganancia, y sensibilidad.

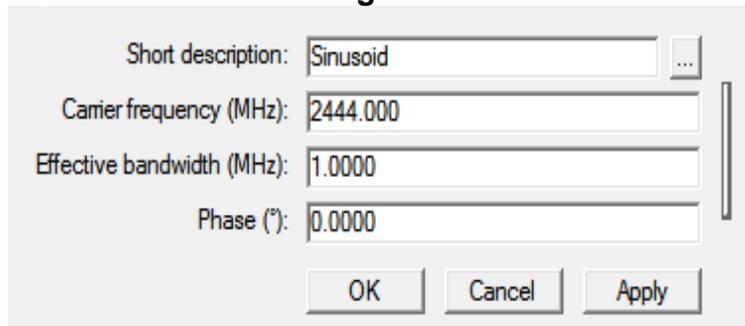
Figura B.4 Ventana de Configuración de la Antena Transmisora



- Onda Sinusoidal

En la figura B.5 se muestra la ventana que permite configurar los parámetros de la señal radiada por la antena transmisora, tales como, frecuencia central del canal, y el ancho de banda del mismo.

Figura B.5 Ventana de Configuración de la Onda Sinusoidal



- Transmisor y receptor

La herramienta software cuenta con diferentes tipos de configuraciones para los receptores y transmisores, tales como puntos, ruta, trayectoria xy y grilla.

¹³Valor tomado del trabajo de grado "Análisis del desempeño de un sistema prototipo de comunicación multipropósito vía radio en 2.4 GHz".

B.1.2 Pruebas y resultados

- Plan de pruebas

El plan de pruebas consiste en un número finito de simulaciones de las cuales se determina la cobertura dentro de un área de estudio específico, variando los parámetros de configuración de las antenas como potencia de transmisión, sensibilidad del receptor y ubicación del transmisor y de los receptores. Las pruebas permiten obtener resultados del nivel de potencia recibida en cada punto receptor, para luego comparar las medidas con las obtenidas en el campo real con el uso del kit de desarrollo nRF24LU1-DK.

Los parámetros de configuración del sistema a simular se establecen en la tabla B.2, los cuales corresponden a la configuración de los módulos radio nRF24LU1 de Nordic en la implementación del sistema real.

TABLA B.2 Parámetros de Configuración del Sistema a Simular

Potencia de transmisión	0 dBm, -12 dBm, -18 dBm
Frecuencia de operación	2.444 GHz
Número de canal	44
Ancho de banda del canal	1 MHz
Altura de antenas Tx- Rx	80 cm
Tipo de antena receptora	PCB impresa de landa cuartos
Tipo de antena transmisora	Omnidireccional
Ganancia en transmisión	0 dBi
Ganancia en recepción	0 dBi
Sensibilidad de antena receptora	-82 dBm, -85 dBm
ROE	1
Temperatura	293k

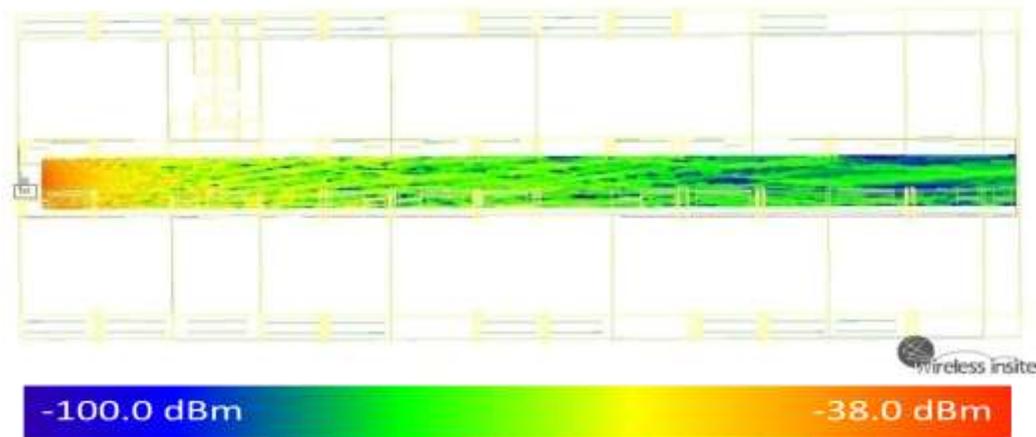
B.1.2.1 Simulaciones para Interiores segundo piso de Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

- *Simulación 1*: La primera simulación toma como área de estudio el pasillo del segundo piso de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, para esta simulación se ubica un transmisor en el lado izquierdo del inicio del pasillo y una grilla de 7524 receptores a lo largo de toda el área de estudio con una separación entre ellos de 12.5 cm, con el fin de visualizar la potencia en cada punto receptor del escenario. Los parámetros de configuración para esta simulación se establecen así: sensibilidad de la antena receptora -85 dBm lo que equivale a una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps y potencia de transmisión -12 dBm.

La figura B.6 muestra el resultado de la simulación 1, a lo largo del pasillo se presenta una variación de potencia de recepción por los efectos de la

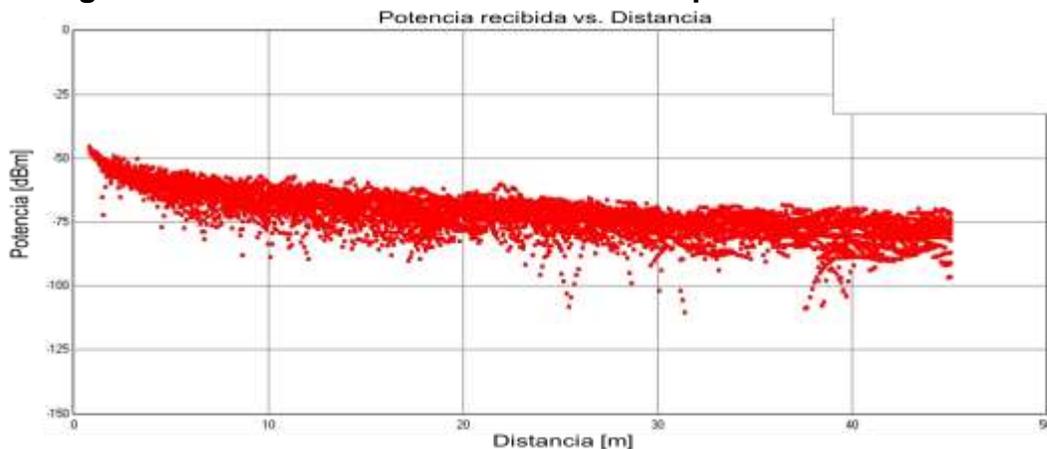
multitrayectoria¹⁴. El rango de variación de la potencia de recepción que se presenta en el escenario va desde -38 dBm hasta -100 dBm.

Figura B.6 Simulación 1 a -12 dBm y 1 Mbps



En la Figura B.7 se representan los resultados obtenidos en la simulación 1, se muestra como a una misma distancia del transmisor la potencia de recepción varía de acuerdo a la ubicación del receptor, además muy cerca al transmisor existe un nivel menor de variación de la potencia recibida, pero a medida que la distancia aumenta la variación es mayor, para los 10 m la diferencia puede ser de más 30 dBm.

Figura B.7 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 1

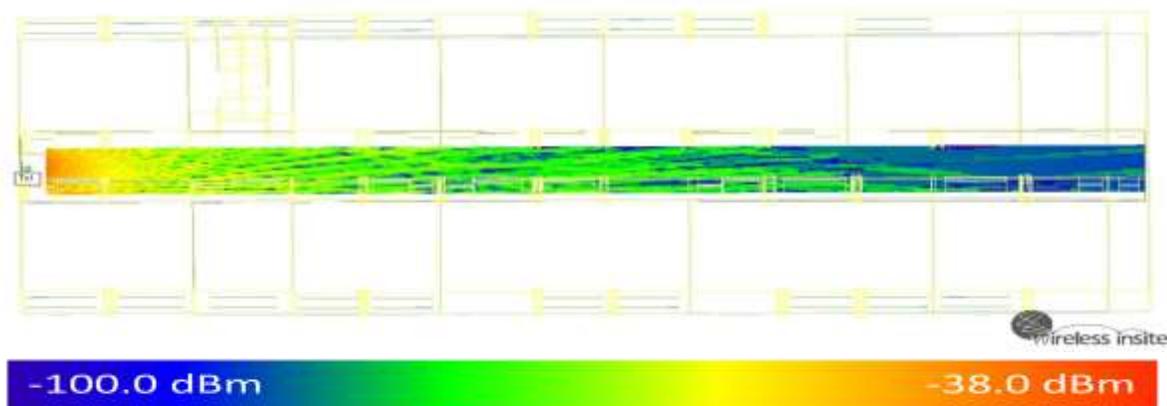


-Simulación 2: Se modifica la potencia de transmisión de la antena transmisora a -18 dBm.

¹⁴Dando como resultado un aumento y un decremento en el nivel de potencia recibido, debido a que la señal confinada en el pasillo experimenta los efectos de la interferencia constructiva y destructiva.

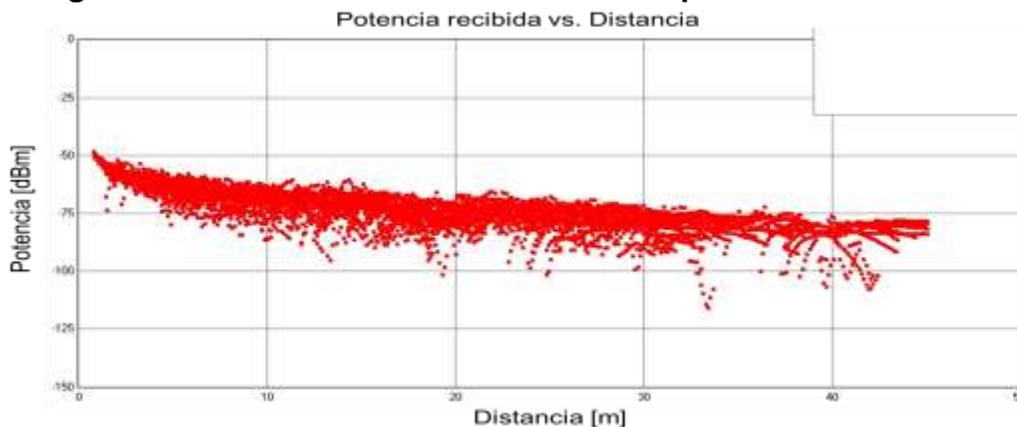
El sistema presenta en el escenario definido una variación de potencia de recepción en un rango de -38.0 dBm a -100 dBm, mostrando una disminución en la cobertura con respecto a la simulación anterior, como se muestra en la figura B.8.

Figura B.8 Simulación 2 a -18 dBm y 1 Mbps



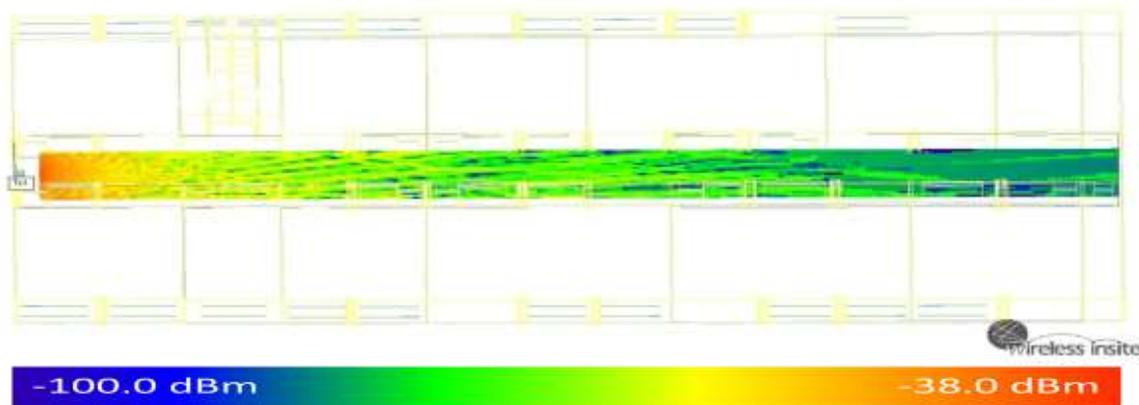
En la Figura B.9 se presentan los resultados obtenidos en la simulación 2, se nota que aumenta el número de puntos receptores que reciben bajos niveles de potencia, disminuyendo la cobertura del sistema simulado.

Figura B.9 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 2



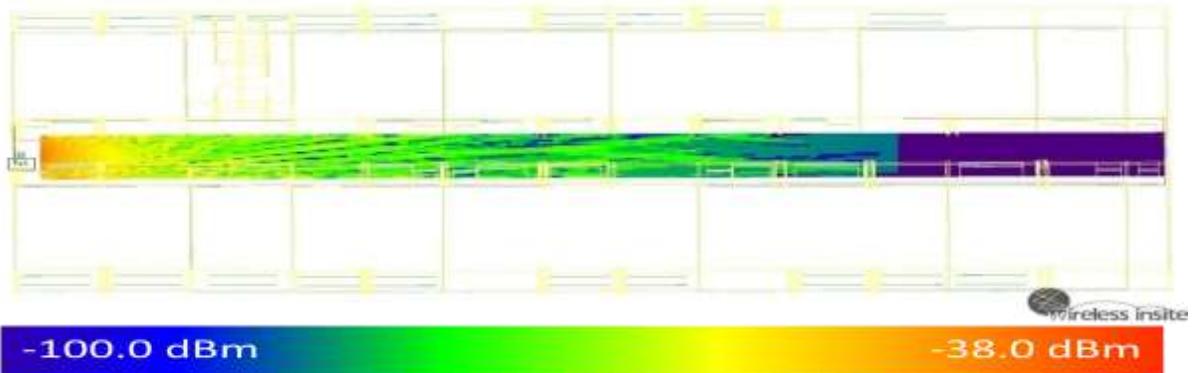
-*Simulación 3:* Esta simulación cambia la sensibilidad de la antena receptora a -82 dBm cambiando la velocidad de transmisión de datos a 2 Mbps y la potencia de transmisión a -12 dBm. El sistema presenta en el escenario definido una variación de potencia de recepción a lo largo del pasillo. La figura B.10 muestra como al disminuir la sensibilidad de las antenas receptoras disminuye la cobertura del sistema simulado.

Figura B.10 Simulación 3 a -12 dBm y 2 Mbps



-*Simulación 4:* Se modifica la potencia de transmisión a -18 dBm y sensibilidad de las antenas a -82 dBm. La figura B.11 representa el peor escenario ya que la potencia de transmisión configurada es la mínima permitida y la sensibilidad es también menor, la cobertura del sistema simulado disminuye considerablemente aún los receptores al final del pasillo que tienen línea de vista con el transmisor no captan la señal.

Figura B.11 Simulación 4 a -18 dBm y 2 Mbps



- *Simulación 5:* Esta simulación configura como área de estudio todo el segundo piso de la Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones, esta simulación permite observar el comportamiento del sistema simulado cuando hay obstáculos entre el transmisor y los receptores, el transmisor se ubica en el inicio del pasillo y los receptores se encuentran tanto en el pasillo como en los salones por lo que es necesario configurar una grilla con 31240 receptores separados entre sí cada 12.5 cm. La figura B.12 muestra el resultado de esta simulación, se observa que para los salones cercanos al transmisor se obtienen altos niveles de potencia, mientras que para los salones alejados hay una pérdida considerable de potencia, el trazado de rayos para este escenario de simulación se presenta en la figura B.13.

Figura B.12 Simulación 5 a 0 dBm y 1 Mbps

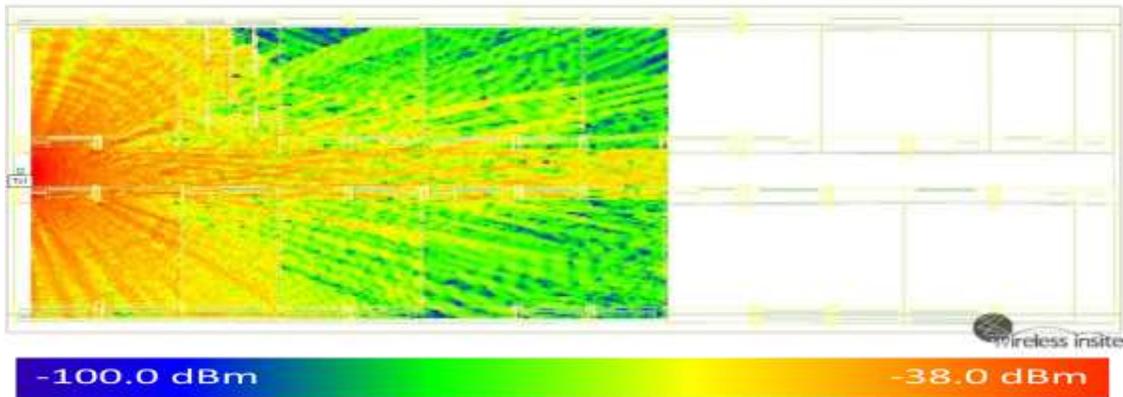
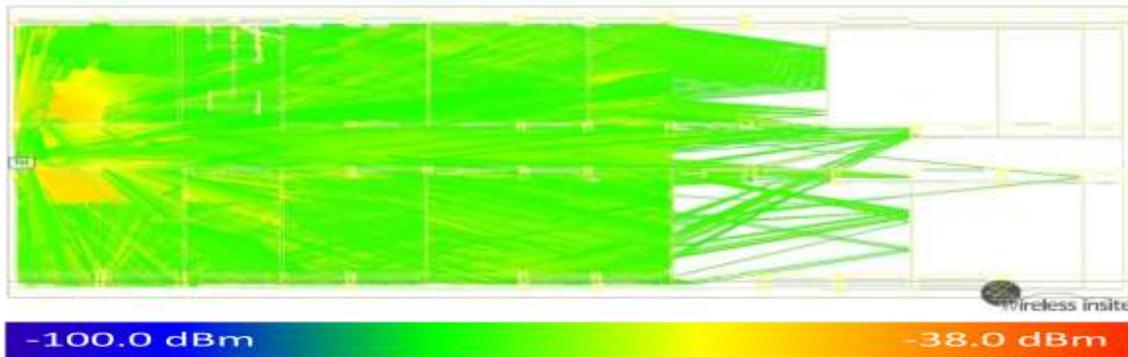


Figura B.13 Trazado de rayos simulación 5



A medida que se disminuye la potencia de transmisión las pérdidas en el trayecto aumentan, disminuyendo la cobertura del sistema simulado, como lo muestran las figuras B.14 y B.15.

Figura B.14 Simulación 5 a -12 dBm y 1 Mbps

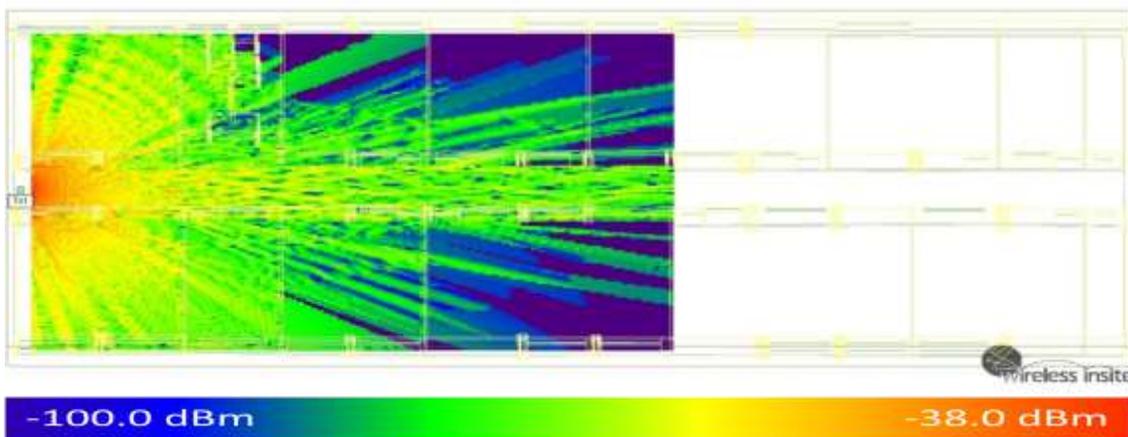
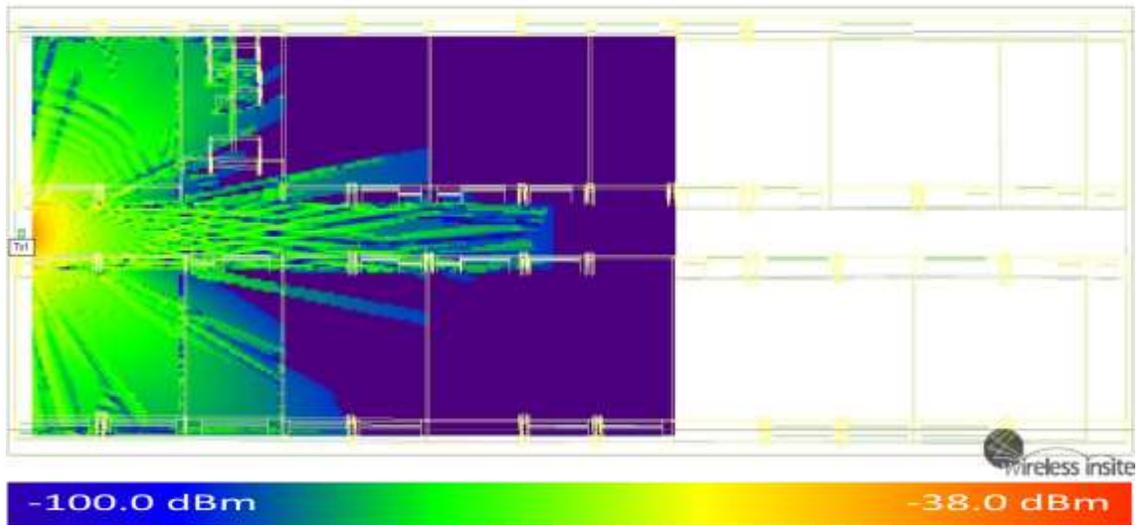


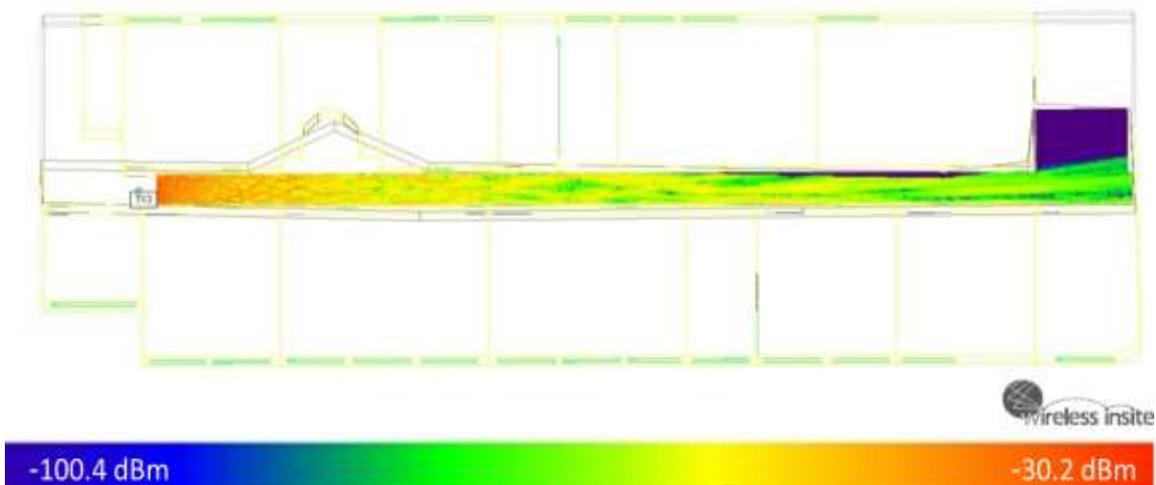
Figura B.15 Simulación 5 a -18 dBm y 1 Mbps



B.1.2.2 Simulaciones para Interiores tercer piso de Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

- *Simulación 6:* Esta simulación toma como área de estudio el pasillo del tercer piso de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, para esta simulación se ubica un transmisor en el lado izquierdo del inicio del pasillo y una grilla de 28125 receptores separados entre sí 6 cms a lo largo de toda el área de estudio, la simulación se extiende hasta el siguiente pasillo. Como se muestra en la figura B.16.

Figura B.16 Simulación 6 0dBm y 1 Mbps



Los puntos receptores que se encuentran a lo largo del pasillo captan buenos niveles de potencia mientras que los puntos receptores que no tienen línea de vista directa con el transmisor captan bajos niveles alrededor de los -100 dBm, y dado que la sensibilidad es de -85 dBm se degrada el desempeño del sistema simulado incrementando el valor de la Tasa de Error de Bit (BER).

Las figura B.17 y B.18 muestra los resultados arrojados por la herramienta *software*, cuando se varía la potencia de transmisión.

Figura B.17 Simulación 6 -12dBm y 1 Mbps

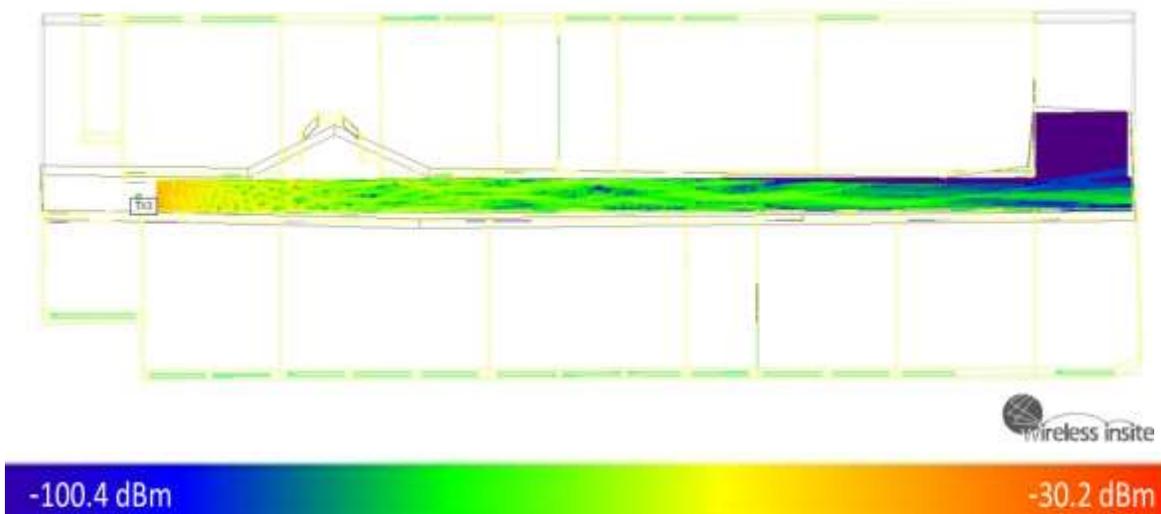
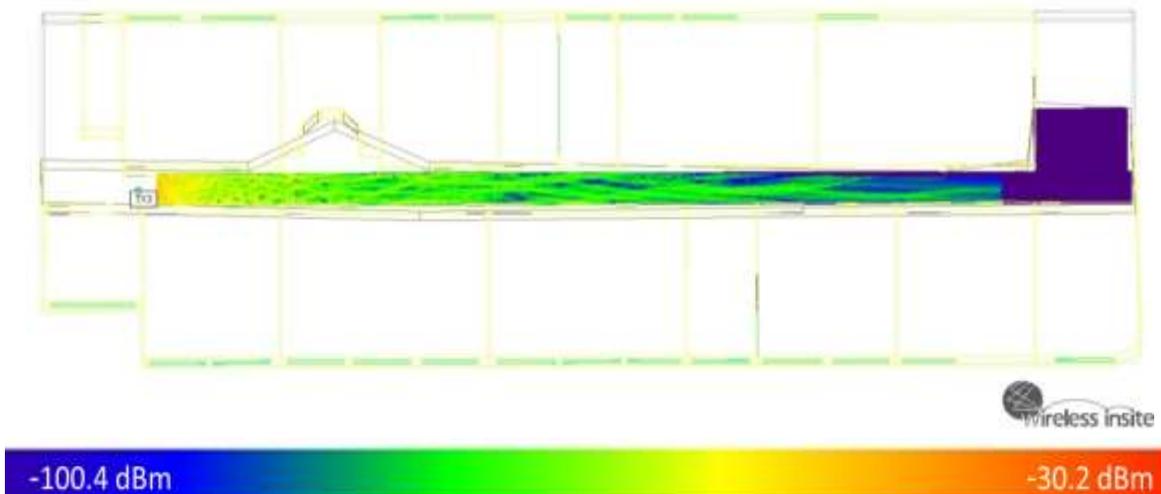


Figura B.18 Simulación 6-18dBm y 1 Mbps



B.1.2.3 Simulaciones para Escenarios en Exteriores

La figura B.19 presenta el escenario del Centro Deportivo Universitario (CDU) modelado con la herramienta de predicción de cobertura *Wireless Insite* en el desarrollo del trabajo de grado titulado “Evaluación y Análisis del Desempeño de un Sistema de Comunicación de Datos Vía Radio en la Banda de 900 MHz basado en Espectro Ensanchado por Saltos en Frecuencia utilizando el Modelo Peer-to-Peer” [14]. Este escenario presenta las condiciones de campo abierto en un ambiente libre de obstáculos, el cual permite realizar simulaciones con las mismas características del campo real.

Figura B.19 Escenario Centro Deportivo Universitario (CDU)



- *Simulación 1*: Esta simulación toma como área de estudio la gradería del CDU, para esta simulación se ubica un transmisor en el lado izquierdo de la gradería y una grilla de 144 receptores a lo largo de toda el área de estudio hasta los 30 m. En esta simulación, la sensibilidad de la antena receptora es de -85 dBm y la potencia de transmisión es de 0 dBm.

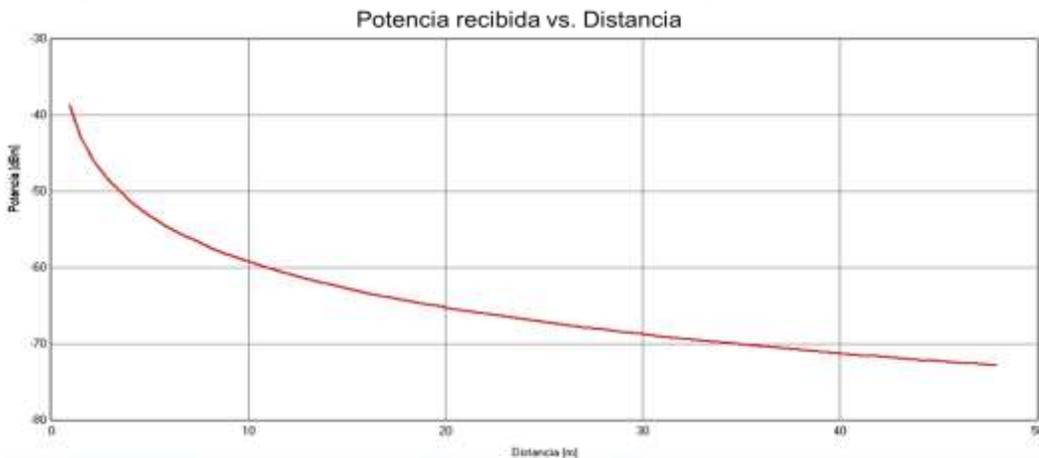
Los parámetros generales de configuración del sistema a simular se establecen en la tabla B.2. La figura B.20 muestra los resultados de la simulación.1, donde se muestra una disminución uniforme de la potencia de recepción a medida que la distancia aumenta, debido a que la señal se dispersa en todas las direcciones atenuando la señal.

En la figura B.21 se visualiza la curva de la potencia recibida para el escenario de exteriores, se observa como la potencia de recepción disminuye a medida que aumenta la distancia de forma constante, debido a que en espacio libre no hay efectos de multitrayectoria.

Figura B.20 Simulación 1 0 dBm y 1 Mbps



Figura B.21 Potencia Recibida vs Distancia para la Simulación 1



- *Simulación 2:* Se modifica la potencia de transmisión a -12 dBm y la sensibilidad en -85 dBm.

La figura B.22 ilustra el comportamiento del sistema simulado para el escenario en espacio libre o exteriores, del resultado se analiza que a menor potencia de transmisión menor cobertura del sistema simulado.

Para los receptores que se encuentran a una distancia superior a los 32 m la potencia es menor a -85 dBm, potencia que no es captada por los receptores ya que se supera el rango de la sensibilidad, como se muestra en la figura B.23.

Figura B.22 Simulación 2 -12 dBm y 1 Mbps

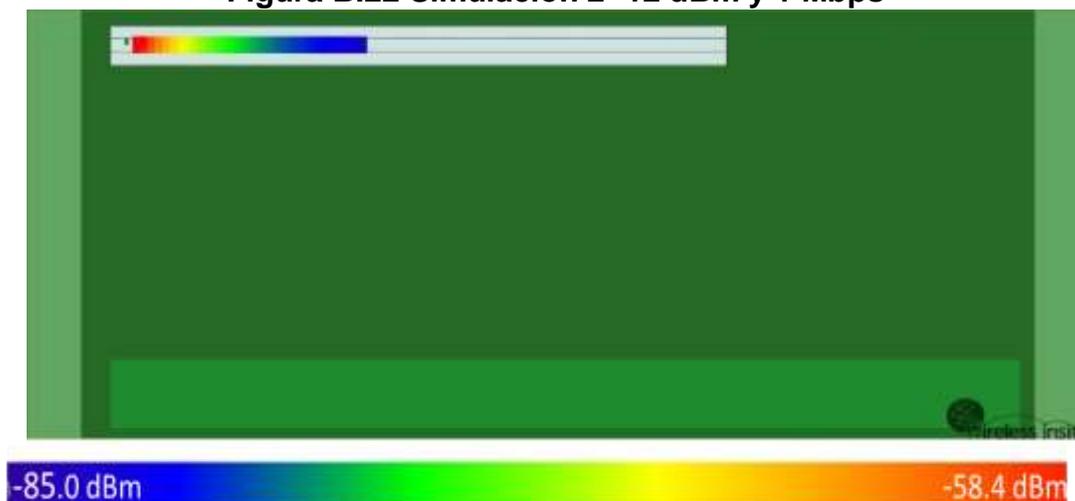
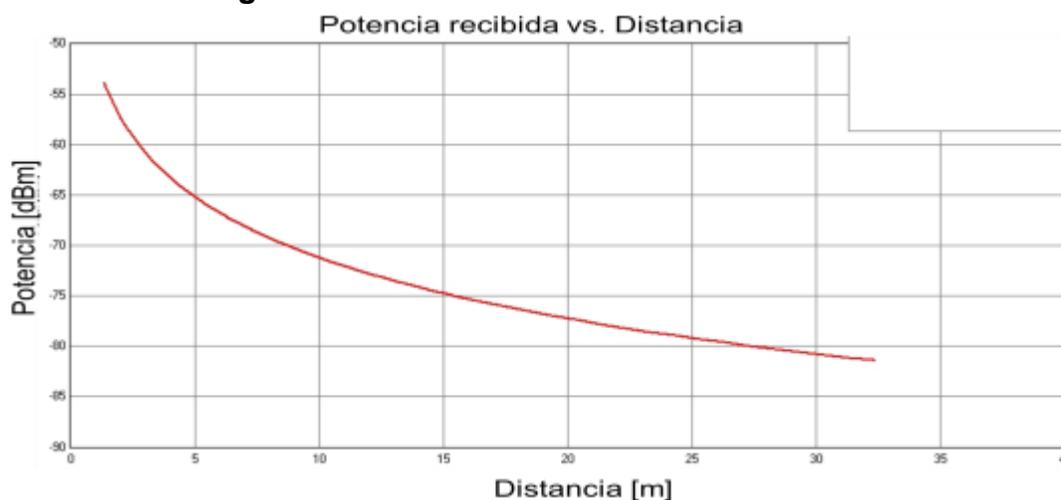


Figura B.23 Potencia Recibida vs Distancia



En la tabla B.3 se detalla la potencia de recepción para seis receptores, a diferentes distancias del transmisor, ubicados a lo largo de la gradería del CDU.

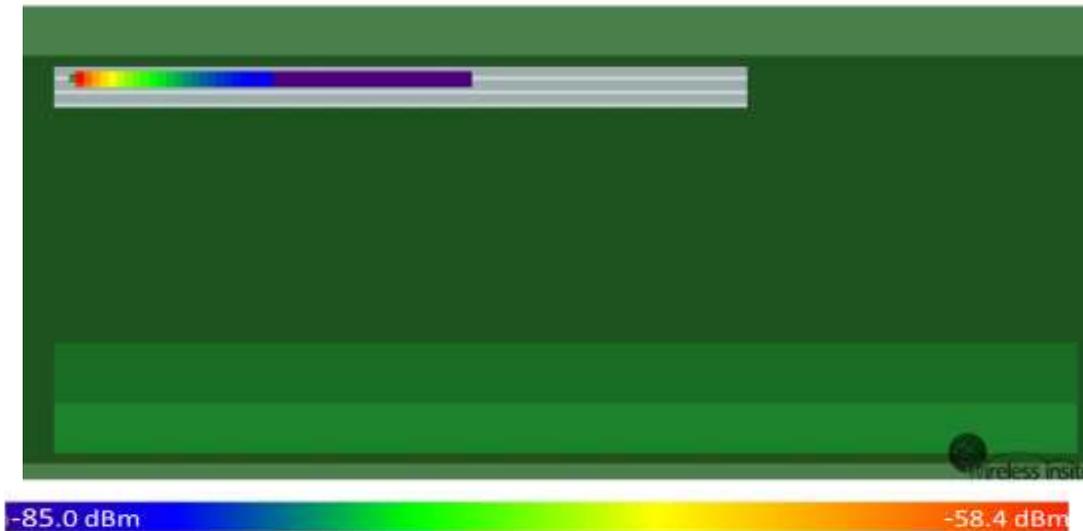
TABLA B.3 Potencia de Recepción para la Simulación 2

Distancia (m)	Prx (dBm)
1	-53.89
9	-70.58
17	-75.97
21	-77.78
23	-78.56
24	-78.92

- *Simulación 3*: Se modifica la potencia de transmisión a -18 dBm y sensibilidad a -85 dBm.

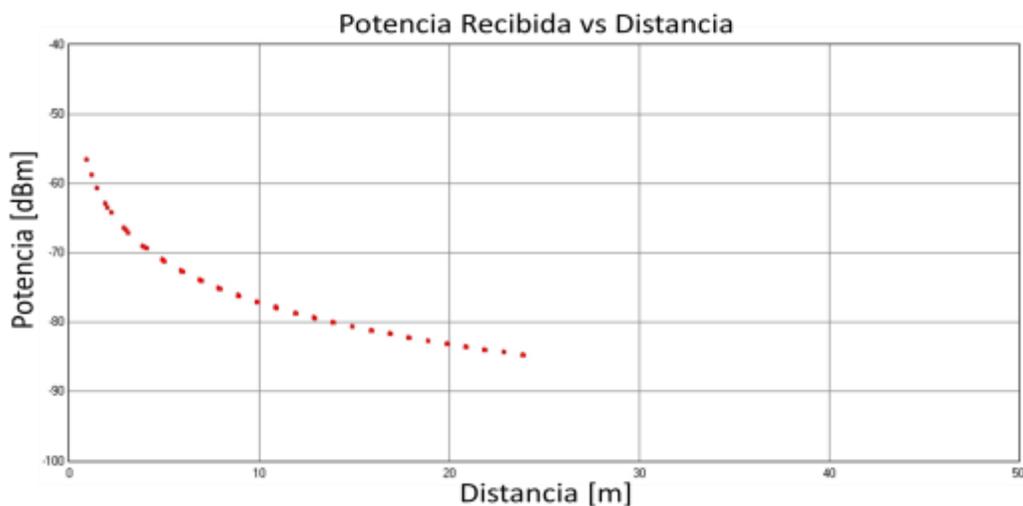
La figura B.24 muestra los resultados de la simulación 3, que comparados con los resultados de la simulación 2, se evidencia una disminución significativa de la distancia alcanzada ya que la potencia de transmisión es menor.

Figura B.24 Simulación 3 a -18 dBm y 1 Mbps



La figura B.25 detalla la potencia de recepción versus la distancia alcanzada de acuerdo a los parámetros configurados para la simulación 3.

Figura B.25 Potencia Recibida vs Distancia



En la tabla B.4 se detalla la potencia de recepción para diferentes receptores a distintas distancias del transmisor.

TABLA B.4 Potencia de Recepción para la Simulación 3

Distancia (m)	Prx (dBm)
1	-59.89
9	-76.58
12	-79.01
13	-79.69
14	-80.32
15	-80.90

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LABVOLT, Módems y transmisión de datos, volumen 3. Lab-Volt Quebec Ltda. Canadá, 1987.
- [2] E. Herrera. Comunicaciones I: Señales, Modulación y Transmisión. Universidad de Bradley: Editorial Limusa, México, 1999, pp. 149, 150.
- [3] L. Sienna. "QAM la Guía Completa". Centro de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones, 2003. [En línea]. Disponible: <http://www.cinit.org.mx/articulo.php?idArticulo=10>. [Consultado: Junio, 2011].
- [4] B. Carlson. Communication Systems. McGraw-Hill, 1986.
- [5] W. Tomásí. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. Prentice Hall, 2003, pp. 2-4.
- [6] Radares de perfil del viento. UIT-R M.2013, 1997. [En línea]. Disponible: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2013-1997-PDF-S.pdf. [Consultado: Julio, 2011].
- [7] D. Venkata, S. Pal y A. Prasad. "Simulation and realization of baseband pulse shaping filter for BPSK modulator," Air & Space Electronics, 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.rfdesign.com>. [Consultado: Agosto, 2011].
- [8] LABVOLT, Modelación por impulsos y muestreo, volumen 1. Lab-Volt Quebec Ltda. Canadá, 1986, pp 2-2.
- [9] Nordic Semiconductor ASA, "nRF24lu1 Single Chip 2.4GHz Transceiver with USB Microcontroller and Flash Memory," Nordic Semiconductor ASA, Noruega, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-F/nRF24LU1>. [Consultado: Mayo, 2011].
- [10] Remcom, "The Wireless Insite Users Manual" Remcom, Inc, 2009. [En línea]. Disponible: <http://www.remcom.com>. [Consultado: Octubre, 2011].
- [11] S. Agredo, J. Luna, "Análisis de cobertura de un sistema Wi-fi en interiores, mediante la técnica de trazado de rayos". Tesis, Universidad del Cauca, Colombia, 2011.

- [12] V. Campillo, J. M. Molina, "Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD". Tesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena, 2008.
- [13] N. A. El. Gader; "Outdoor Propagation Prediction an Measurement Point to Point for Wireless LAN Application", Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Malaysia, 2008.
- [14] D. García y L. Navarro. "Evaluación y análisis del desempeño de un sistema de comunicación de datos vía radio en la banda de 900 MHz basado en espectro ensanchado por saltos en frecuencia utilizando el modelo Peer to Peer", Trabajo de grado Universidad del Cauca, Colombia, 2011.