

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL CANAL DE
PROPAGACIÓN INVARIANTE EN EL TIEMPO
DEL ESTÁNDAR WiMAX IEEE 802.16d.”**

CARLOS ALBERTO NOVOA VELASCO

Sangolquí – Ecuador

2008

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el proyecto de grado para obtención del título de Ingeniería Electrónica “Análisis y Simulación del Canal de Propagación Invariante en el Tiempo del Estándar WiMAX IEEE 802.16d.” fue realizado en su totalidad por el señor Carlos Alberto Novoa Velasco con CI: 171705509-7 bajo nuestra dirección.

Ing. Darío Duque
DIRECTOR

Ing. José Robles M.B.A
CODIRECTOR

RESUMEN

En el presente proyecto se definen las características principales de la plataforma WiMAX, los esquemas que esta utiliza para la modulación de datos y las técnicas de acceso al canal, se analizan las propiedades del canal de propagación y los modelos aplicados a esta tecnología por medio de un software que permite analizar las propiedades de un canal sin línea de vista en diferentes entornos geográficos, y analizar el desempeño de la técnica de modulación.

El software presenta un ambiente de trabajo gráfico que permite la comprensión y análisis de los modelos de canal de propagación aplicados a la tecnología WiMAX en sistemas fijos, este software fue creado bajo las especificaciones indicadas en el estándar IEEE 802.16d y utilizando los modelos Interinos de la Universidad de Stanford (SUI), y nos permite observar las pérdidas que se presentan en el canal así como propiedades de gran utilidad en el diseño de redes inalámbricas de banda ancha.

Para el mejor entendimiento de la plataforma WiMAX, el software permite realizar la simulación del esquema de modulación OFDM aplicando uno de los modelos de canal que el programa permite simular, complementando los resultados obtenidos en la simulación del canal de propagación.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres que me han dado todo el apoyo incondicional, a mi hermano que siempre ha sido mi ejemplo y mi soporte, a toda mi familia que siempre estuvo pendiente de mi bienestar, a mis amigos, y a todos aquellos que caminaron conmigo a lo largo de mi carrera.

Quiero dedicar especialmente este trabajo a mi recién nacido sobrino Juan Caetano Novoa Muñoz, quien es ahora mi fuerte y mi motivo de superación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis padres por su apoyo, esfuerzo, por toda la confianza depositada en mí, y por hacer de mí la persona que soy hoy en día, agradezco a mi hermano y a mi familia por todo su esfuerzo y preocupación hacia mí.

Agradezco a mis amigos, quienes siempre creyeron y creen en mí y por los ánimos que me dieron, también les agradezco a mis compañeros y a mis profesores por todo lo compartido en este tiempo.

Quiero dar un agradecimiento especial a los ingenieros Darío Duque y José Robles, quienes no solo han sido mis profesores, también mis guías y amigos. Si olvidé mencionar a alguien mis sinceras disculpas, no están en el papel pero si en mi mente y corazón.

“El esfuerzo y constancia nos llevan a grandes logros, y son fruto de la sencillez, la humildad, y la confianza, las mejores virtudes de una persona.”

Carlos Alberto Novoa Velasco

PRÓLOGO

Durante los últimos años se han creado expectativas y realidades en torno al acceso de banda ancha de última milla. El cableado representa altos costes de instalación que no siempre justifican su tendido hasta áreas rurales o geográficamente inaccesibles. Llevar servicios ADSL a estas áreas no es económicamente efectivo para los operadores de telefonía.

En tal virtud se ha buscado nuevas formas de justificar esta inversión, y se ha logrado mediante las redes inalámbricas, entre ellas el sistema WiMAX. Ya que este estándar está diseñado para trabajar en medios tanto con línea de vista (LOS) como sin línea de vista (NLOS), se convierte en una de las mejores soluciones para proporcionar el acceso de banda ancha de última milla.

El canal radio de un sistema de comunicación inalámbrico es a menudo descrito como LOS o NLOS. En un enlace LOS, una señal viaja a través de un camino directo y sin obstáculos desde el transmisor al receptor. El enlace LOS requiere que la mayor parte de la primera zona de Fresnel este libre de cualquier obstrucción. Si este criterio no se cumple, entonces se produce una significativa reducción en el nivel de intensidad de la señal recibida.

En un enlace NLOS, una señal alcanza el receptor a través de reflexiones, difracciones y dispersiones. La señal que llega al receptor esta formada por una composición de señales que llegan a través de las anteriores formas de propagación. Estas señales tienen diferentes tiempos de retardo, atenuaciones, polarizaciones y estabilidad relativa frente a la señal que se transmite por el camino directo.

WiMAX es el acrónimo de Worldwide Interoperability for Microwave Access, que es el nombre que se le dio al estándar 802.16 que describe la "Interfaz Aérea para Sistemas Fijos de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha". WiMAX fue diseñado como una solución de última milla en redes metropolitanas o MAN para prestar servicios a nivel público.

La creciente demanda de acceso con banda ancha a internet, así como servicios de voz y datos obliga a buscar nuevas soluciones para satisfacer esta demanda. Es notorio que las redes cableadas XDSL y otras no lograran satisfacer esta necesidad, especialmente cuando hablamos de prestar servicios a zonas rurales, por tanto se requiere de la tecnología inalámbrica para satisfacer todas estas necesidades, WiMAX es una de estas soluciones.

La tecnología WiMAX, resuelve o minimiza los problemas resultantes de las condiciones NLOS mediante el uso de la tecnología OFDM, sub-Canalización, diversidad en la transmisión y en la recepción, modulación adaptativa, técnica de corrección de errores, etc.

Otra ventaja importante de WiMAX es que al usar el espacio como medio de transmisión, se evitan los gastos de cableado de los sistemas actuales, gracias a esto es posible comunicar lugares muy apartados que no cuentan con la infraestructura necesaria para su comunicación. Además considera una adecuada calidad de servicio (QoS) que permite una adecuada transmisión de datos, voz y video.

El modelamiento de canales de radio es uno de los aspectos más críticos a considerar en la construcción de herramientas software que apoyen los procesos de planeación y diseño de redes inalámbricas. Para el caso particular de WiMAX es de especial interés el modelo de canal utilizado para la predicción del comportamiento del sistema, más aun teniendo en cuenta que el sistema se ha definido para condiciones de LOS, y NLOS

Es pertinente crear un entorno de simulación para el canal de propagación invariante en el tiempo de WiMAX utilizando la herramienta del MATLAB con el objetivo de entender los factores que afectan a utilizar esta plataforma, especialmente cuando se utilizan las banda libre de WiMAX que corresponde a las frecuencias de 2.4 y 5 GHz.

Los modelos de propagación para el análisis de pérdidas en el espacio libre son presentados por algunos investigadores ó grupos como Okumura Hata ó Cost 231. Sin embargo muy pocos analizan o presentan modelos en las bandas para frecuencias superiores a 2.4 ó 5 GHz y existe muy poca documentación acerca de los modelos que se aplican a WiMAX. He aquí en donde se ha de investigar y realizar simulaciones de algunos modelos creados por la Universidad de Stanford.

El presente proyecto se enfocará en la simulación de seis modelos de propagación desarrollados por la Universidad de Stanford, a estos modelos se los denomina modelos SUI (Stanford University Interim models), y serán el centro de atención de este trabajo debido a que son los modelos mas comúnmente aplicados y recomendados por varias entidades, entre estas el “WiMAX forum”, en el diseño de redes WiMAX. También se simulara el desempeño de las técnicas OFDM y OFDMA que son parte importante de la plataforma WiMAX.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1

WiMAX

1.1	Introducción a WiMAX.....	20
	Esquemas de Modulación.....	22
	Capa Física (PHY).....	24
	Capa de Control de Acceso al Medio (MAC).....	24
	Técnicas de Corrección de Errores.....	25
	Control de Potencia.....	26
	Bandas de Frecuencia.....	26
	Banda de 2.4GHz.....	27
	Bandas de 5GHz.....	27
	WiMAX Forum.....	27
1.2	Estándares que regulan a WiMAX.....	28
	IEEE 802.16.....	28
	IEEE 802.16a.....	28
	IEEE 802.16c.....	29
	IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004).....	29
	IEEE 802.16e.....	30
1.3	El estándar IEEE 802.16d.....	30
1.4	OFDM en WiMAX.....	31
	Concepto de OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).....	32
	Distribución del espectro OFDM.....	33
	El símbolo OFDM.....	33
	Parámetros de la señal OFDM.....	34
	Bit Error Rate (BER).....	35

Probabilidad de Error de Bit (P_b).....	36
Peak to Average Ratio (PAR).....	36
1.5 OFDMA en WiMAX.....	38

CAPÍTULO 2

El Canal de Propagación

2.1 Introducción.....	40
Canales invariantes en el tiempo.....	42
Desvanecimientos.....	42
Desvanecimiento por Multitrayecto.....	43
Distribución de Rayleigh.....	43
Tasa de Nivel de Cruce (LCR).....	45
Duración Promedio de los Desvanecimientos (ADF).....	45
2.2 Canales de Propagación Aplicados a WiMAX.....	46
Pérdidas en el Espacio Libre.....	46
Retardo de Propagación por Multitrayecto.....	48
Características de Desvanecimiento.....	48
Distribución de los Desvanecimientos y Factor K.....	48
Espectro Doppler.....	49
Interferencia Co-Canal (C/I).....	50
Modelos Interinos de la Universidad de Stanford (SUI).....	51
2.3 Modelos SUI tipo A.....	53
Modelo SUI-5.....	53
Modelo SUI-6.....	54
2.4 Modelos SUI tipo B.....	55
Modelo SUI-3.....	55
Modelo SUI-4.....	56
2.5 Modelos SUI tipo C.....	57
Modelo SUI-1.....	57

Modelo SUI-2.	58
--------------------	----

CAPÍTULO 3

Desarrollo del Software en MATLAB

3.1 Programación de la Modulación OFDM.	59
3.2 Programación de la Técnica de Acceso OFDMA.	64
3.3 Programación de los modelos SUI tipo A.	66
Programación del Modelo SUI-5.	66
Programación del Modelo SUI-6.	69
3.4 Programación de los modelos SUI tipo B.	71
Programación del Modelo SUI-3.	71
Programación del Modelo SUI-4.	73
3.5 Programación de los modelos SUI tipo C.	75
Programación del Modelo SUI-1.	75
Programación del Modelo SUI-2.	77

CAPÍTULO 4

Simulación y Análisis de Resultados

4.1 Análisis de simulación de la modulación OFDM.	79
4.2 Análisis de simulación de la técnica de acceso OFDMA.	87
4.3 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo A.	90
Simulación del modelo SUI-5.	90
Simulación del modelo SUI-6.	97
4.4 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo B.	104
Simulación del modelo SUI-3.	104
Simulación del modelo SUI-4.	111
4.5 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo C.	118

Simulación del modelo SUI-1.....	118
Simulación del modelo SUI-2.....	125

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones.....	132
5.2 Recomendaciones.....	134

ANEXOS

Anexo A-1

CODIFICACIÓN EN MATLAB DEL SOFTWARE WiMAXchannel.....	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Esquema de modulación según la SNR.
Tabla 1.2.	Factor de muestreo.
Tabla 2.1.	Coefficientes dependientes del terreno.
Tabla 2.2.	Aplicación de los modelos SUI en función del tipo de terreno.
Tabla 2.3.	Modelo SUI-5.
Tabla 2.4.	Modelo SUI-6.
Tabla 2.5.	Modelo SUI-3.
Tabla 2.6.	Modelo SUI-4.
Tabla 2.7.	Modelo SUI-1.
Tabla 2.8.	Modelo SUI-2.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1. Esquema de enlaces LOS y NLOS.
- Figura 1.2. Modulación utilizada según la distancia a la estación base.
- Figura 1.3. Secuencia de ráfagas.
- Figura 1.4. Estándar IEEE 802.16.
- Figura 1.5. Espectro de una señal OFDM.
- Figura 1.6. División de las subportadoras en el estándar IEEE 802.16d.
- Figura 1.7. Símbolo OFDM.
- Figura 1.8. Respuesta de un amplificador de potencia.
- Figura 1.9. Diagrama de cancelación de picos.
- Figura 1.10. Agrupación de subportadoras.
- Figura 1.11. Asignación OFDMA.
- Figura 2.1. Sistema invariante en el tiempo.
- Figura 2.2. Distribución de Rayleigh.
- Figura 2.3. PSD redondeada.
- Figura 2.3. Efectos del margen de desvanecimiento en distribuciones C/I.
- Figura 2.4. Estructura de los modelos SUI.
- Figura 3.1. Forma de ingresar a MATLAB Guide.
- Figura 3.2. Consola de edición gráfica.
- Figura 3.3. Inspector de propiedades del espacio de trabajo.
- Figura 3.4. Entorno gráfico de la ventana inicial.
- Figura 3.5. Entorno gráfico de la ventana Modulación OFDM.
- Figura 3.6. Entorno gráfico de la ventana de información OFDM.
- Figura 3.7. Entorno gráfico de la ventana de gráficas OFDM.
- Figura 3.8. Entorno gráfico de la ventana de información OFDMA.
- Figura 3.9. Entorno gráfico de la ventana OFDMA1.
- Figura 3.10. Entorno gráfico de la ventana OFDMA2.

- Figura 3.11. Entorno gráfico de la ventana SUI-5.
- Figura 3.12. Entorno gráfico de la ventana información SUI-5.
- Figura 3.13. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-5.
- Figura 3.14. Entorno gráfico de la ventana SUI-6.
- Figura 3.15. Entorno gráfico de la ventana información SUI-6.
- Figura 3.16. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-6.
- Figura 3.17. Entorno gráfico de la ventana SUI-3.
- Figura 3.18. Entorno gráfico de la ventana información SUI-3.
- Figura 3.19. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-3.
- Figura 3.20. Entorno gráfico de la ventana SUI-4.
- Figura 3.21. Entorno gráfico de la ventana información SUI-4.
- Figura 3.22. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-4.
- Figura 3.23. Entorno gráfico de la ventana SUI-1.
- Figura 3.24. Entorno gráfico de la ventana información SUI-1.
- Figura 3.25. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-1.
- Figura 3.26. Entorno gráfico de la ventana SUI-2.
- Figura 3.27. Entorno gráfico de la ventana información SUI-2.
- Figura 3.28. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-2.
- Figura 4.1. Ingreso al programa WiMAXchannel mediante la ventana de comandos de MATLAB.
- Figura 4.2. Ventana de inicio del software WiMAXchannel.
- Figura 4.3. Ventana inicial de la modulación OFDM.
- Figura 4.4. Ventana de gráficas de la modulación OFDM.
- Figura 4.5. Bits recibidos en la simulación de la modulación OFDM.
- Figura 4.6. Señal modulada a transmitir.
- Figura 4.8. Probabilidad de error de bit de una señal QPSK en un canal Rayleigh.
- Figura 4.9. Ventana de información de la técnica de acceso OFDMA.
- Figura 4.10. Acceso al canal de varios usuarios en un solo símbolo OFDM.
- Figura 4.11. Acceso al canal de varios usuarios utilizando un símbolo OFDM cada uno.
- Figura 4.12. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-5.
- Figura 4.13. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-5.

- Figura 4.14. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-5.
- Figura 4.15. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-5.
- Figura 4.16. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-5.
- Figura 4.17. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-5.
- Figura 4.18. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-5.
- Figura 4.19. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-5.
- Figura 4.20. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-6.
- Figura 4.21. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-6.
- Figura 4.22. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-6.
- Figura 4.23. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-6.
- Figura 4.24. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-6.
- Figura 4.25. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-6.
- Figura 4.26. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-6.
- Figura 4.27. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-6.
- Figura 4.28. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-3.
- Figura 4.29. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-3.
- Figura 4.30. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-3.
- Figura 4.31. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-3.
- Figura 4.32. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-3.
- Figura 4.33. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-3.
- Figura 4.34. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-3.
- Figura 4.35. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-3.
- Figura 4.36. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-4.
- Figura 4.37. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-4.
- Figura 4.38. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-4.
- Figura 4.39. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-4.
- Figura 4.40. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-4.
- Figura 4.41. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-4.
- Figura 4.42. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-4.
- Figura 4.43. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-4.
- Figura 4.44. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-1.

- Figura 4.45. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-1.
- Figura 4.46. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-1.
- Figura 4.47. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-1.
- Figura 4.48. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-1.
- Figura 4.49. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-1.
- Figura 4.50. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-1.
- Figura 4.51. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-1.
- Figura 4.52. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-2.
- Figura 4.53. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-2.
- Figura 4.54. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-2.
- Figura 4.55. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-2.
- Figura 4.56. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-2.
- Figura 4.57. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-2.
- Figura 4.58. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-2.
- Figura 4.59. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-2.

GLOSARIO

ADF	Average Duration of Fades.
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line.
ARQ	Automatic Repeat Request.
BER	Bit Error Rate.
BW	Band With.
BWA	Broadband Wireless Access.
C/I	Co-Channel Interference.
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function.
CDF	Cumulative Distribution Function.
CP	Cyclic Prefix.
CPE	Customer Premise Equipment.
FDD	Frequency Division Duplex.
FDM	Frequency Division Multiplexing.
FEC	Forward Error Correction.
FFT	Fast Fourier Transform.
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform.
IP	Internet Protocol.
LCR	Level Cross Rate.
MAC	Medium Access Control.
MAN	Metropolitan Area Network.
NLOS	Non Line of Sight.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access.
PAR	Peak to Average Ratio.
Pb	Probabilidad de Error de Bit.
PDF	Probability Distribution Function.
PDU	Data Protocol Unit.

PSD	Power Spectral Density.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation.
QoS	Quality of Service.
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying.
SDU	Service Data Unit.
SNR	Signal to Noise Ratio.
SOFDMA	Scalable OFDMA.
SS	Subscriber Station.
SUI	Stanford University Interim.
TDD	Time Division Duplex.
TDM	Time Division Multiplexing.
VoIP	Voice over IP.
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
WMAN	Wireless MAN.

CAPÍTULO 1

WiMAX

1.1 Introducción a WiMAX.

WiMAX es el acrónimo para Interoperabilidad Mundial para Acceso de Microondas (por sus siglas en inglés *Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Su creación se basa en la necesidad de tener acceso de banda ancha de última milla, principalmente en zonas rurales o zonas geográficamente inaccesibles con sistemas cableados.

WiMAX es un sistema basado en el estándar IEEE 802.16 que permite la conexión inalámbrica de banda ancha teniendo una amplia área de cobertura. Existen dos variantes prácticas de este estándar; la IEEE 802.16d (sistemas fijos) y la IEEE 802.16e (Sistemas móviles).

WiMAX es un concepto parecido a WiFi, entre las diferencias principales están que por medio de WiMAX obtenemos mayor cobertura y mayor ancho de banda. WiFi está diseñado para ambientes inalámbricos internos, siendo una alternativa para el cableado estructurado y con capacidad sin línea de vista (NLOS) pero con pocos metros de alcance. Con WiFi teóricamente se transmiten de 11 a 54 Mbps a distancias de 350 metros. WiMAX está diseñado para dar soluciones de última milla en redes metropolitanas (MAN), puede entregar todos los niveles de servicio necesarios para un Carrier dependiendo del contrato con el suscriptor, distintos servicios de paquetes como IP y Voz sobre IP (VoIP), así como servicios conmutados (TDM), E1s/T1s, voz tradicional, interconexiones ATM y Frame Relay.

WiMAX ofrece enlaces de hasta 50 Km con una capacidad de 72 Mbps como enlace punto a punto con línea de vista (LOS) y ofrece rangos sin línea de vista de hasta 7 Km para una distribución punto multipunto.

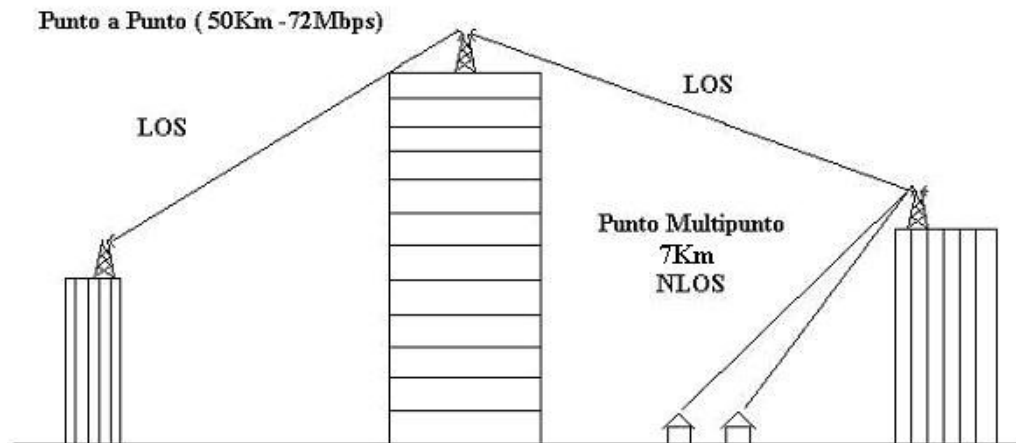


Figura 1.1. Esquema de enlaces LOS y NLOS.

Entre las características más importantes del sistema WiMAX están:

- Utiliza la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), la que permite la transmisión en distintas frecuencias simultáneamente. El espaciado de frecuencias es ortogonal con lo que se garantiza que no exista interferencia entre estas.
- Soporta mecanismos de antenas inteligentes, los cuales mejoran la eficiencia espectral en sistemas inalámbricos y distintos tipos de antenas.
- Soporta redes punto multipunto y redes de malla.
- Presenta una calidad de servicio (QoS) para los operadores NLOS tal que la señal no se distorsiona severamente por la existencia de edificios ni otras posibles causas de interferencia.
- Soporta las multiplexación TDM y FDM, tal que permite la interoperabilidad entre los sistemas FDM y los TDM.

- Como medidas de seguridad, incluyen mecanismos de criptografía y seguridad propios del sistema.
- Posee un ajuste dinámico del tamaño del paquete de transmisión.
- Tiene aplicaciones de voz, datos y video.
- El sistema WiMAX presenta técnicas de modulación adaptativa dependiendo de las condiciones de la relación señal a ruido (SNR).
- Técnicas como FEC, codificación convolutiva, y otros algoritmos son usados para poder detectar y corregir errores, tal que ayudan a mejorar la relación señal a ruido o SNR. Se incorpora el ARQ (Automatic repeat request), para solucionar los errores que no puede solucionar la FEC.
- Algoritmos de control de potencia son implementados en las estaciones base de tal manera que regular los niveles de potencia en los CPE (Customer Premise Equipment), de tal forma que la potencia recibida en la estación base sea ya predeterminada.

Esquemas de Modulación.

Las técnicas de modulación adaptativa de los sistemas WiMAX permiten ajustar el esquema de modulación de la señal dependiendo de las condiciones de la relación señal ruido que existen en el enlace de radio. Cuando el enlace de radio presenta una alta calidad, la más alta modulación es usada, dando al sistema la mayor capacidad. Durante un desvanecimiento de la señal, el sistema WiMAX puede desplazar a la señal a un esquema de modulación menor para mantener la calidad y estabilidad del enlace. Esta característica permite al sistema superar los desvanecimientos selectivos en el tiempo.

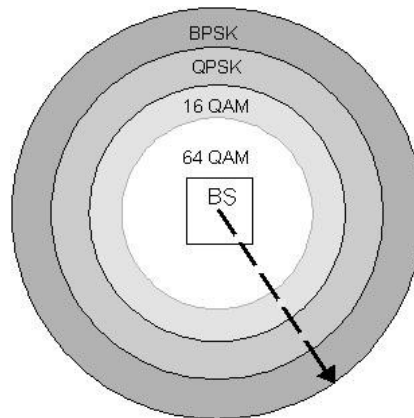


Figura 1.2. Modulación utilizada según la distancia a la estación base.

La capa física incluye OFDM, Duplexación por División de Tiempo (TDD), Duplexación por División de Frecuencia (FDD), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) y Quadrature Amplitude Modulation (QAM). Los tipos de modulación (BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM), donde BPSK es el método menos eficiente, y se emplea donde las estaciones del suscriptor (SS) están más alejadas de las estaciones base o BS, y por lo tanto se requiere mayor potencia para realizar la transmisión. Por otro lado, se utiliza 64QAM, donde las SS están relativamente cerca del BS, y se requiere menos potencia para la transmisión.

Según la relación señal a ruido, la modulación a utilizar será:

SNR (dB)	Modulación
6	BPSK
9	QPSK
16	16QAM
22	64QAM

Tabla 1.1. Esquema de modulación según la SNR.

Capa Física (PHY).

En la capa física, el flujo de datos esta formado por una secuencia de ráfagas de igual longitud. Los modos de operación de duplexación por división de frecuencia y duplexación por división de tiempo, se consideran tanto como para el enlace de subida (UL) y el enlace de bajada (DL).

En el modo de duplexación por división de frecuencia, las ráfagas de UL y DL, son transmitidas simultáneamente y sin interferencia, gracias a que estas son transmitidas a distintas frecuencias. En el modo de duplexación por división de tiempo, las ráfagas de UL y DL son transmitidas de manera consecutiva.

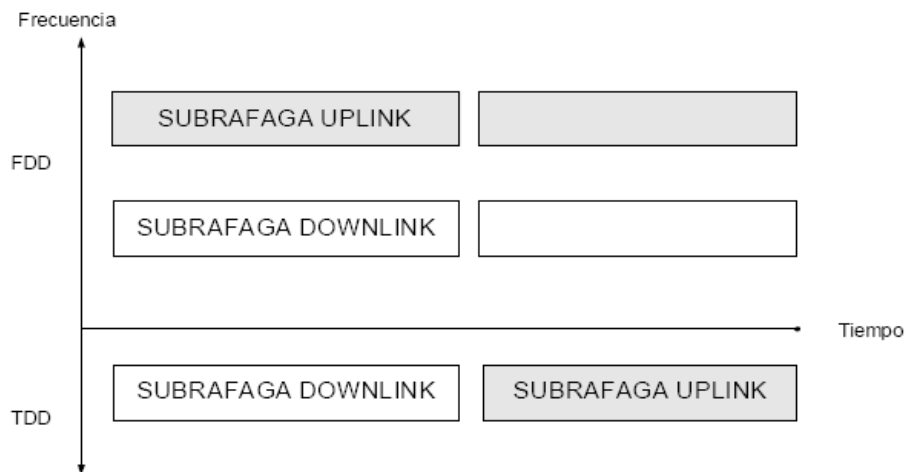


Figura 1.3. Secuencia de ráfagas.

Capa de Control de Acceso al Medio (MAC).

Está diseñada para accesos a las aplicaciones punto multipunto de banda ancha de muy alta tasa de datos y con una distinta variedad de requerimientos de calidad de servicios (QoS), por lo que esta orientada a la conexión.

Permite que el mismo terminal sea compartido por múltiples usuarios. El sistema ha sido diseñado para incluir multiplexación por división del tiempo de voz y datos, protocolo de Internet (IP), y voz sobre IP (VoIP).

La capa MAC está subdividida en tres subcapas: Convergencia, Parte Común y Seguridad.

En la Parte Común se maneja el ancho de banda, se establecen la conexión, y los protocolos de unidad de datos (PDUs). También se encarga de hacer el intercambio de la unidad de servicios de datos de la MAC (SDU) con la capa de convergencia.

La subcapa de convergencia es la encargada de adaptar las unidades de datos de protocolos de alto nivel al formato MAC SDU y viceversa. También se encarga de clasificar los SDUs de la MAC entrantes a las conexiones a las que pertenecen.

La subcapa de seguridad es la encargada de la autenticación, establecimiento de llaves y encriptación. Es en ella donde se realiza el intercambio de los PDUs de la MAC con la capa física.

Técnicas de Corrección de Errores.

Las técnicas de corrección de errores han sido incorporadas a WiMAX para reducir los requerimientos de relación señal ruido. La técnica de corrección de errores (FEC) Reed Solomon Externo, y la codificación convolutiva, son usados para detectar y corregir errores. Estas técnicas de corrección ayudan a recuperar tramas erróneas, que pueden haber sido perdidas por desvanecimientos selectivos de frecuencia o ráfagas de errores. El ARQ (Requerimiento de repetición automática) es usado para corregir errores que no pueden ser corregidos por el FEC. Esto mejora significativamente el BER para similares niveles umbrales.

Control de Potencia

El control de potencia esta implementado por la estación base, la cual manda información sobre el control de potencia a cada equipo premisa del cliente (CPE) para que regule su nivel de potencia de transmisión, de forma que el nivel recibido en la estación base sea un nivel predeterminado. El control de potencia reduce sobre todo el consumo de potencia del CPE y la potencial interferencia con otras estaciones base co-localizadas. Para LOS la potencia transmitida por el CPE es aproximadamente proporcional a la distancia a la estación base. Para NLOS esto depende altamente del nivel de obstaculización existente.

Bandas de Frecuencia.

Existen bandas de frecuencia que pueden ser licenciadas o no licenciadas. Una empresa puede utilizar tanto un espectro licenciado o no licenciado, la diferencia entre uno y otro es que el espectro no licenciado es gratis, sin embargo no está libre de posibles interferencias entre empresas operadoras.

Actualmente el estándar está enfocado en porciones del espectro que están en el rango de 2 a 11 GHz, bandas centimétricas donde el rango de los anchos de banda asignados son estrechos en comparación con los anchos de banda asignados entre 10 a 60 GHz (bandas milimétricas). Estas al tener bandas más amplias acomodan mejor cantidades mayores de información. Por lo que estas son usadas para entornos LOS y gran tasa de datos. Mientras que las bandas en centímetros tienen muy buen desempeño para multipuntos, NLOS y distribución en la última milla.

El estándar IEEE 802.16 establece que el ancho de banda mínimo por canal debe ser de 1.75 MHz, siendo el valor óptimo de 10 MHz para tener una buena calidad de transmisión y ocupar efectivamente el espectro.

Banda de 2.4GHz.

La banda de 2.4GHz es no licenciada y ofrece aproximadamente un ancho de banda de 80MHz. Esta banda no es usada por Wi-Fi aunque ha sido demostrado como un buen servicio para WLAN. En un futuro podría usarse para dar movilidad al usuario.

Bandas de 5GHz.

Las tres mayores bandas de frecuencia: Banda baja, 5150 – 5350 MHz, banda media, 5470 – 5725 MHz, y banda superior, 5725 a 5850 MHz.

Wi-Fi opera en el rango de bajas y medias. En el caso de WiMAX, está opera en el rango superior, 5725 a 5850 MHz, porque en esta banda hay pocos servicios que compitan y puedan causar interferencia, por lo que se espera que WIMAX se desarrolle en esta banda no licenciada. También por esta razón comúnmente se dice que la banda sin licencia para WiMAX corresponde a la banda de 5.8 GHz

WiMAX Forum.

Actualmente WIMAX esta siendo desarrollado y promovido por el grupo WiMAX Forum, este es una organización conformada por alrededor de 250 industrias entre las que se encuentran fabricantes de chips, equipos de comunicaciones y prestadores de servicios. Su función es de vigilar la interoperabilidad entre distintos equipos que utilizan esta tecnología y generar recomendaciones para la correcta implementación de este tipo de sistemas.

1.2 Estándares que regulan a WiMAX

El grupo IEEE 802.16 está dedicado al acceso inalámbrico de banda ancha (BWA). Su objetivo es proponer un grupo de estándares para WMAN. Este grupo está dividido en dos secciones principales, los estándares dedicados a sistemas fijos y los dedicados a sistemas móviles.

WiMAX es el nombre comercial que se le dio al grupo de estándares IEEE 802.16, los estándares existentes son:

IEEE 802.16.

Esta versión de WIMAX considera un rango de espectro de 10 a 66 GHz. Para este estándar la línea de vista era necesaria, y el multidireccionamiento utilizaba técnicas de multiplexación ortogonal por división de frecuencia (OFDM). Así se soportan canales con un ancho de banda mayor a 10 MHz. Este primer estándar fue diseñado para conexiones punto a punto.

IEEE 802.16a.

Este es la actualización del estándar anterior. Considera el rango del espectro de frecuencia de 2 a 11 GHz. Utiliza rangos de frecuencia tanto licenciados como no licenciados, además incorpora la capacidad NLOS y características de calidad de servicio.

Esta versión da mayores capacidades a la capa de control de acceso al medio o MAC. Se incorporo un soporte para FDD y TDD proveyendo para ambas transmisión de datos duplex y half duplex en el caso donde FDD es usado. Son soportados protocolos como Ethernet, ATM e IP. Este estándar es para conexiones fijas de última milla punto a punto y punto multipunto.

IEEE 802.16c.

Este estándar se ocupó sobretodo del rango de 10 a 66 GHz. Sin embargo, también desarrolla otros aspectos como la evolución del funcionamiento y la prueba y ensayo de los posibles perfiles del sistema. La metodología de perfiles del sistema evoluciona para definir qué características podrían ser obligatorias y qué características opcionales. El intento es definir a los fabricantes los elementos obligatorios que se deben considerar para asegurar la interoperabilidad. Los elementos opcionales tales como diversos niveles de los protocolos de la seguridad incorporados permiten que los fabricantes distingan sus productos por precio, funcionalidad y el sector de mercado.

IEEE 802.16d (IEEE 802.16-2004).

Éste es el reemplazo del estándar IEEE 802.16a. Este estándar final soporta numerosos elementos obligatorios y opcionales. Teóricamente podría transmitir hasta para un rango de datos de 70Mbps en condiciones ideales, aunque el rendimiento real podría ser superior a 40Mbps.

Debe tenerse presente que para este estándar se tiene tres tipos de modulación para la capa PHY: modulación con una sola portadora, modulación con OFDM de 256 portadoras y de 2048 portadoras, pero el elegido es OFDM de 256 portadoras, debido a que en el proceso de cálculo para la sincronización se tiene menor complejidad respecto a la utilización del esquema de 2048 portadoras.

IEEE 802.16e.

IEEE 802.16e conserva las técnicas actualizadas en el Fixed WiMAX, a las cuales se agrega un soporte robusto para una banda ancha móvil. Esta basado en la técnica SOFDMA, la que soporta 2K, 1K, 512 y 128 portadoras. El sistema de OFDM permite que las señales sean divididas en muchos sub-canales de baja velocidad para aumentar la resistencia a la interferencia multidireccional. Por ejemplo, un canal de 20MHz es subdividido en 1000 canales, cada usuario individual podría permitirle un número dinámico de los sub-canales basados en su distancia y necesidades de la celda (4, 64, 298, 312, 346, 610 y 944).

IEEE 802.16 Standard			
	802.16	802.16a/REVd	802.16e
Completed	Dec. 2001	802.16a: Jan 2003 802.16 REVd: Q3 2004	Estimate: 2nd half of 2005
Spectrum	10 to 66 GHz	< 11 GHz	< 6 GHz
Channel Conditions	Line-of-sight only	Non line-of-sight	Non line-of-sight
Bit Rate	32 to 134 Mb/s at 28 MHz channelization	Up to 75 Mb/s at 20 MHz channelization	Up to 15 Mb/s at 5 MHz channelization
Modulation	QPSK, 16 QAM and 64 QAM	OFDM 256, OFDMA 64 QAM, 16 QAM, QPSK, BPSK	Same as REVd
Mobility	Fixed	Fixed and Portable	Mobility, Regional Roaming
Channel Bandwidths	20, 25 and 28 MHz	Selectable channel bandwidths between 1.25 and 20 MHz, with up to 16 logical sub-channels	Same as REVd
Typical Cell Radius	1 to 3 miles	3 to 5 miles; Maximum range 30 miles based on tower height, antenna gain and transmit power (among other parameters)	1 to 3 miles

Figura 1.4. Estándar IEEE 802.16.

1.3 El estándar IEEE 802.16d.

Este estándar es también conocido como IEEE 802.16-2004 y es el que determina las características del Fixed WiMAX o WiMAX fijo. En este nos encontramos con entornos fijos punto a punto, punto multipunto, y entornos portables, es decir que la estación receptora puede presentar un desplazamiento de un punto a otro pero a una velocidad tan baja que no afecta al sistema y sigue trabajando como un entorno fijo.

En este estándar se consideran los entornos sin línea de vista y un rango de frecuencia entre 2 y 11GHz, y distancias de hasta 50 Km en entornos LOS, y 7 Km en entornos NLOS.

El estándar IEEE802.16a/d define la interfaz WirelessMAN-OFDM, en la cual se utilizan 256 portadoras. La interfaz WirelessMAN-OFDM de 256 portadoras es favorable debido que en el proceso de cálculo de la transformada rápida de fourier (FFT) se tiene una baja relación o tasa entre el promedio y el nivel pico y se tienen requerimientos menos estrictos para la sincronización de frecuencia.

Las 256 subportadoras están asignadas de la siguiente manera:

- 192 son usadas para datos del usuario.
- 56 nulos por banda de guarda.
- 8 usadas con símbolos pilotos permanentes.

1.4 OFDM en WiMAX

OFDM es el acrónimo de Orthogonal Frequency Division Multiplex, corresponde a uno de los por qué WiMAX puede ofrecer enlaces a altas velocidades y con algunas características extras, como lo son la resistencia a desvanecimientos por multitrayecto e interferencias.

OFDM es una combinación entre modulación y multiplexación. Como se indico anteriormente, las modulaciones que se aplican en WiMAX son BPSK, QPSK, 16QAM, y 64QAM, dependiendo de la distancia de la estación suscriptora (SS) a la estación base y de la relación señal a ruido de de esta.

Concepto de OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales).

OFDM es una técnica de comunicación que divide un canal, de frecuencia, en un número determinado de bandas de frecuencias equiespaciadas, en cada banda se transmite un subportadora que transporta una porción de la información del usuario, la cual será modulada bajo uno de los esquemas ya mencionados. Cada subportadora es ortogonal al resto, dándole el nombre a esta técnica de multiplexación por división de frecuencia.

OFDM es un caso especial de FDM. El hecho de que cada subportadora sea ortogonal al resto permite que el espectro de cada una esté traslapado con el resto y no exista interferencia, aumentando la eficiencia del uso del espectro debido a que no se utilizan bandas de separación entre subportadoras.

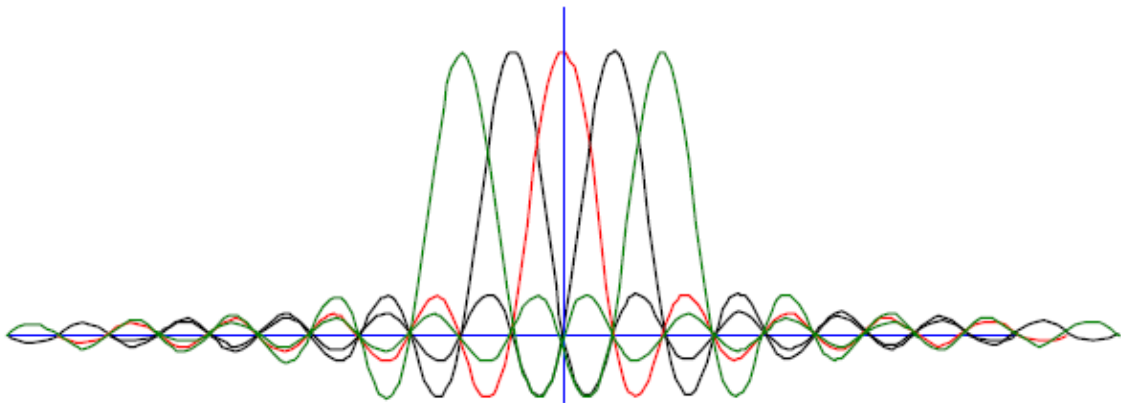


Figura 1.5. Espectro de una señal OFDM.

Un sistema OFDM toma un flujo de datos y lo divide en N flujos paralelos, cada uno a una tasa $1/N$ de la original. Luego cada flujo es modulado a una subportadora y combinado usando la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), obteniendo la señal en el dominio del tiempo a transmitir.

Distribución del espectro OFDM.

En la capa Física del estándar 802.16-2004 se especifica la interfaz WirelessMAN-OFDM, en la cual se establece que se utilizan 256 subportadoras, de las cuales 192 son utilizadas para datos, 8 son pilotos y 56 son nulas. Las subportadoras pilotos son utilizadas como referencia para minimizar los desplazamientos de frecuencia y fase. Por último las 56 subportadoras nulas son utilizadas para resguardo de la banda y la frecuencia DC, que corresponde a la frecuencia central del canal.

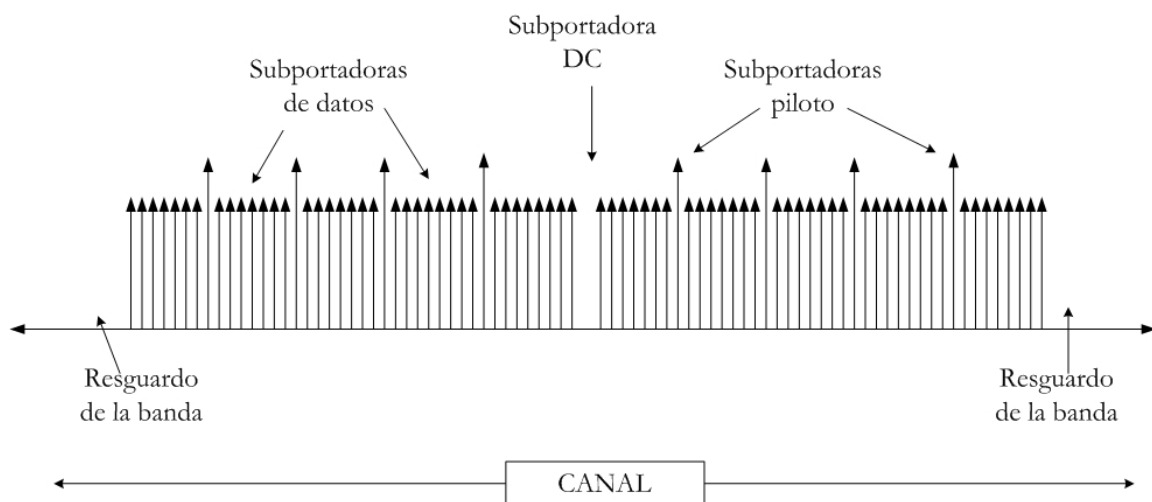


Figura 1.6. División de las subportadoras en el estándar IEEE 802.16d.

El símbolo OFDM.

A la porción de información que transporta cada sub-portadora se conoce como el símbolo OFDM. Este presenta como características principales la introducción de un prefijo cíclico (CP), el cual es la copia de las últimas muestras de la porción de información al inicio del símbolo, este actúa como tiempo de guarda para evitar la interferencia inter simbólica.

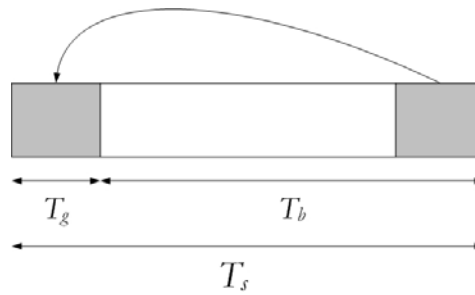


Figura 1.7. Símbolo OFDM.

Si el retardo de propagación máximo del canal es de $v+1$ muestras, aumentar un prefijo cíclico de v muestras entre los símbolos será suficiente para que no exista interferencia entre estos.

Parámetros de la señal OFDM.

Los parámetros dados por el estándar IEEE 802.16-2004 que debemos tomar en cuenta en la modulación OFDM y sus símbolos son los siguientes:

- Ancho de banda (BW).
- Número de subportadoras utilizadas (N_{used}): Es la cantidad de portadoras que serán utilizadas tanto para la información de los usuarios como para pilotos e igual a 200.
- Factor de muestreo (n): Factor que permite determinar el espacio entre las subportadoras para que estas sean ortogonales.

n	BW
86/75	Múltiplos de 1.5 MHz
144/125	Múltiplos de 1.25 MHz
316/275	Múltiplos de 2.75 MHz
57/60	Múltiplos de 2 MHz
8/7	Otros

Tabla 1.2. Factor de muestreo.

- Razón entre el tiempo del CP y el tiempo útil del símbolo (G): Dependiendo del retardo del canal este puede tomar el valor más cercano a 1/4, 1/8, 1/16, 1/32.
- Tamaño de la FFT (N_{FFT}): Es el número de subportadoras total, equivale a la potencia de dos más pequeña superior a N_{used} , el número de subportadoras total es de 256.

- Frecuencia de muestreo (F_s):

$$F_s = \text{floor}(n \cdot BW / 8000) \cdot 8000 \quad [Hz] \quad (1.1)$$

BW en Hz.

- Espacio entre subportadoras (Δf):

$$\Delta f = \frac{F_s}{N_{FFT}} \quad (1.2).$$

- Tiempo útil del Símbolo (T_b):

$$T_b = \frac{1}{\Delta f} \quad (1.3).$$

- Tiempo del prefijo cíclico (T_g):

$$T_g = G \cdot T_b \quad (1.4).$$

- Tiempo del símbolo OFDM (T_s):

$$T_s = T_b + T_g \quad (1.5).$$

- Se utilizan 27 subportadoras como resguardo en el límite superior, 28 en el límite inferior, y una para DC.

Bit Error Rate (BER).

El BER por concepto general es igual al número de bits errados dividido para el número de bits totales.

$$BER = \frac{\# \text{ bits errados}}{\# \text{ bits total}} \times 100\% \quad (1.6).$$

Probabilidad de Error de Bit (Pb).

En la modulación OFDM, la probabilidad de error de bit es exactamente la misma que aquella de la modulación subyacente, es decir, si cada una de las portadoras esta modulada bajo el esquema QPSK, la probabilidad de error de bit será igual a la Pb de la modulación QPSK. De igual forma se da si la modulación utilizada es BPSK, 16QAM, o 64QAM.

Para el caso de las modulaciones BPSK y QPSK, la probabilidad de error de bit es igual ya que una señal modulada en QPSK es la unión de dos señales moduladas en BPSK, siendo estas ortogonales, ya que una de estas es una componente en fase y la otra en cuadratura.

En un canal tipo Rayleigh, la probabilidad de error de bit de una señal BPSK o QPSK será la siguiente:

$$Pb = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{Eb/No}{1 + Eb/No}} \right) \quad (1.7).$$

Para una señal M-QAM, la probabilidad de error de bit será:

$$Pb = \frac{2(1 - L^{-1})}{k} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3 \cdot k}{L^2 - 1} \cdot 2 \cdot Eb/No} \right) \quad (1.8)$$

Donde $L = \sqrt{M}$, y $M = 2^k$. Q se define como la función de error complementaria.

Peak to Average Ratio (PAR).

Las señales OFDM tienen un PAR más alto que el de señales de una sola portadora, debido a que en el dominio del tiempo una señal multiportadora es la suma de varias señales de banda estrecha. En ciertos instantes de tiempo es alta y en otros es baja, por tanto el valor pico de la señal es mayor al valor promedio.

Cuando se transmite la señal por un amplificador de alta potencia o un convertor digital análogo, la señal se distorsiona debido al comportamiento no lineal de estos amplificadores. Para evitar que el amplificador distorsione, sería deseable utilizar su zona de respuesta lineal, para ello se recurre a una back-off.

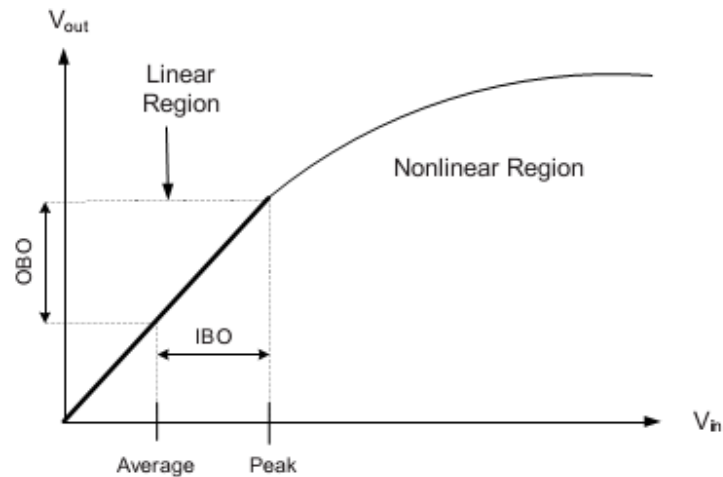


Figura 1.8. Respuesta de un amplificador de potencia.

Para que no exista distorsión, el *back-off* debería ser igual al máximo PAR, pero por cuestiones de eficiencia sería impracticable. Para solucionar este inconveniente se utiliza una técnica conocida como cancelación de picos, también llamada clipping, la cual no es más que una forma de ecualización.

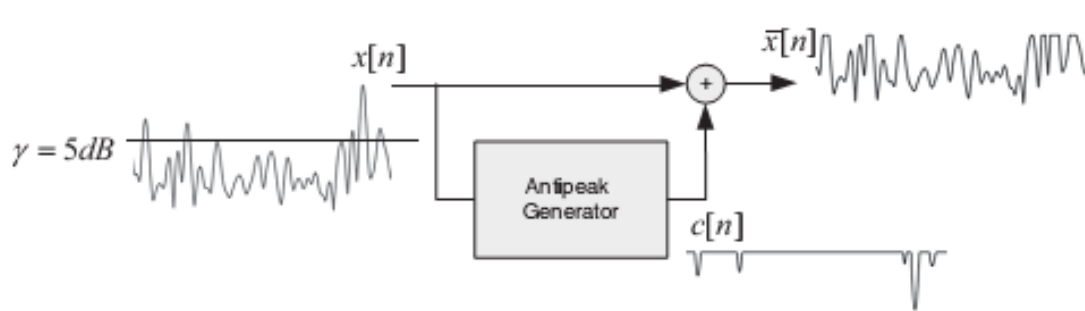


Figura 1.9. Diagrama de cancelación de picos.

Para analizar estadísticamente la PAR, se suele utilizar la función de distribución acumulativa complementaria (CCDF) que representa la probabilidad de que la PAR de una transmisión sobrepase una PAR que se quiere analizar.

$$CCDF = 1 - \left(1 - \exp\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot \sigma^2}\right) \right)^{\beta L} \quad (1.9)$$

Donde ε_{\max} es el nivel pico y β es esta dado empíricamente por $\beta = 2.8$, L representa el tamaño de la FFT.

1.5 OFDMA en WiMAX.

OFDMA consiste en una técnica de acceso múltiple basado en OFDM, en el cual a cada usuario se le asigna una o más subportadoras, con lo cual los usuarios comparten un determinado ancho de banda. La forma en que las subportadoras son asignadas dependerá de la estrategia de despliegue del operador, ya que tienen directa relación con la calidad de servicio y la tasa de transferencia de éstos, es decir que el operador puede decidir asignar a varios usuarios en un solo símbolo OFDM, o que cada símbolo OFDM pertenezca a un solo usuario pero estos se ubican en cola para ser transmitidos en la misma portadora.

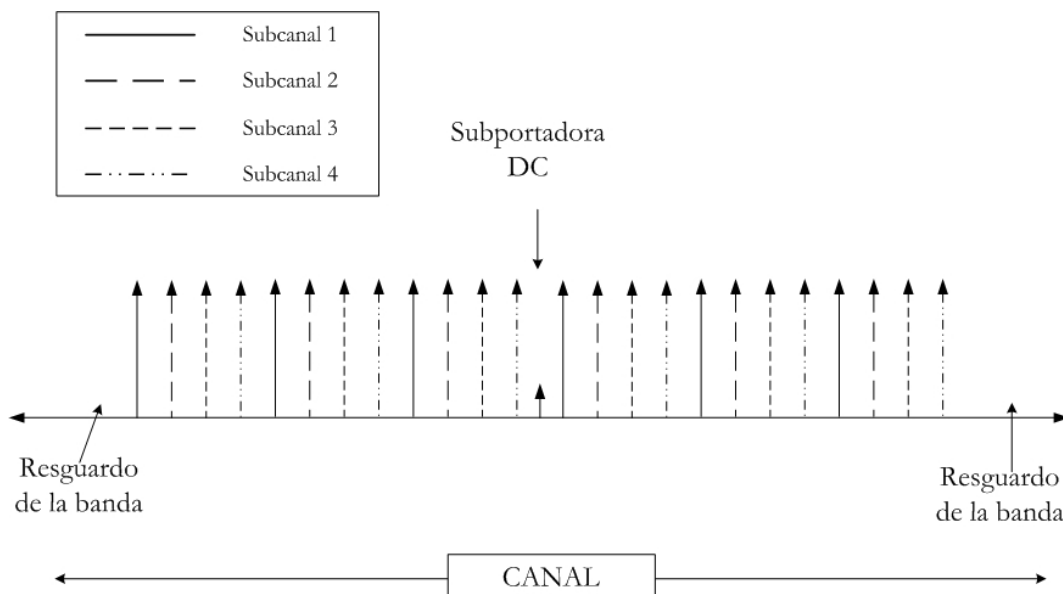


Figura 1.10. Agrupación de subportadoras.

OFDMA es una combinación de FDMA y TDMA. Es decir, un usuario tiene asignado un número de subportadoras (FDMA), y estas asignaciones de subportadoras a usuarios cambian en el tiempo (TDMA).

FDMA: A un usuario se le asignan una o varias subportadoras OFDM durante la duración de un símbolo OFDM, o lo que lo mismo: Los N símbolos de usuario que forman un símbolo OFDM pueden pertenecer a distintos usuarios.

TDMA: Las asignaciones FDMA pueden cambiar símbolo a símbolo.

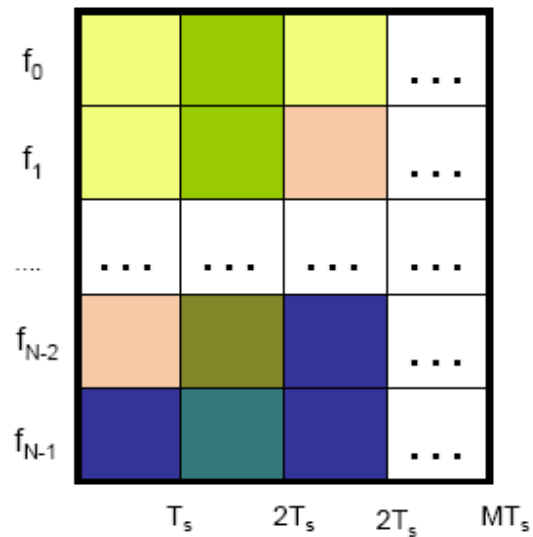


Figura 1.11. Asignación OFDMA.

CAPÍTULO 2

EL CANAL DE PROPAGACIÓN

2.1 Introducción.

El canal de propagación es el medio que enlaza al transmisor con el receptor, este medio es inalámbrico y difiere de los canales cableados por la propagación multitrayecto. Se analizan parámetros importantes como la potencia recibida, y se analiza sus estadísticas.

Aplicando los conceptos de WiMAX y las reglas impuestas por el estándar IEEE 802.16d junto con los conceptos descritos en las siguientes secciones de este capítulo sobre canal de propagación y los datos que se especifican en los modelos SUI, también especificados en este capítulo, estamos en la capacidad de crear un software que nos permita el análisis del canal de propagación aplicado la tecnología WiMAX y el desempeño de la modulación OFDM en esta tecnología.

Veremos como la potencia recibida decrece en función de la distancia. El retardo de propagación nos indica que si transmitimos una señal de duración T , la señal recibida tendrá una duración T' mayor a T , lo cual nos lleva a tener interferencia intersimbólica; la cual puede ser controlada o incluso hasta eliminada con una correcta adición de un prefijo cíclico a la señal.

El canal radio de un sistema de comunicación inalámbrico es a menudo descrito como LOS o NLOS. En un enlace LOS, una señal viaja a través de un camino directo y sin obstáculos desde el transmisor al receptor. El enlace LOS requiere que la mayor parte de la primera zona de Fresnel este libre de cualquier obstrucción. Si este criterio no se cumple, entonces se produce una significativa reducción en el nivel de intensidad de la señal recibida.

En un enlace NLOS, una señal alcanza el receptor a través de reflexiones, difracciones y dispersiones debido a que se presentan obstáculos a lo largo del trayecto. La señal que llega al receptor esta formada por una composición de señales que llegan a través de las anteriores formas de propagación. Estas señales tienen diferentes tiempos de retardo, atenuaciones, polarizaciones y estabilidad relativa frente a la señal que se transmite por el camino directo.

En este capítulo nos enfocaremos en lo referente a transmisiones NLOS de un sistema fijo. Cuando los obstáculos que se presentan a lo largo del trayecto tienen una superficie suave, las ondas son reflejadas y parte de su energía es absorbida por el obstáculo, mientras que si la superficie del obstáculo es áspera, las ondas se dispersan. Finalmente, las ondas también se pueden difractar cuando estas chocan con los filos de los obstáculos.

El parámetro mas importante para analizar el canal de propagación es la ganancia de este, la cual es menor a la unidad, así como las pérdidas en el espacio libre. Otro de los parámetros importantes es el desplazamiento Doppler de frecuencia, las ondas que presentan este desplazamiento crean una secuencia de desvanecimientos.

El efecto Doppler es un parámetro muy importante en los sistemas móviles ya que el desplazamiento de frecuencia o frecuencia Doppler depende de la velocidad de la SS. Sin embargo este es un parámetro importante del canal, aunque sea muy pequeño ya que es una medida de la tasa de cambio del canal. Normalmente la frecuencia Doppler fluctúa entre los valores de 1 Hz y 1KHz para sistemas móviles. En sistemas fijos este valor se encuentra entre 0 y unos cuantos Hertz.

Canales invariantes en el tiempo.

Los canales invariantes en el tiempo se refieren a los sistemas fijos, es decir, las ondas que llegan al receptor son ondas que no varían su amplitud en función de la posición del receptor, ver figura 2.1.

El receptor puede presentar un pequeño movimiento, pero a una velocidad baja que no representa un desplazamiento Doppler significativo, esto se da cuando la posición del receptor varía dentro de un área menor a 10 longitudes de onda de diámetro.

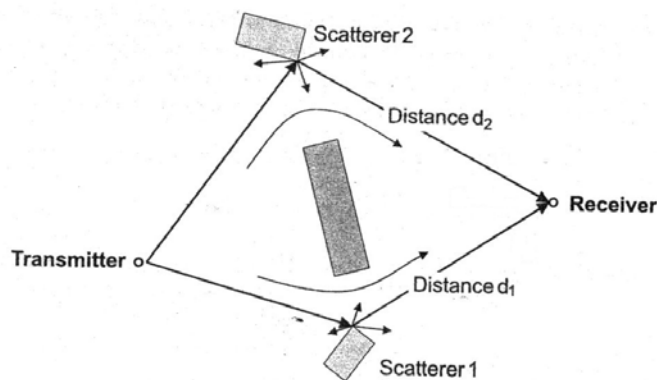


Figura 2.1. Sistema invariante en el tiempo.

Desvanecimientos.

Es la disminución de la potencia recibida con relación a su valor medio a largo plazo, debido a los multitrayectos, existen fluctuaciones del valor de la potencia recibida respecto al valor calculado a una distancia d del transmisor.

La profundidad del desvanecimiento es la diferencia entre el valor nominal y el nivel recibido. La duración del desvanecimiento es el tiempo que media entre la pérdida y recuperación del nivel.

Desvanecimiento por Multitrayecto.

Se debe a la existencia de dos o más trayectos de propagación además del directo, este puede producirse por reflexiones en el suelo o en capas de la atmósfera y es selectivo en frecuencia por lo que produce distorsión y atenuación.

El modelo estadístico esta dado según las condiciones y pueden ser del tipo:

- **Rice:** Cuando existe línea de vista.
- **Rayleigh:** Cuando no existe línea de vista.

Los desvanecimientos multitrayecto se pueden dividir en planos o selectivos dependiendo si afectan a toda la banda transmitida o solo a una parte de esta.

Un desvanecimiento plano atenúa el espectro de la señal uniformemente en toda la banda y no es selectivo en frecuencia. Se debe a la reducción de la intensidad del camino directo, dando lugar a una depresión media de la intensidad de la señal.

En los desvanecimientos selectivos la aparición de caminos múltiples en sistemas de banda ancha da lugar a la existencia de un desvanecimiento selectivo en frecuencia, que provoca una distorsión en la señal. La función de transferencia del medio de propagación varía con la frecuencia lo que produce distorsión de amplitud y fase en la señal.

Distribución de Rayleigh.

La distribución de Rayleigh es una función de distribución continua. Se suele presentar cuando un vector bidimensional tiene sus dos componentes, ortogonales, independientes y siguen una distribución normal. Su valor absoluto seguirá entonces una distribución de Rayleigh. Esta distribución también se puede presentar en el caso de números complejos con componentes real e imaginaria independientes y siguiendo una distribución normal. Su valor absoluto sigue una distribución de Rayleigh.

La función densidad de probabilidad de esta distribución es:

$$pdf = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (2.1)$$

Donde σ^2 es la varianza. Las propiedades de la distribución de Rayleigh son las siguientes:

$$\text{Valor esperado:} \quad \bar{r} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.2)$$

$$\text{Media cuadrática:} \quad \bar{r}^2 = 2\sigma^2 \quad (2.3)$$

$$\text{Varianza:} \quad \sigma_r^2 = 0.492\sigma \quad (2.4)$$

$$\text{Valor medio:} \quad \tilde{r} = 1.177\sigma \quad (2.5)$$

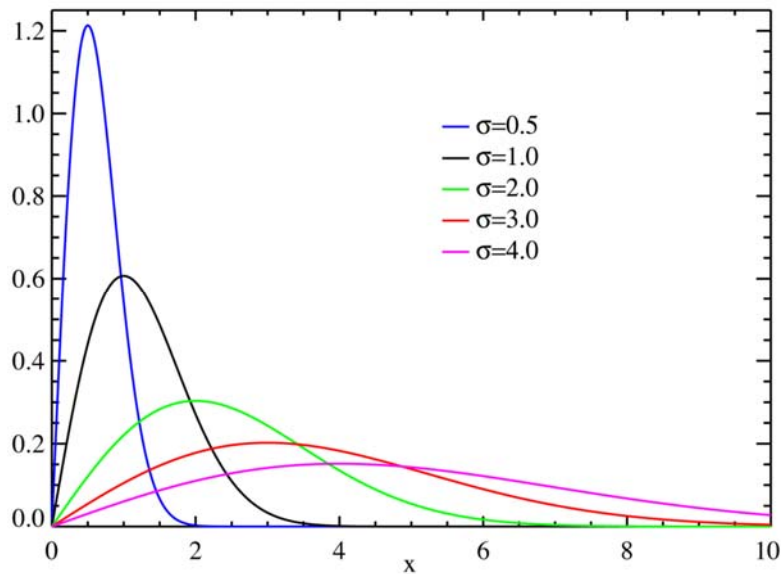


Figura 2.2. Distribución de Rayleigh.

La función de distribución acumulativa (cdf), se define como la probabilidad de que la realización de la variable aleatoria tenga un valor menor a x , en otras palabras, indica la probabilidad de que un cierto nivel de potencia no sea excedido.

La cdf esta dada por:

$$cdf = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.6)$$

Tasa de Nivel de Cruce (LCR).

El level cross rate (LCR) o tasa de nivel de cruce, es una cantidad que nos permite observar la tasa de ocurrencia de los desvanecimientos, y depende del nivel en consideración. Una caída de nivel de 30 dB por debajo del valor medio ocurrirá raramente en comparación a una caída de 3 dB.

La expresión para el cálculo del LCR es la siguiente:

$$LCR = \sqrt{2\pi \ln(2)} \left(\frac{r}{\tilde{r}}\right) 2^{-\left(\frac{r}{\tilde{r}}\right)^2} \quad (2.7)$$

Duración Promedio de los Desvanecimientos (ADF).

El average duration of fades (ADF) o duración promedio de los desvanecimientos es el tiempo promedio que dura una caída de nivel por debajo del nivel medio. Este es una relación entre la CDF y el LCR de la siguiente forma:

$$ADF = \frac{CDF}{LCR} \quad (2.8)$$

2.2 Canales de Propagación Aplicados a WiMAX.

Los parámetros del modelo de propagación dependen del terreno, densidad boscosa, altura de la antena, etc.

El canal inalámbrico está caracterizado por:

- Pérdida en el espacio libre.
- Retardo de propagación por multitrayecto.
- Características de desvanecimiento.
- Interferencia co-canal.

El modelo más comúnmente utilizado en la predicción y simulación de la señal recibida es el modelo de Okumura-Hata, el cual es válido para frecuencias de 500 a 1500 MHz, y su extensión a 2000 MHz, en distancias mayores a 1 Km y antenas con alturas mayores a 30 m. Sin embargo este modelo no es aplicable para antenas de altura pequeña, o terrenos montañosos con densidad boscosa media o alta, ni para el rango de frecuencias a los que WiMAX se aplica.

Pérdidas en el Espacio Libre.

Existen tres categorías de terrenos, estas son:

- **Tipo A:** Terrenos montañosos, con densidad boscosa media o alta.
- **Tipo B:** Terreno plano, con densidad boscosa media.
- **Tipo C:** Terreno plano con densidad boscosa baja.

Para los escenarios nombrados, la pérdida en el espacio libre en dB esta dada por:

$$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s \quad \text{para } d > d_0 \quad (2.9)$$

$$A = 20 \log \left(4\pi d_0 / \lambda \right) \quad (2.10)$$

Donde d_0 es la distancia más cercana a la estación base e igual a 100 m, λ es la longitud de onda en m, d es la distancia entre 100 m y 7 Km, y γ es el exponente de la pérdida de espacio libre y está dado por:

$$\gamma = a - h_b + c/h_b \quad (2.11)$$

Donde h_b es la altura de la antena de la estación base en metros, y se encuentra en el rango de 10 a 80 m, a, b, c y s son constantes que dependen del terreno.

Constante	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
s	10.6	9.4	8.2

Tabla 2.1. Coeficientes dependientes del terreno.

Para que el modelo sea aplicable a las condiciones mencionadas debemos realizar una corrección en frecuencia y altura de la estación suscriptor. Estas correcciones son:

$$PL_{total} = PL + PL_f + PL_h \quad (2.12)$$

Donde PL_f es la corrección en frecuencia dada por:

$$PL_f = 6 \log \left(f / 2000 \right) \quad (2.13)$$

La frecuencia está dada en MHz, PL_h es la corrección debida a la altura de la estación suscriptor dada por:

$$PL_h = -10.8 \log \left(h / 2 \right) \quad \text{Para terrenos Tipo A y B} \quad (2.14)$$

$$PL_h = -20 \log \left(h / 2 \right) \quad \text{Para terrenos Tipo C} \quad (2.14)$$

Donde h es la altura de la estación suscriptor entre 2 y 10 m.

Retardo de Propagación por Multitrayecto.

Debido al ambiente de dispersión, el canal presenta un retardo por multitrayecto, este es el siguiente:

$$\tau_{rms}^2 = \sum_j P_j \tau_j^2 - \tau_{avg}^2 \quad (2.15)$$

Donde:

$$\tau = \sum_j P_j \tau_j^2 \quad (2.16)$$

τ_j Representa el retardo de la j esima componente.

$P_j = (\text{Potencia de la } j \text{ esima componente}) / (\text{Potencia total}).$

Características de Desvanecimiento.

Distribución de los Desvanecimientos y Factor K.

El desvanecimiento de una señal de banda estrecha puede ser caracterizado por una distribución de Ricean. La clave de esta distribución es el factor K, que se define como la relación entre la potencia del componente fijo y la potencia del componente disperso. La distribución del factor K de banda estrecha es una distribución lognormal, con su media en función de la estación del año, altura de la antena, el ancho del lóbulo de la antena, y la distancia y aproximadamente igual a 8 dB.

$$K = F_s F_h F_b K_0 d^\gamma u \quad (2.17)$$

Donde:

F_s Es el factor de la estación, igual a 1 en verano y primavera, y a 2.5 en invierno y otoño.

F_h Es el factor de la antena receptora, con su altura en metros:

$$F_h = (h/3)^{0.46} \quad (2.18)$$

F_b Es el factor del ancho del lóbulo, el ancho del lóbulo dado en grados:

$$F_b = (b/17)^{-0.62} \quad (2.19)$$

K_0 Y γ son los coeficientes de regresión e iguales a 10 y -0.5 respectivamente.

u Es una variable lognormal con media 0 dB y desviación estándar de 8 dB.

d Es la distancia entre la estación base y la estación suscriptor.

Para cada eco se genera un grupo de coeficientes gaussianos con media cero y varianza de 0.5 tanto para la parte real como imaginaria de forma que la potencia promedio total sea igual a 1. Esto nos lleva a una distribución de Rayleigh, la cual es equivalente a la distribución de Ricean con un factor $K = 0$. Para casos en los que $K > 0$, un componente constante del canal m es adherido a los coeficientes complejos. La razón entre la parte constante m y la variable Rayleigh corresponde al factor K . La potencia de cada eco queda dada por:

$$P = |m|^2 + \sigma^2 \quad (2.20)$$

Donde m es la constante del canal y σ^2 es la varianza de los coeficientes complejos. El factor K entonces esta dado por:

$$K = \frac{|m|^2}{\sigma^2} \quad (2.21)$$

De estas 2 ecuaciones podemos derivar las ecuaciones para la potencia de la parte constante y gaussiana:

$$\sigma^2 = P \frac{1}{K+1} \quad (2.22)$$

$$|m|^2 = P \frac{K}{K+1} \quad (2.23)$$

Espectro Doppler

En canales inalámbricos fijos la densidad espectral de potencia (PSD) de componentes dispersos es llamada PSD redondeada (figura 2.3) y esta dada por:

$$S = \begin{cases} 1 - 1.72f_0^2 + 0.785f_0^4 & |f_0| \leq 1 \\ 0 & |f_0| > 1 \end{cases} \quad (2.24)$$

Donde

$$f_0 = \frac{f}{f_m} \quad (2.25)$$

f_m Representa la máxima frecuencia Doppler.

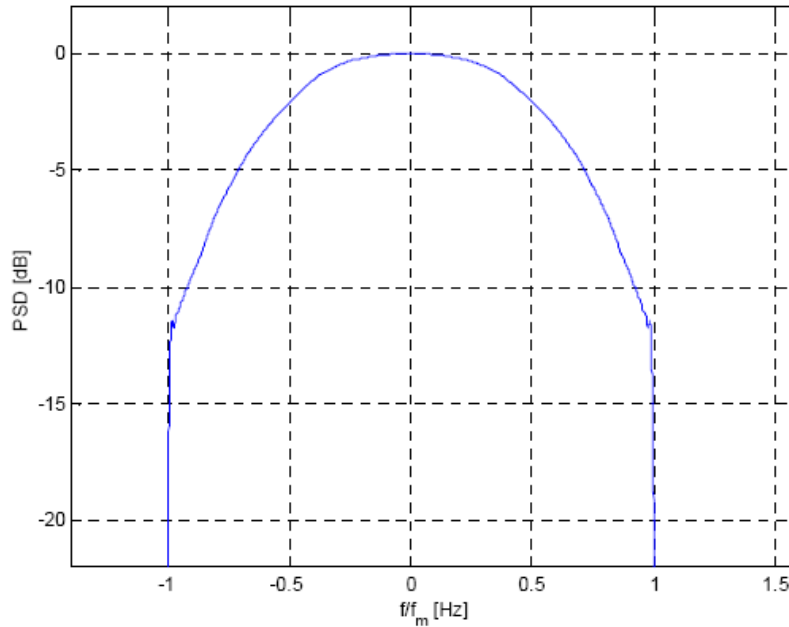


Figura 2.3. PSD redondeada.

Finalmente para encontrar el grupo de coeficientes con esta PSD, se correlacionan los coeficientes imaginarios con un filtro cuya respuesta en frecuencia es:

$$H = \sqrt{S} \quad (2.26)$$

Interferencia Co-Canal (C/I).

Los cálculos para la C/I usan un modelo de pérdidas en el espacio libre que toman en cuenta una media y un desvanecimiento lognormal, pero no para desvanecimientos temporales rápidos. En los casos de NLOS, el desvanecimiento temporal nos lleva a admitir cierto margen de desvanecimiento, el valor de este margen depende del factor K del desvanecimiento, la QoS requerida y el uso de cualquier medida de mitigación de desvanecimiento en el sistema. Existen dos formas de encontrar este margen como se muestra en la figura 2.4, una de ellas es

que la CDF de C/I sea desplazada hacia la izquierda o la C/I que se requiere para un canal sin desvanecimiento se incrementa debido al margen de desvanecimiento.

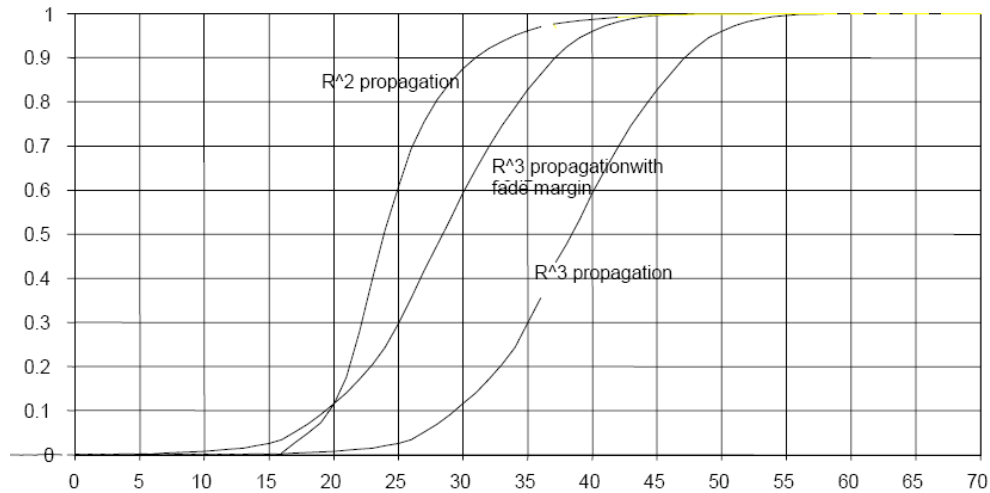


Figura 2.3 Efectos del margen de desvanecimiento en distribuciones C/I .

Modelos Interinos de la Universidad de Stanford (SUI).

La Universidad de Stanford creó un grupo de seis modelos aplicables a tecnologías inalámbricas de banda ancha (BWA), estos seis modelos se diseñaron para ser aplicados en los tipos de terrenos ya mencionados. Las tablas 2.2 muestran el modelo SUI que se debe utilizar en función del tipo del terreno:

Terreno	Modelo SUI
A	SUI-5, SUI-6
B	SUI-3, SUI-4
C	SUI-1, SUI-2

Tabla 2.2. Aplicación de los modelos SUI en función del tipo de terreno.

Los modelos consisten en un grupo de tablas en las que se especifican datos basados en los conceptos teóricos ya mencionados en este capítulo y recopilados de forma empírica en locaciones correspondientes a los tipos de terreno ya especificados.

Este grupo de tablas que especifican los valores para cada modelo, así como los conceptos de canal de propagación son los que nos permiten realizar la simulación del canal.

La estructura general de los modelos de canal SUI es la siguiente:

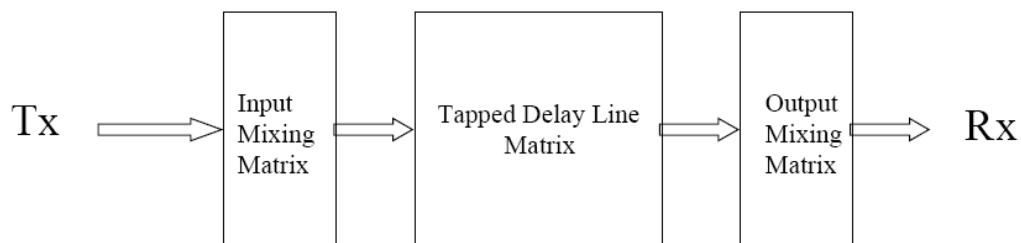


Figura 2.4. Estructura de los modelos SUI.

En donde:

- **Input Mixing Matrix:** Modela la correlación de las señales de entrada en caso de que se ocupen múltiples antenas transmisoras.
- **Tapped Delay Line Matrix:** En esta etapa se modela el desvanecimiento por multitrayecto, este se modela con tres ecos con diferentes retardos, los cuales corresponden a las componentes de mayor contribución en el receptor.
- **Output Mixing Matrix:** Modela la correlación de las señales de salida en caso de que se ocupen múltiples antenas receptoras.

2.3 Modelos SUI tipo A.

Los modelos SUI tipo A corresponden a los modelos SUI-5 y SUI-6, y son aplicables a terrenos montañosos, con densidad boscosa media o alta.

Modelo SUI-5.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	4	10	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-5	-10	dB
Factor K (90%)	0	0	0	
Factor K (75%)	0	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-11	-22	dB
Factor K (90%)	0	0	0	
Factor K (75%)	2	0	0	
Doppler	2	1.5	2.5	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.3$		Antena Omnidireccional: $\tau_{RMS} = 2.842 \mu s$	
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 4 dB		K total: K (90%) = 0.1; K (75%) = 0.3	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -1.5113 \text{ dB}$ $F_{30^\circ} = -0.3573 \text{ dB}$		Antena 30°: $\tau_{RMS} = 2.842 \mu s$ K total: K (90%) = 0.4; K (75%) = 1.3	

Tabla 2.3. Modelo SUI-5.

Modelo SUI-6.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	14	20	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-10	-14	dB
Factor K (90%)	0	0	0	
Factor K (75%)	0	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-16	-26	dB
Factor K (90%)	0	0	0	
Factor K (75%)	2	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.3$		Antena Omnidireccional:	$\tau_{RMS} = 5.240 \mu s$
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 4 dB		K total: K (90%) = 0.1; K (75%) = 0.3	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -0.5683 \text{ dB}$		Antena 30°:	$\tau_{RMS} = 2.370 \mu s$
	$F_{30^\circ} = -0.1184 \text{ dB}$		K total: K (90%) = 0.4; K (75%) = 1.3	

Tabla 2.4. Modelo SUI-6.

2.4 Modelos SUI tipo B.

Los modelos SUI tipo B corresponden a los modelos SUI-3 y SUI-4, y son aplicables a terrenos planos, con densidad boscosa media.

Modelo SUI-3.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	0.4	0.9	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-5	-10	dB
Factor K (90%)	1	0	0	
Factor K (75%)	7	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-11	-22	dB
Factor K (90%)	3	0	0	
Factor K (75%)	19	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.4$		Antena Omnidireccional: $\tau_{RMS} = 0.264 \mu s$	
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 3 dB		K total: K (90%) = 0.5; K (75%) = 1.65	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -1.5113 \text{ dB}$ $F_{30^\circ} = -0.3573 \text{ dB}$		Antena 30°: $\tau_{RMS} = 0.123 \mu s$ K total: K (90%) = 2.2; K (75%) = 7	

Tabla 2.5. Modelo SUI-3.

Modelo SUI-4.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	1.5	4	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-4	-8	dB
Factor K (90%)	0	0	0	
Factor K (75%)	1	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-10	-20	dB
Factor K (90%)	1	0	0	
Factor K (75%)	5	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.3$		Antena Omnidireccional:	$\tau_{RMS} = 1.257 \mu s$
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 4 dB		K total: K (90%) = 0.2; K (75%) = 0.6	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -1.9218 \text{ dB}$		Antena 30°:	$\tau_{RMS} = 0.563 \mu s$
	$F_{30^\circ} = -0.4532 \text{ dB}$		K total: K (90%) = 1; K (75%) = 3.2	

Tabla 2.6. Modelo SUI-4.

2.5 Modelos SUI tipo C.

Los modelos SUI tipo C corresponden a los modelos SUI-1 y SUI-2, y son aplicables a terrenos planos, con densidad boscosa baja.

Modelo SUI-1.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	0.4	0.9	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-15	-20	dB
Factor K (90%)	4	0	0	
Factor K (75%)	20	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-21	-32	dB
Factor K (90%)	16	0	0	
Factor K (75%)	72	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.7$		Antena Omnidireccional:	$\tau_{RMS} = 0.111 \mu s$
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 0 dB		K total: K (90%) = 3.3; K (75%) = 10.4	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -0.1771 \text{ dB}$		Antena 30°:	$\tau_{RMS} = 0.042 \mu s$
	$F_{30^\circ} = -0.0371 \text{ dB}$		K total: K (90%) = 14; K (75%) = 44.2	

Tabla 2.7. Modelo SUI-1.

Modelo SUI-2.

Los valores se muestran para antenas omnidireccionales y para antenas con un ancho de lóbulo de 30°, con cobertura del 90 y 75 % de la celda para cada caso.

	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Unidades
Delay	0	1.5	4	μs
Antena omnidireccional:				
Potencia	0	-4	-8	dB
Factor K (90%)	2	0	0	
Factor K (75%)	11	0	0	
Antena de 30°:				
Potencia	0	-10	-20	dB
Factor K (90%)	8	0	0	
Factor K (75%)	36	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
Correlación de la Antena:	$\rho_{ENV} = 0.5$		Antena Omnidireccional:	$\tau_{RMS} = 0.202 \mu s$
Factor Reductor de Ganancia:	GRF = 2 dB		K total: K (90%) = 1.6; K (75%) = 5.1	
Factor de Normalización:	$F_{omni} = -0.3930 \text{ dB}$		Antena 30°:	$\tau_{RMS} = 0.069 \mu s$
	$F_{30^\circ} = -0.0768 \text{ dB}$		K total: K (90%) = 6.9; K (75%) = 21.8	

Tabla 2.8. Modelo SUI-2.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL SOFTWARE EN MATLAB

3.1 Programación de la Modulación OFDM.

La programación del software consta de dos partes principales: La programación visual, que se refiere a la creación de una interfaz gráfica para interactuar con el usuario; y la programación lineal, en la cual se incorporan las líneas de código referente a la matemática relacionada con la técnica de modulación o al modelo de propagación que se programa.

MATLAB provee una herramienta llamada MATLAB Guide, que es un entorno de programación visual para poder realizar y ejecutar programas de Simulación a medida de forma simple, tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

Cuando creamos un aplicación en MATLAB Guide, se crean dos archivos uno .m, que es donde se programan las líneas de código, y otro .fig, en el cual se colocan los objetos que interactúan con el usuario como botones, cuadros de edición, cuadros de texto, slide bars, menús, etc. Las dos partes están unidas a través de las subrutinas callback, que son las funciones que ejecutan las líneas de código programadas cuando se interactúa con un determinado objeto.

Para ingresar al MATLAB Guide digitamos en la ventana de comandos de MATLAB la palabra guide o buscamos el ícono del MATLAB Guide en la barra de herramientas, este se encuentra junto al ícono de Simulink. Esto abre la consola de edición de la parte grafica de la aplicación a implementar (.fig), es decir, colocar botones, cuadros de dialogo, gráficas, texto, etc.

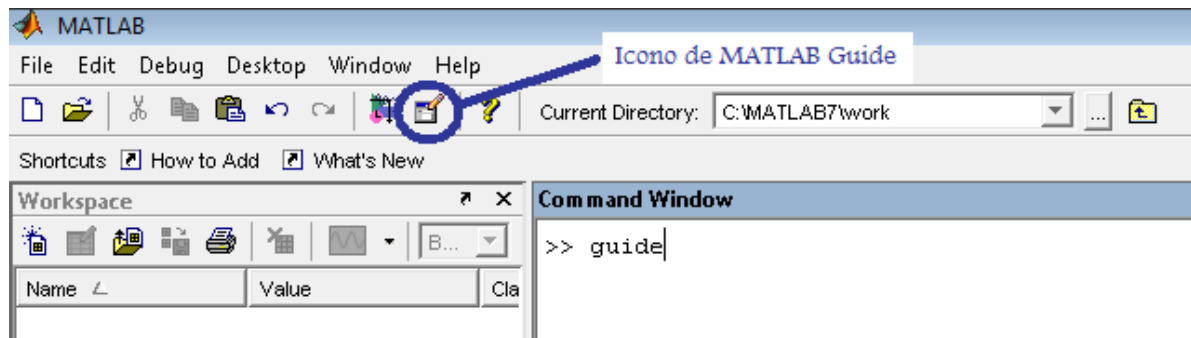


Figura 3.1. Forma de ingresar a MATLAB Guide.

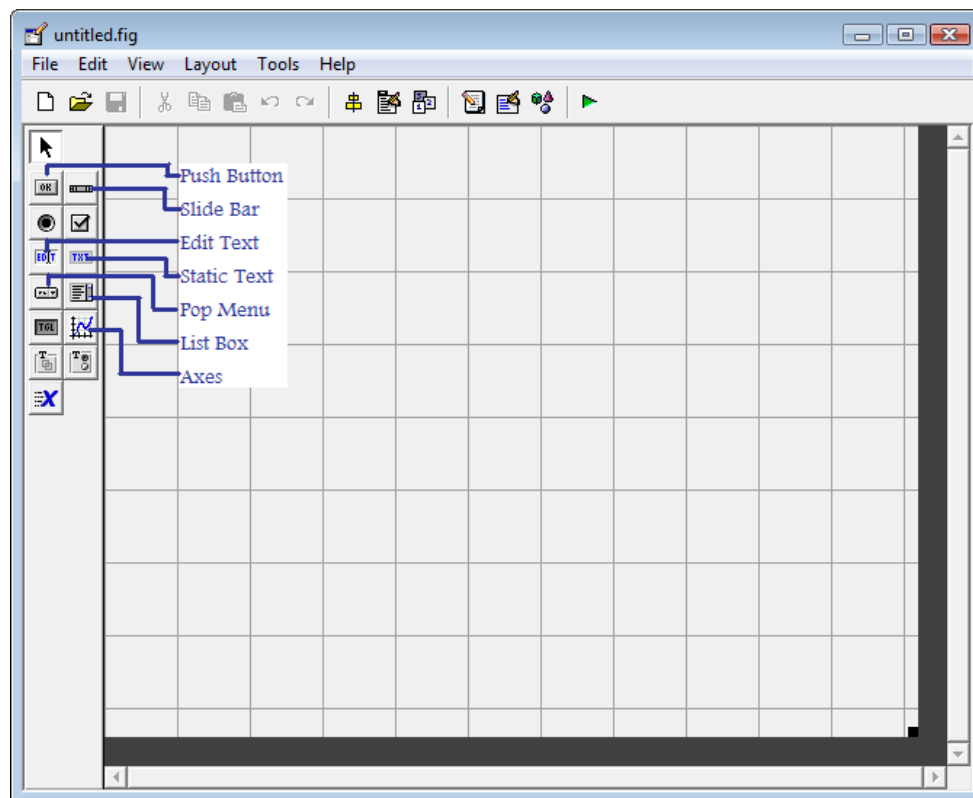


Figura 3.2. Consola de edición gráfica.

Cada uno de los elementos que se pueden colocar en el espacio gráfico tiene su propio inspector de propiedades, el cual nos permite cambiar propiedades como color, tamaño de letra, tipo de letra, nombre asignado al objeto, texto que presenta, etc.

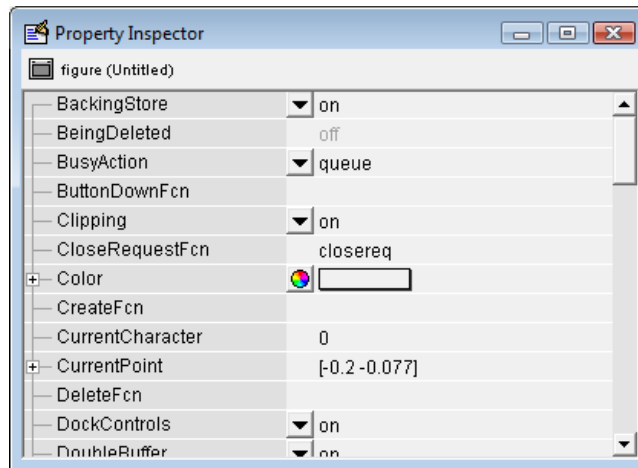


Figura 3.3. Inspector de propiedades del espacio de trabajo.

Para iniciar la programación de la modulación primero creamos el entorno gráfico, pero ya que el software no está dedicado solo a la técnica de modulación OFDM, sino también a los modelos de propagación SUI, creamos en primera instancia una ventana que permita acceder a cualquiera de las opciones a simular. Para crear esta ventana agregamos en el espacio de trabajo nueve botones, y los colocamos como se muestra en la figura 3.4. En este caso el texto que aparecerá al ejecutar el programa será programado en las líneas de código para poder insertar una figura externa y que esta se aprecie en la mayor proporción posible.

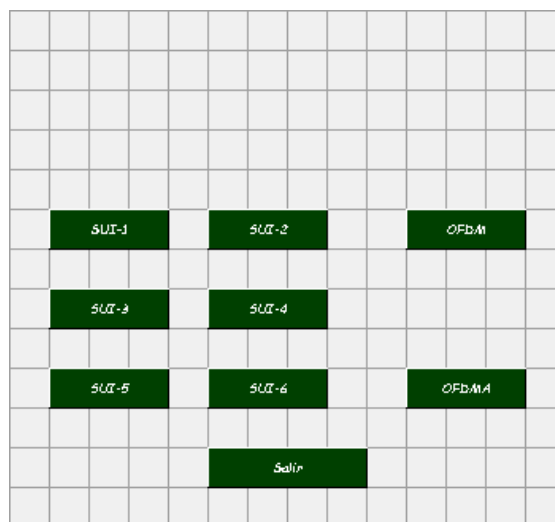


Figura 3.4. Entorno gráfico de la ventana inicial.

Cada uno de los botones estará programado de forma tal que llamará a una nueva ventana relacionada con uno de los modelos de propagación SUI, la modulación OFDM, o la técnica de acceso OFDMA. El botón [Salir] cerrará todas las ventanas que se encuentren abiertas y pertenezcan al software.

Una vez programada la ventana de inicio, pasamos a crear la ventana que permitirá simular la modulación OFDM. Esta constará de cuadros de texto estático, cuadros de edición de texto, botones, un slider bar y un pop menu, dispuestos como se muestra en la figura 3.5.

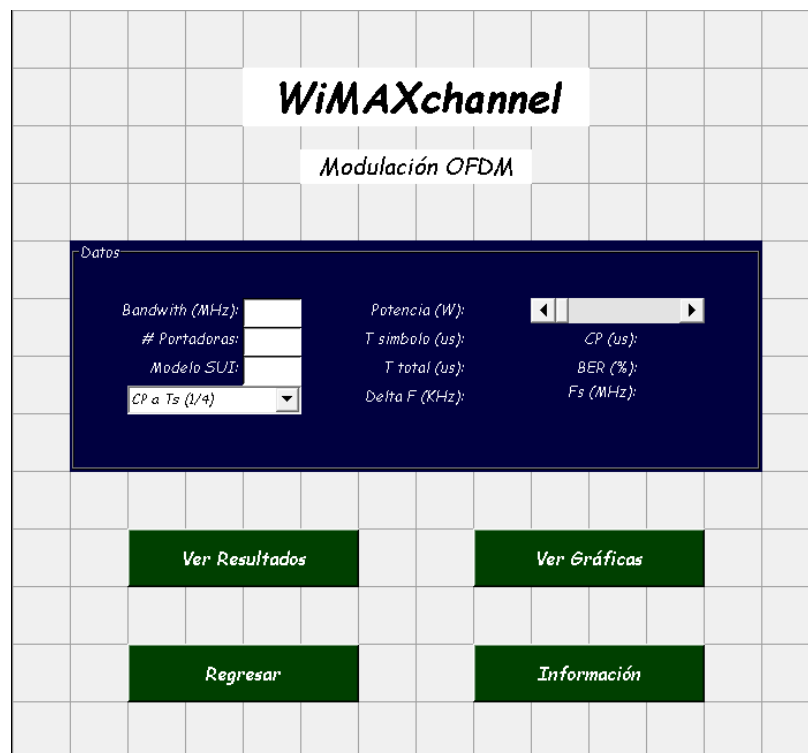


Figura 3.5. Entorno gráfico de la ventana Modulación OFDM.

El botón [Regresar] cierra todas la ventanas relacionadas con la técnica de modulación OFDM. Al presionar el botón Ver [Resultados] se realizaran todos los cálculos necesarios y se presentaran los resultados obtenidos. El botón Información nos llevara a una ventana en la que se encontrará una breve explicación de la técnica de modulación, así como los rangos en los

que se deben encontrar los datos ingresados por el usuario, la parte gráfica de esta ventana se muestra en la figura 3.6.

El botón [Ver Gráficas] nos llevara a una nueva ventana en la que se podrán visualizar gráficamente los resultados de la simulación, esta ventana constara de un objeto axes para mostrar los gráficos, botones, cuadros de texto y un pop menu como se muestra en la figura 3.7.

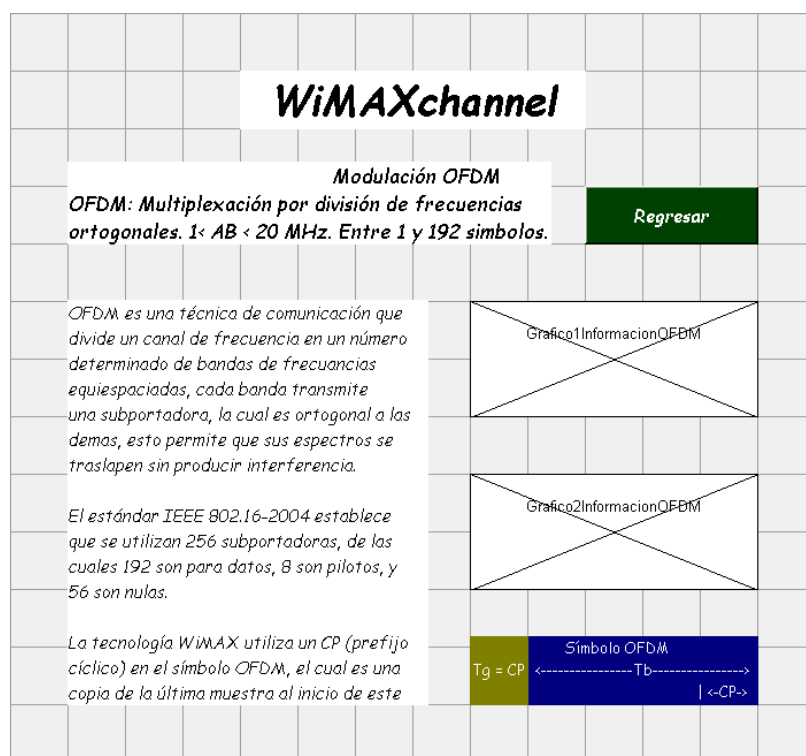


Figura 3.6. Entorno gráfico de la ventana de información OFDM.

El botón [Regresar] está programado para cerrar la ventana de información y volver a la ventana de la modulación OFDM.

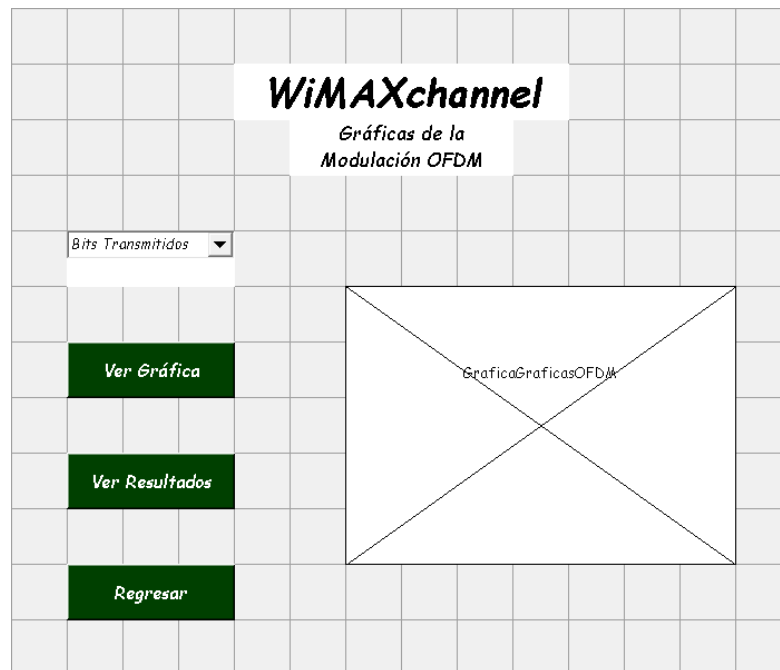


Figura 3.7. Entorno gráfico de la ventana de gráficas OFDM.

El botón [Ver Gráfica] nos mostrará en el objeto axes la gráfica referente a la opción escogida en el pop menú. El botón [Ver Resultados] abrirá la ventana inicial de la modulación OFDM sin cerrar la ventana de gráficas, mientras que el botón [Regresar] cerrará esta ventana y volverá a la venta inicial de la modulación.

3.2 Programación de la Técnica de Acceso OFDMA.

Debido a que el acceso al canal se da en forma aleatoria, la simulación de este se vuelve complejo, ya que se debería realizar una simulación en tiempo real, lo cual no es posible debido a que la programación se da en forma lineal; es decir, no se puede interrumpir el proceso que realiza un comando para que un nuevo usuario ingrese al canal o salga de este ya que dicho proceso quedaría incompleto y se produciría un error, por tal razón en esta sección del software será posible visualizar dos estrategias posibles para acceder al canal.

Inicialmente creamos una ventana que muestra una descripción de la técnica OFDMA, esta ventana constará de cuadros de texto y dos botones como se muestra en la figura 3.8.

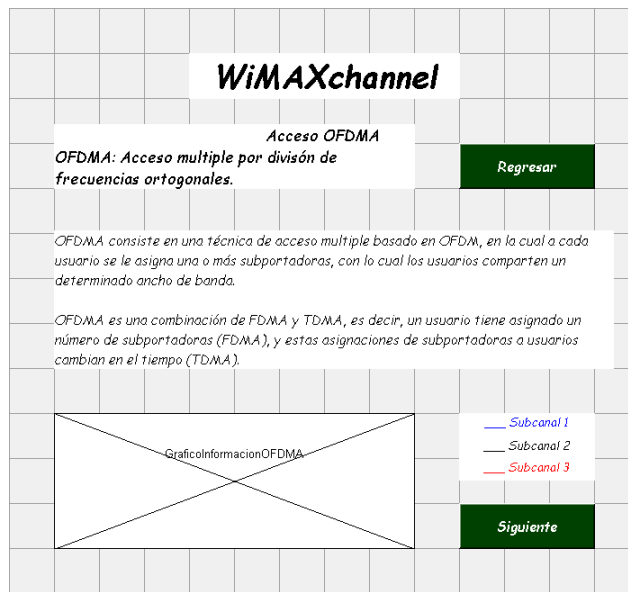


Figura 3.8. Entorno gráfico de la ventana de información OFDMA.

Al presionar el botón [Siguiente] se abrirá una nueva ventana que muestra la primera estrategia de acceso al canal, esta ventana constará de cuadros de texto que explican esta estrategia, un objeto axes y dos botones como se ve en la figura 3.9.

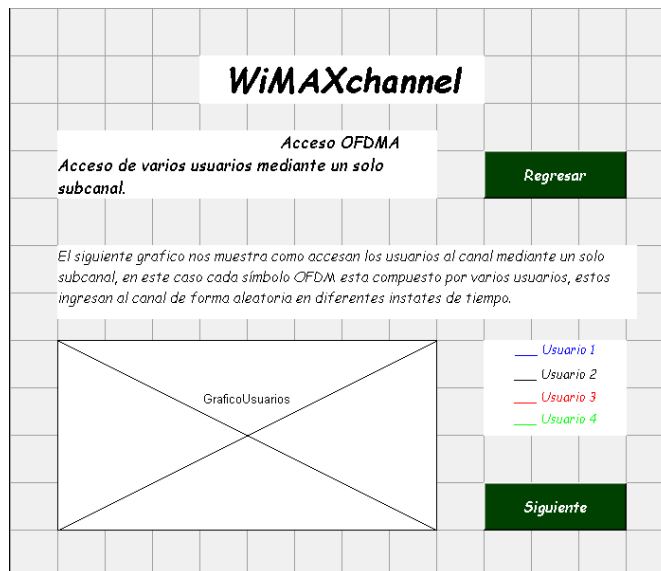


Figura 3.9. Entorno gráfico de la ventana OFDMA1.

El botón [Siguiente] abrirá una nueva ventana que muestra la segunda estrategia de acceso al canal, esta ventana constará de cuadros de texto que explican esta estrategia, un objeto axes y un botón como se ve en la figura 3.10.

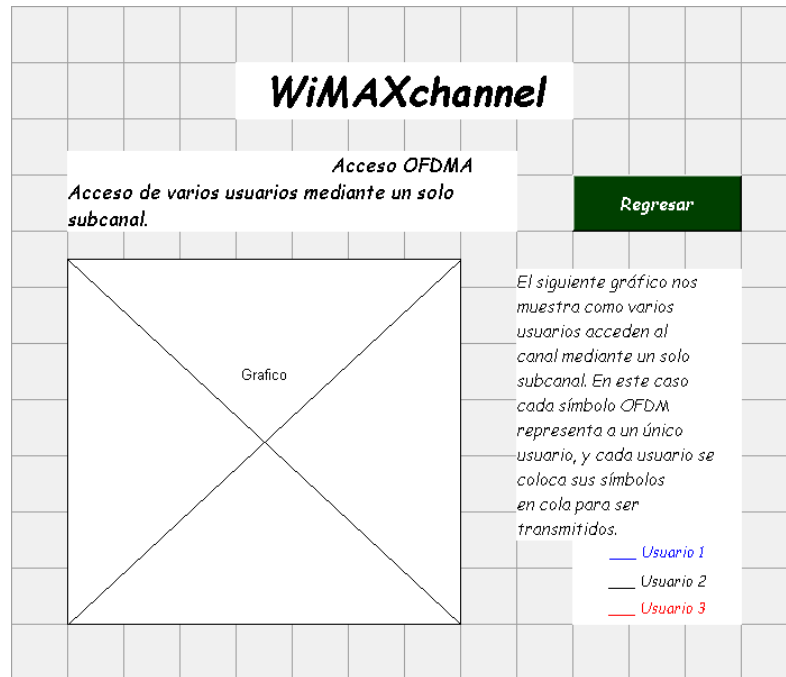


Figura 3.10. Entorno gráfico de la ventana OFDMA2.

3.3 Programación de los modelos SUI tipo A.

Programación del Modelo SUI-5.

Para la programación de este modelo creamos una ventana en la que se permitirá ingresar los datos necesarios para la simulación y se presenten los resultados teóricos. Esta ventana constará de cuadros de texto estático, cuadros de edición de texto, y botones dispuestos como se muestra en la figura 3.11.

WiMAXchannel

Modelo SUI-5

Datos

<i>Frecuencia (GHz):</i> <input type="text"/>	<i>PL (dB):</i>	<i>Delay RMS (us):</i>
<i>Distancia (m):</i> <input type="text"/>	<i>PL (f) (dB):</i>	<i>Ppromedio Tap1 (dB):</i>
<i>Altura Tx (m):</i> <input type="text"/>	<i>PL (hRx) (dB):</i>	<i>Ppromedio Tap2 (dB):</i>
<i>Altura Rx (m):</i> <input type="text"/>	<i>PL total (dB):</i>	<i>Ppromedio Tap3 (dB):</i>

Ver Resultados

Ver Gráficas

Regresar

Información

Figura 3.11. Entorno gráfico de la ventana SUI-5.

El botón [Regresar] cerrará todas las ventanas relacionadas al modelo SUI-5. El botón [Ver Resultados] mostrara los valores calculados para el modelo SUI-5. El botón [Información] abrirá una nueva ventana en el que se indican los datos de la tabla 2.3 así como las características de este modelo y los rangos permitidos para los datos ingresados por el usuario como se muestra en la figura 3.12. Finalmente el botón [Ver Gráficas] abrirá una ventana en la que se pueden observar gráficamente los resultados de la simulación del modelo SUI-5, en la ventana constaran cuadros de texto, un objeto axes, y tres botones dispuestos como se ve en la figura 3.13.

Al presionar el botón [Ver Gráficas] nos permite visualizar en el objeto axes la gráfica referente a la opción escogida en el pop menu. El botón [Ver Resultados] abrirá la ventana principal del modelo SUI-5 sin cerrar la ventana de gráficas, mientras el botón [Regresar], abrirá la venta del modelo SUI-5 pero se cerrara la ventana de gráficas.

Programación del Modelo SUI-6.

La programación gráfica y matemática del modelo SUI-6 es similar a la del modelo SUI-5, con la diferencia de que los botones de forma tal que interactúen con las ventanas del modelo SUI-6, para declarar las variables dadas en la tabla 2.4, se crea una función llamada Variables = DeclracionVariables (Modelo), la que devuelve un vector que contiene los valores dados en las tablas 2.3 hasta 2.8.

Para la programación de este modelo se crean 3 ventanas similares a las del modelo SUI-5, es decir, una ventana de resultados o inicial, una de información y una de gráficas. El entorno gráfico de estas ventanas se muestra en las figuras 3.14, 3.15, y 3.16 respectivamente.

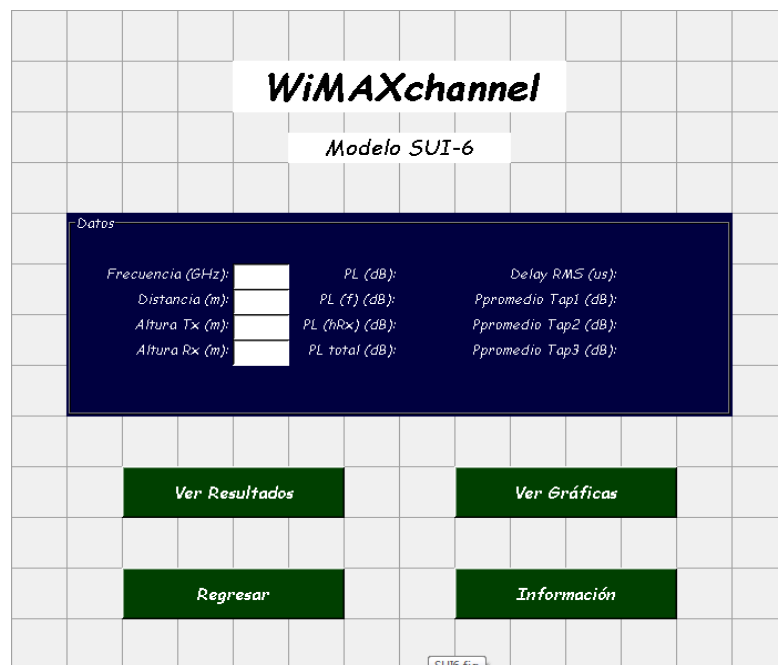


Figura 3.14. Entorno gráfico de la ventana SUI-6.

3.4 Programación de los modelos SUI tipo B.

Programación del Modelo SUI-3.

La programación gráfica y matemática del modelo SUI-3 es similar a la del modelo SUI-5, con la diferencia de que los botones de forma tal que interactúen con las ventanas del modelo SUI-3, otra diferencia se encuentra en que para declarar las variables dadas en la tabla 2.5, se crea una función llamada `Variables = DeclracionVariables (Modelo)`, la cual recibe como parámetro el número del modelo en el que se está trabajando y devuelve un vector que contiene los valores dados en las tablas 2.3 hasta 2.8.

Para la programación de este modelo se crean 3 ventanas similares a las del modelo SUI-5, es decir, una ventana de resultados o inicial, una de información y una de gráficas. El entorno gráfico de estas ventanas se muestra en las figuras 3.17, 3.18, y 3.19 respectivamente.

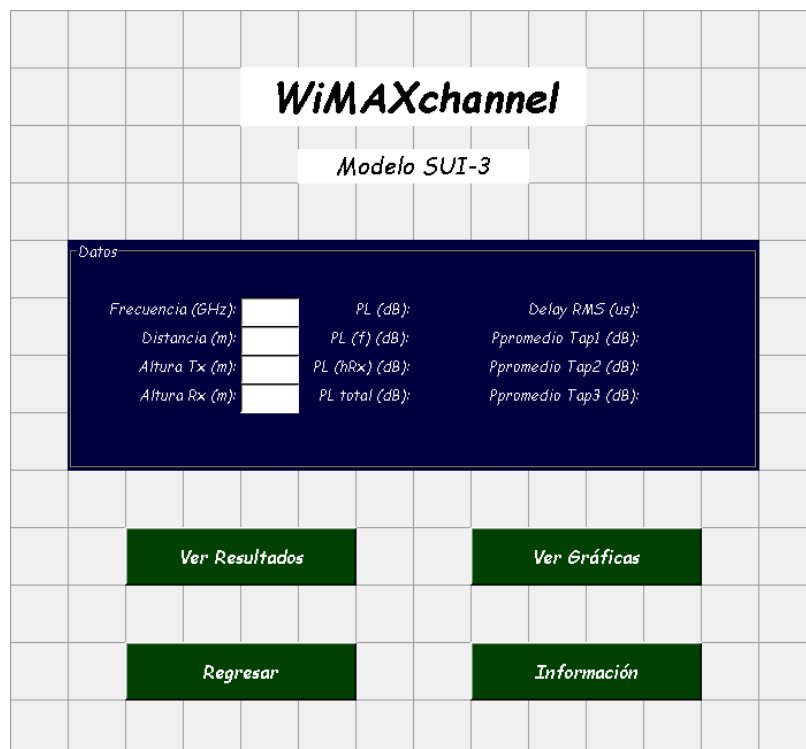


Figura 3.17. Entorno gráfico de la ventana SUI-3.

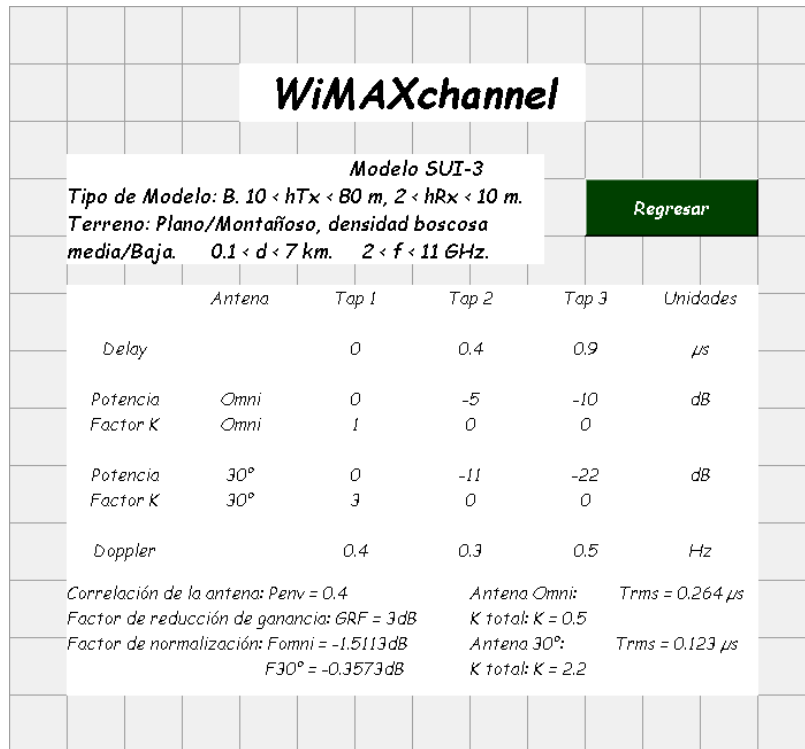


Figura 3.18. Entorno gráfico de la ventana información SUI-3.

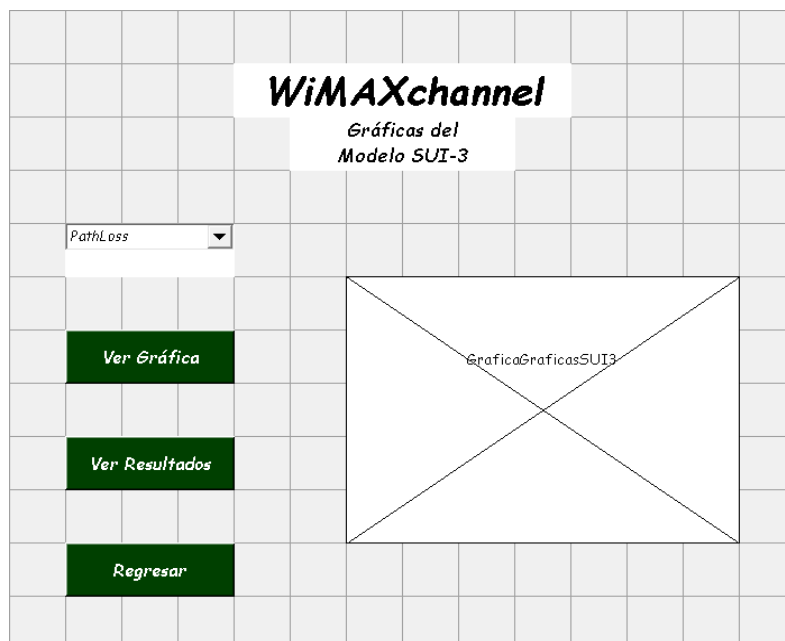


Figura 3.19. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-3.

Programación del Modelo SUI-4.

La programación gráfica y matemática del modelo SUI-4 es similar a la del modelo SUI-5, con la diferencia de que los botones de forma tal que interactúen con las ventanas del modelo SUI-4, otra diferencia se encuentra en que para declarar las variables dadas en la tabla 2.6, se crea una función llamada `Variables = DeclracionVariables (Modelo)`, la cual recibe como parámetro el número del modelo en el que se está trabajando y devuelve un vector que contiene los valores dados en las tablas 2.3 hasta 2.8.

Para la programación de este modelo se crean 3 ventanas similares a las del modelo SUI-5, es decir, una ventana de resultados o inicial, una de información y una de gráficas. El entorno gráfico de estas ventanas se muestra en las figuras 3.20, 3.21, y 3.22 respectivamente.

The image shows a MATLAB GUI for the 'WiMAXchannel Model SUI-4'. The window has a title bar with 'WiMAXchannel' and a subtitle 'Modelo SUI-4'. The main area is a dark blue panel labeled 'Datos' containing several input fields and labels:

- Frecuencia (GHz):
- Distancia (m):
- Altura Tx (m):
- Altura Rx (m):
- PL (dB):
- PL (f) (dB):
- PL (hRx) (dB):
- PL total (dB):
- Delay RMS (us):
- Ppromedio Tap1 (dB):
- Ppromedio Tap2 (dB):
- Ppromedio Tap3 (dB):

Below the input fields, there are four green buttons with white text:

- Ver Resultados
- Ver Gráficas
- Regresar
- Información

Figura 3.20. Entorno gráfico de la ventana SUI-4.

3.5 Programación de los modelos SUI tipo C.

Programación del Modelo SUI-1.

La programación gráfica y matemática del modelo SUI-1 es similar a la del modelo SUI-5, con la diferencia de que los botones de forma tal que interactúen con las ventanas del modelo SUI-1, la función `DeclaracionVariables (Modelo)` entregará los datos de la tabla 2.7.

Para la programación de este modelo se crean 3 ventanas similares a las del modelo SUI-5, es decir, una ventana de resultados o inicial, una de información y una de gráficas. El entorno gráfico de estas ventanas se muestra en las figuras 3.23, 3.24, y 3.25 respectivamente.

El entorno gráfico de la ventana SUI-1 se muestra en la siguiente imagen:

WiMAXchannel
Modelo SUI-1

Datos

Frecuencia (GHz):	<input type="text"/>	PL (dB):	<input type="text"/>	Delay RMS (us):	<input type="text"/>
Distancia (km):	<input type="text"/>	PL (f) (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap1 (dB):	<input type="text"/>
Altura Tx (m):	<input type="text"/>	PL (nRx) (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap2 (dB):	<input type="text"/>
Altura Rx (m):	<input type="text"/>	PL total (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap3 (dB):	<input type="text"/>

Ver Resultados Ver Gráficas

Regresar Información

Figura 3.23. Entorno gráfico de la ventana SUI-1.

Programación del Modelo SUI-2.

La programación gráfica y matemática del modelo SUI-2 es similar a la del modelo SUI-5, con la diferencia de que los botones de forma tal que interactúen con las ventanas del modelo SUI-2, la función `DeclaracionVariables (Modelo)` entregará los datos de la tabla 2.8.

Para la programación de este modelo se crean 3 ventanas similares a las del modelo SUI-5, es decir, una ventana de resultados o inicial, una de información y una de gráficas. El entorno gráfico de estas ventanas se muestra en las figuras 3.26, 3.27, y 3.28 respectivamente.

WiMAXchannel

Modelo SUI-2

Datos

Frecuencia (GHz):	<input type="text"/>	PL (dB):	<input type="text"/>	Delay RMS (us):	<input type="text"/>
Distancia (km):	<input type="text"/>	PL (f) (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap1 (dB):	<input type="text"/>
Altura Tx (m):	<input type="text"/>	PL (hRx) (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap2 (dB):	<input type="text"/>
Altura Rx (m):	<input type="text"/>	PL total (dB):	<input type="text"/>	Ppromedio Tap3 (dB):	<input type="text"/>

Ver Resultados **Ver Gráficas**

Regresar **Información**

Figura 326. Entorno gráfico de la ventana SUI-2.

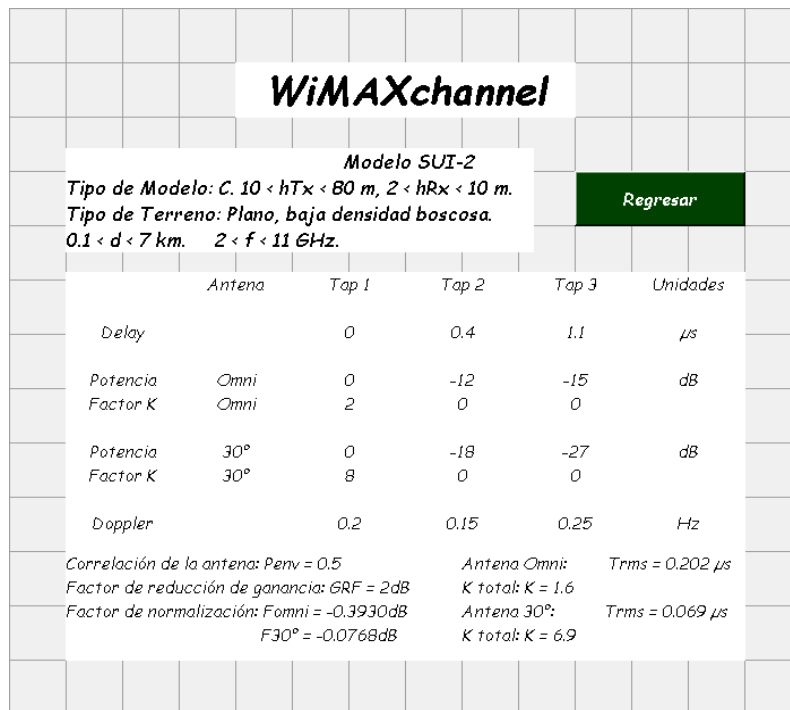


Figura 3.27. Entorno gráfico de la ventana información SUI-2.

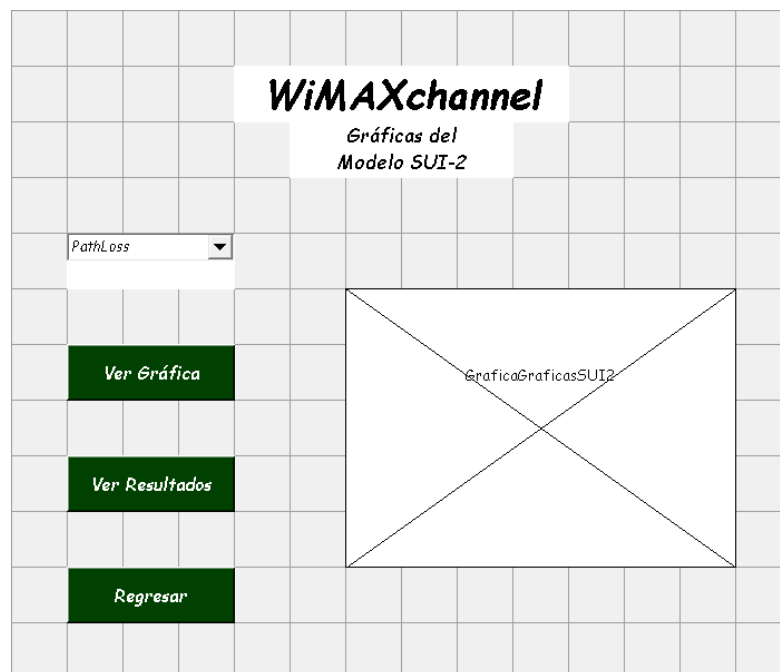


Figura 3.28. Entorno gráfico de la ventana de gráficas SUI-2.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de simulación de la modulación OFDM.

Para realizar la simulación de la modulación OFDM o de cualquier otra técnica presente en el software primero debemos abrir el programa WiMAXchannel, este es el nombre del software creado, el programa puede ser abierto de dos formas diferentes, una mediante la ventana de comandos de MATLAB, o mediante el archivo ejecutable que lleva el nombre del software, WiMAXchannel.exe.

Si deseamos abrir el programa mediante la ventana de comandos de MATLAB primero debemos copiar la carpeta WiMAXchannel en la carpeta Work de MATLAB, la carpeta WiMAXchannel es la que contiene todos los archivos .m y .fig necesarios para el funcionamiento del software, una vez que la carpeta ha sido copiada, abrimos el programa MATLAB y cambiamos el directorio de este a la carpeta WiMAXchannel, y en la hoja de comandos escribimos WiMAXchannel, como se muestra en la figura 4.1.

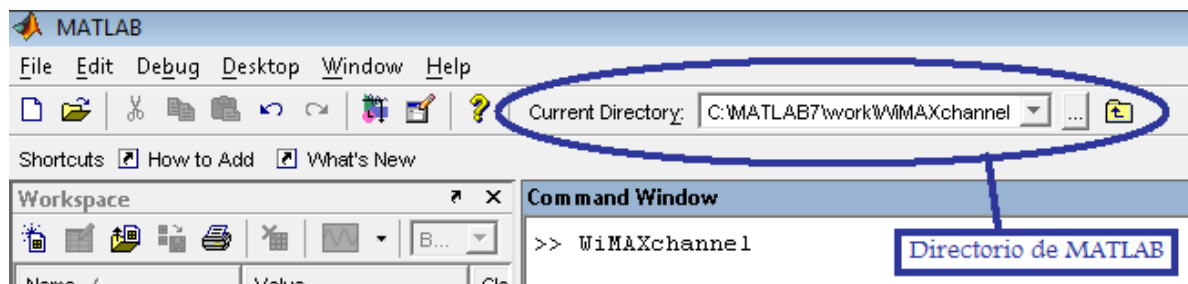


Figura 4.1. Ingreso al programa WiMAXchannel mediante la ventana de comandos de MATLAB.

Una vez que el programa se abre, veremos una ventana con los diferentes botones para acceder a las distintas simulaciones como se muestra en la figura 4.2, abrimos la simulación de la modulación OFDM, y veremos una ventana como la que se muestra en la figura 4.3.

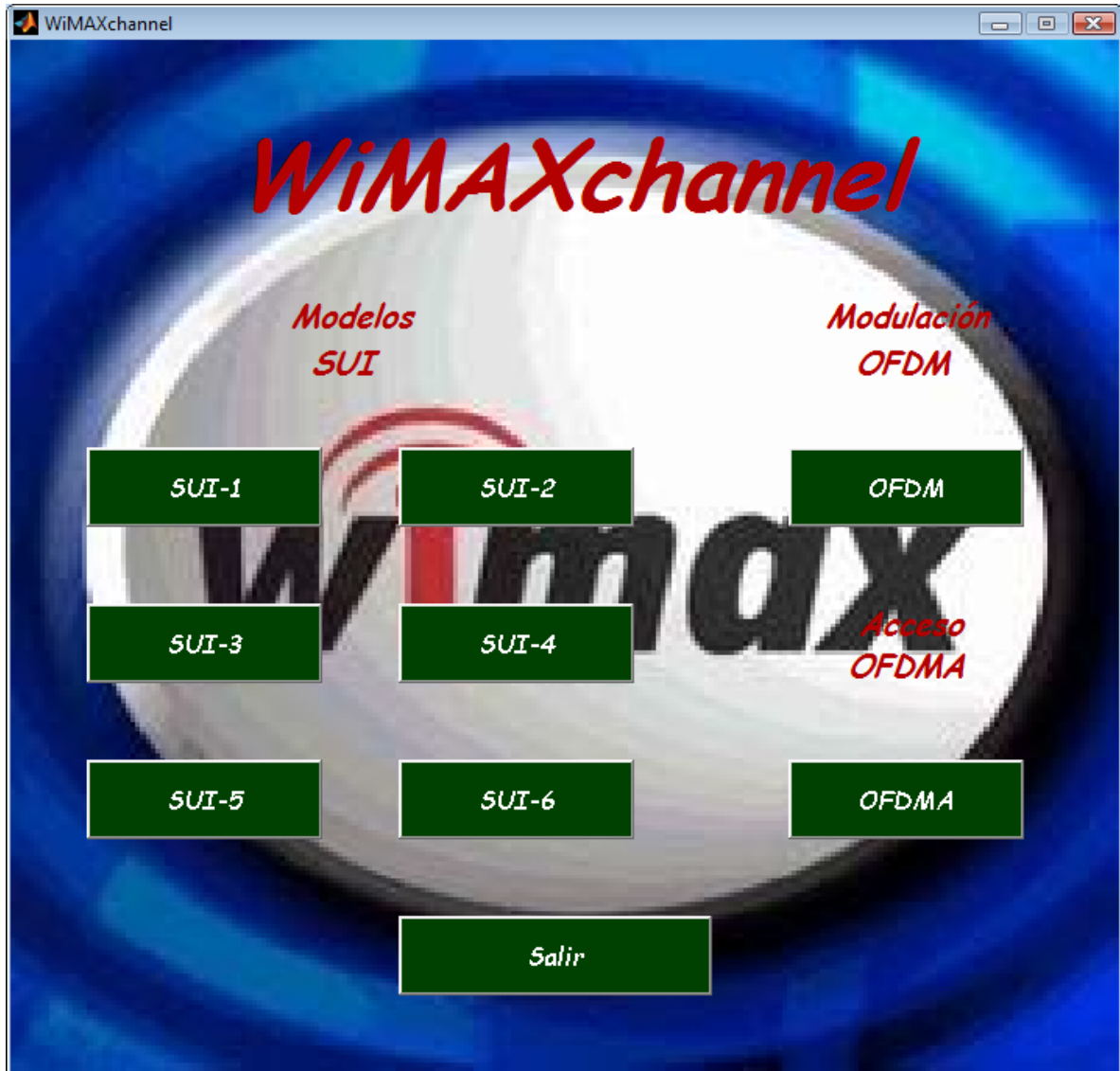


Figura 4.2. Ventana de inicio del software WiMAXchannel.



Figura 4.3. Ventana inicial de la modulación OFDM.

El software está diseñado de forma que la modulación de cada sub-portadora sea bajo el esquema QPSK. Los datos que debemos ingresar para realizar la simulación de la modulación OFDM son el ancho de banda en MHz y en un rango de 1 a 20 MHz. El número de portadoras es la cantidad de portadoras que se desea asignar a un único usuario; este es equivalente al número de símbolos OFDM, ya que cada portadora va a transmitir un símbolo OFDM a la vez, ya que en el estándar IEEE 802.16d se utilizan 192 portadoras para la transmisión de datos, este será el número máximo de portadoras que permitirá ingresar el

software y un mínimo de una portadora. El modelo SUI corresponde al modelo de canal que se utilizará en la simulación y puede ser cualquiera de los seis modelos que permite simular el software. El CP a T_s es la relación entre el prefijo cíclico y el Tiempo útil del símbolo, el cual puede tomar valores de $1/4$, $1/8$, $1/16$, y $1/32$ como lo dice el estándar IEEE 802.16d. Finalmente tenemos un slide bar que permite seleccionar la potencia del transmisor entre 1 y 10 W.

Para la simulación hemos seleccionado los siguientes valores:

- Ancho de banda (Bandwith) = 2 MHz.
- Número de portadoras (# Portadoras) = 1, para una mejor visualización de la señal modulada y distorsionada.
- Modelo SUI = 4, ya que es un entorno que comúnmente se encuentra a lo largo del Ecuador.
- CP a $T_s = 1/4$.
- Potencia = 10 W.

Una vez ingresados los valores procedemos a presionar el botón [Ver Resultados], inmediatamente el software realizará los cálculos necesarios y presentará los siguientes valores:

- Tiempo útil del símbolo OFDM (T símbolo) = 112.28 μ s.
- Tiempo del prefijo cíclico (CP) = 28.07 μ s.
- Tiempo total del símbolo OFDM (T total) = 140.35 μ s.
- Bit error rate (BER) = 1.0416%.
- Espacio de frecuencia entre portadoras (Delta F) = 8.906 KHz.
- Frecuencia de muestreo de la señal (F_s) = 2.28 MHz.

El siguiente paso es observar las gráficas correspondientes a la simulación de la modulación OFDM, para esto presionamos el botón [Ver Gráficas], el cual nos llevará a la ventana de gráficas, la cual por default nos mostrará los bits que se transmitieron, como se muestra en la figura 4.4.

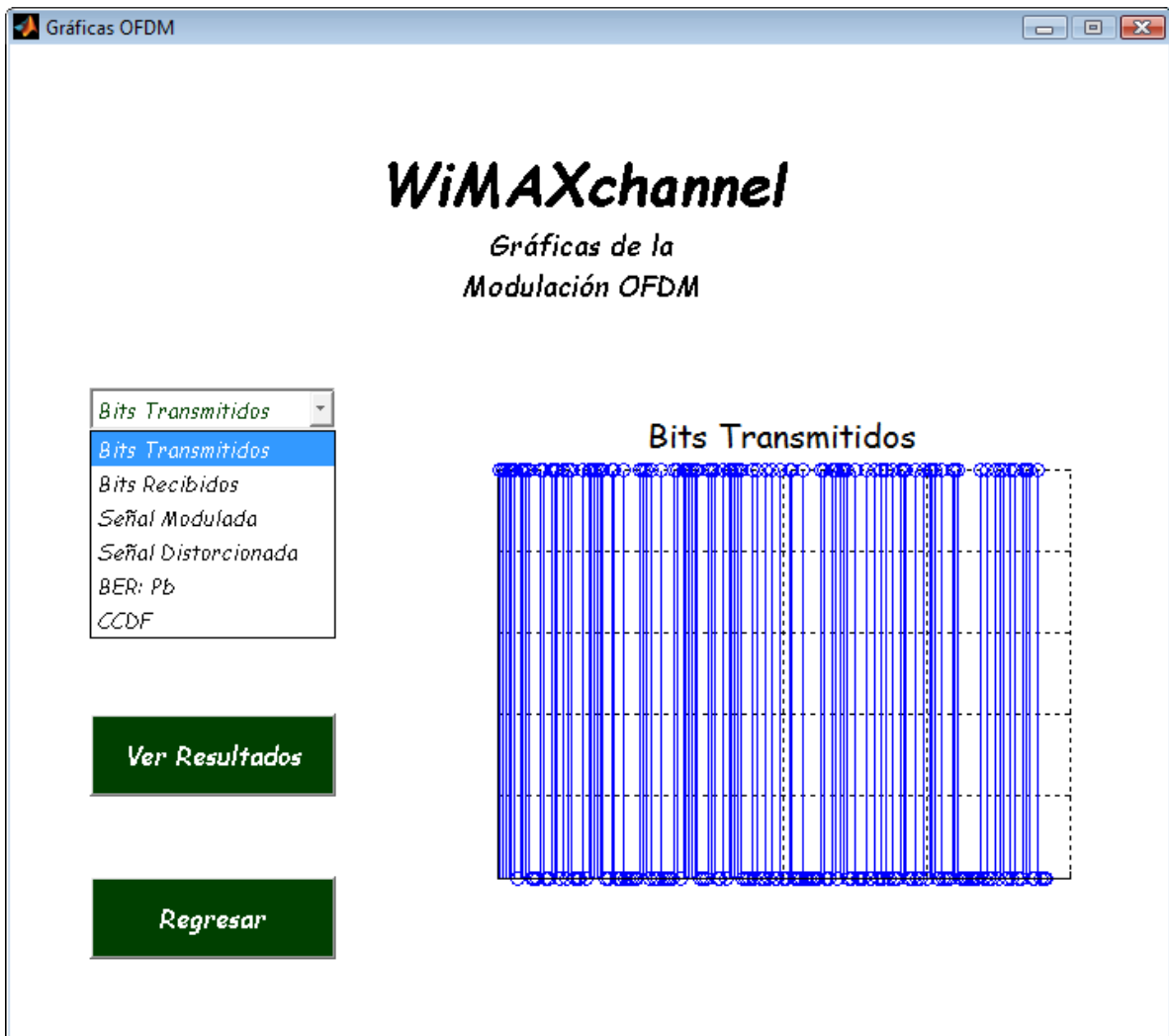


Figura 4.4. Ventana de gráficas de la modulación OFDM.

En el menú podemos seleccionar diferentes gráficas, una vez que seleccionamos la gráfica que deseamos observar presionamos el botón [Ver Gráfica] y esta se mostrará reemplazando a la gráfica que se está observando en ese instante.

La figura 4.5 nos muestra la gráfica de los bits recibidos, estos variaran respecto a los bits transmitidos dependiendo de la potencia del transmisor, mientras aumentamos la potencia el BER disminuirá, por tanto los bits errados serán menores.

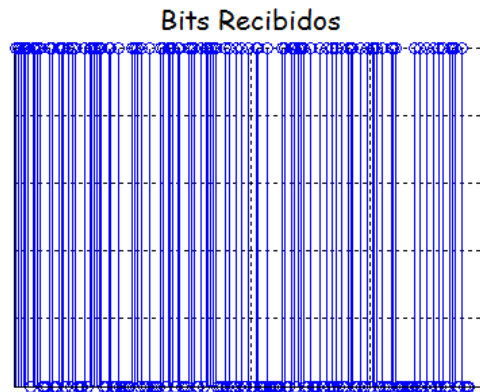


Figura 4.5. Bits recibidos en la simulación de la modulación OFDM.

Como se explicó en el capítulo 1, la modulación OFDM consiste en la división del espectro en sub-portadoras, estas serán asignadas a los usuarios, y estos modularán sus datos bajo un esquema dependiente de la relación señal a ruido, el software modula la información bajo el esquema QPSK, a esta señal se aplica la transformada inversa rápida de Fourier obteniendo la señal a transmitir en el dominio del tiempo como se muestra en la figura 4.6.

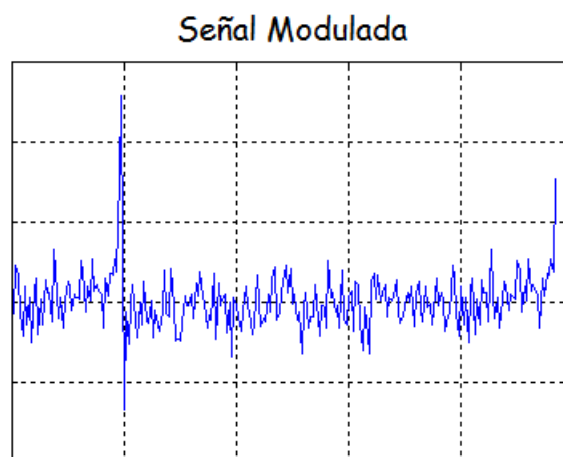


Figura 4.6. Señal modulada a transmitir.

Cuando la señal se transmite esta se distorsiona por efectos de ruido, pérdida en el espacio libre y efectos del canal en sí, por tanto el receptor tendrá una señal con potencia baja y diferente a la señal que se transmitió originalmente, como se puede ver en la figura 4.7, la señal original presenta poca distorsión, esto se debe una vez más a la potencia del transmisor, mientras la potencia de esta es mayor la señal en el receptor presentará menor distorsión por lo tanto el BER será menor.

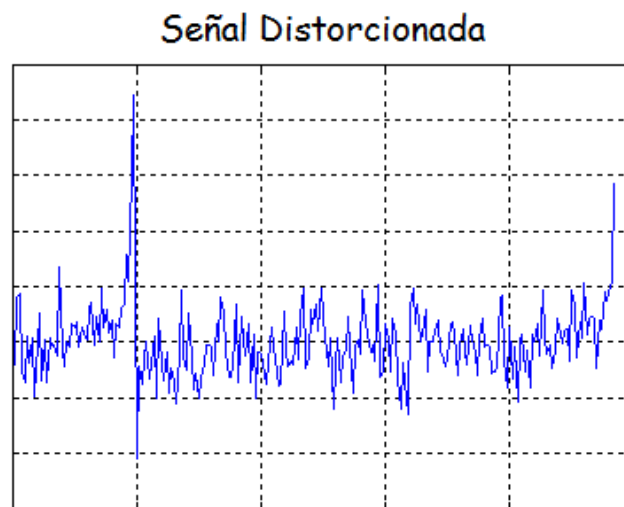


Figura 4.7. Señal distorsionada presente en el receptor.

Un parámetro muy importante en todo tipo de modulación es la probabilidad de error de bit, esta es dependiente del tipo de canal en el que se trabaja, en el capítulo 1 se especificó la probabilidad de error de bits para canales tipo Rayleigh según la modulación que se utiliza. La figura 4.8 muestra la curva que sigue una señal modulada bajo el esquema QPSK en un canal tipo Rayleigh, esta es una aproximación del BER real que presenta el sistema, mediante esta curva podemos tener una proyección de cómo aumenta o disminuye el BER en función de la potencia que se transmite. Así podemos realizar una comparación entre el BER calculado y esta curva, el BER calculado tendrá valores aproximados a los que se presentan en la curva de probabilidad de error de bit.

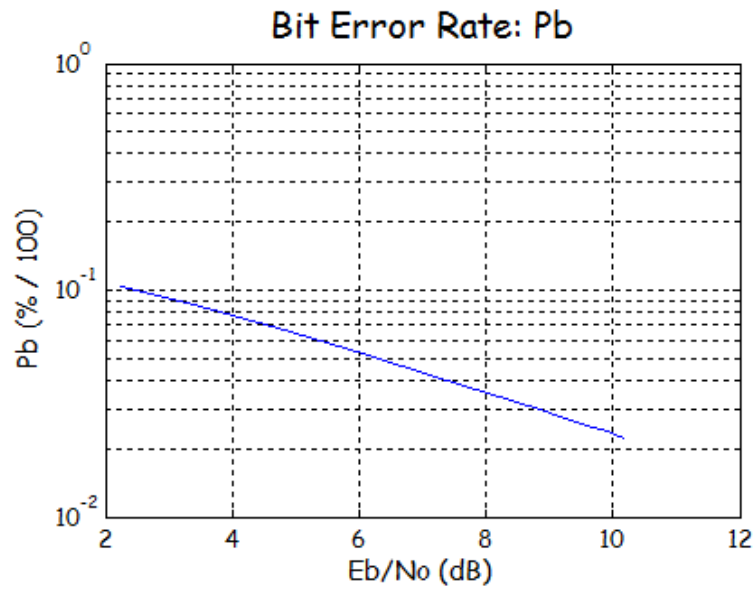


Figura 4.8. Probabilidad de error de bit de una señal QPSK en un canal Rayleigh.

Ya que las señales OFDM tienen una tasa de pico a potencia promedio (PAR) alta, es necesario analizar este factor con el objetivo de realizar una ecualización adecuada, la curva que nos permite realizar este análisis es la curva de la función de distribución acumulada complementaria (CCDF), y se muestra en la figura 4.9.

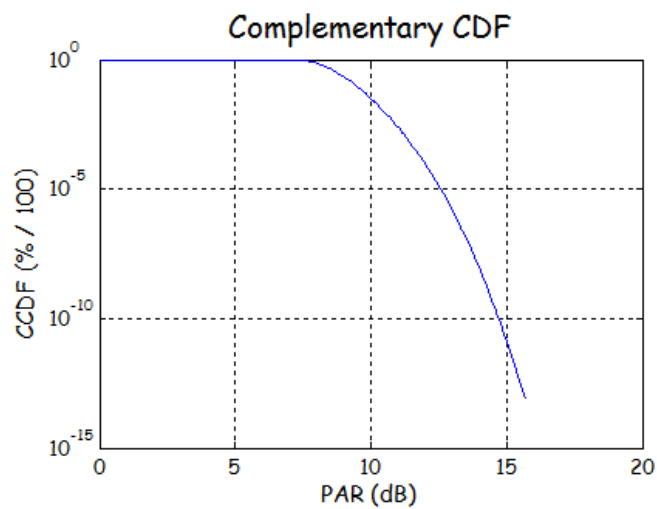


Figura 4.8. CCDF de la señal OFDM recibida.

4.2 Análisis de simulación de la técnica de acceso OFDMA.

Para acceder a la simulación de la técnica de acceso OFDMA presionamos el botón OFDMA en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde se encuentra una breve explicación del funcionamiento de esta técnica de acceso al medio y como se realiza la sub-canalización de los usuarios, como se muestra en la figura 4.9.

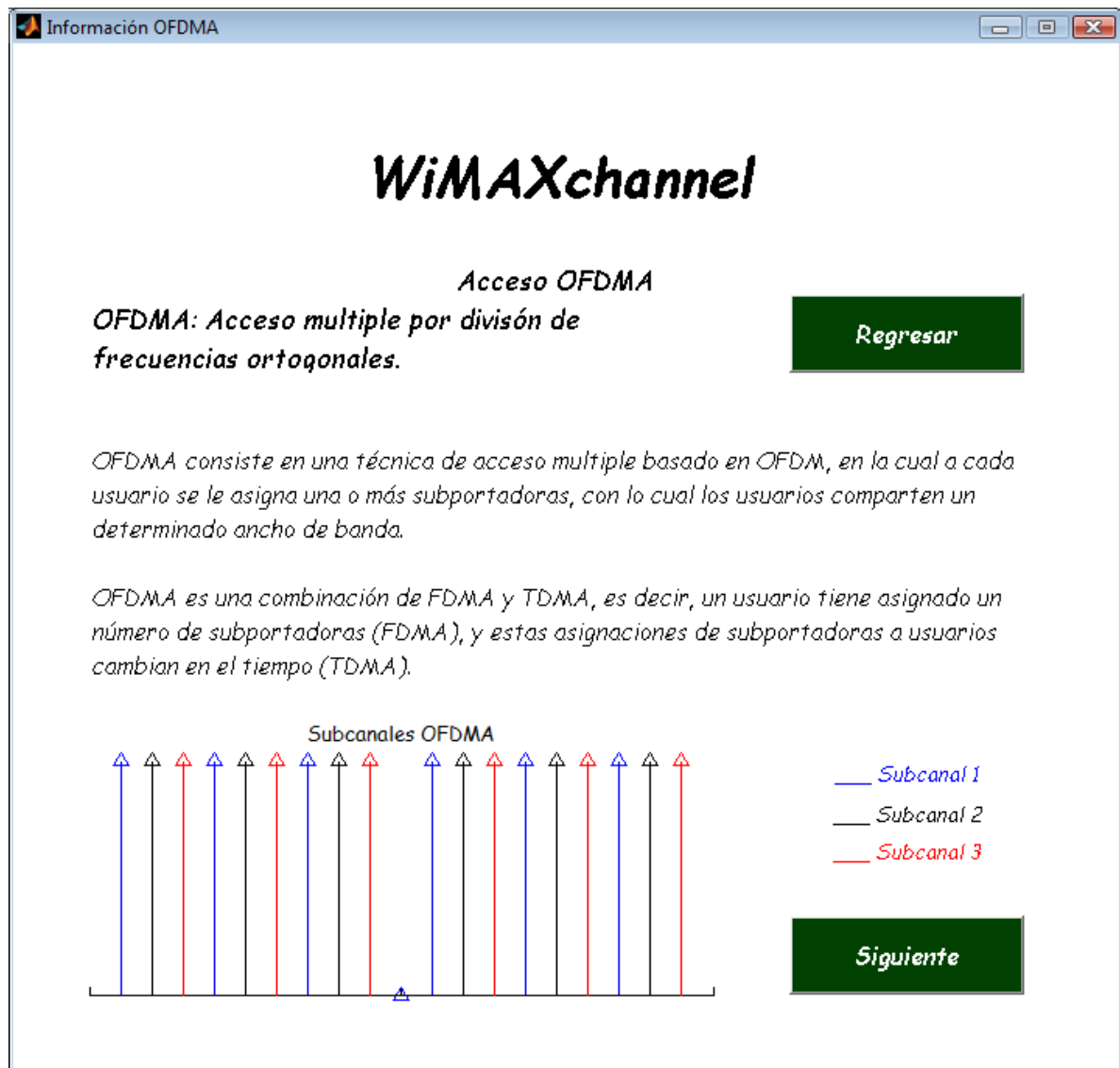


Figura 4.9. Ventana de información de la técnica de acceso OFDMA.

Para continuar con la simulación de esta técnica presionamos el botón [Siguiente]. Para mostrar el funcionamiento de la técnica OFDMA se han determinado cuatro usuarios que acceden al canal, la forma en la que acceden a las portadoras los usuarios depende de la estrategia que despliega el operador, una de estas estrategias es que en un solo símbolo OFDM se encuentren datos de todos los usuarios que acceden al canal, esto es factible si el número de usuarios que acceden a las mismas portadoras no es demasiado grande. Esta estrategia se muestra en la figura 4.10.

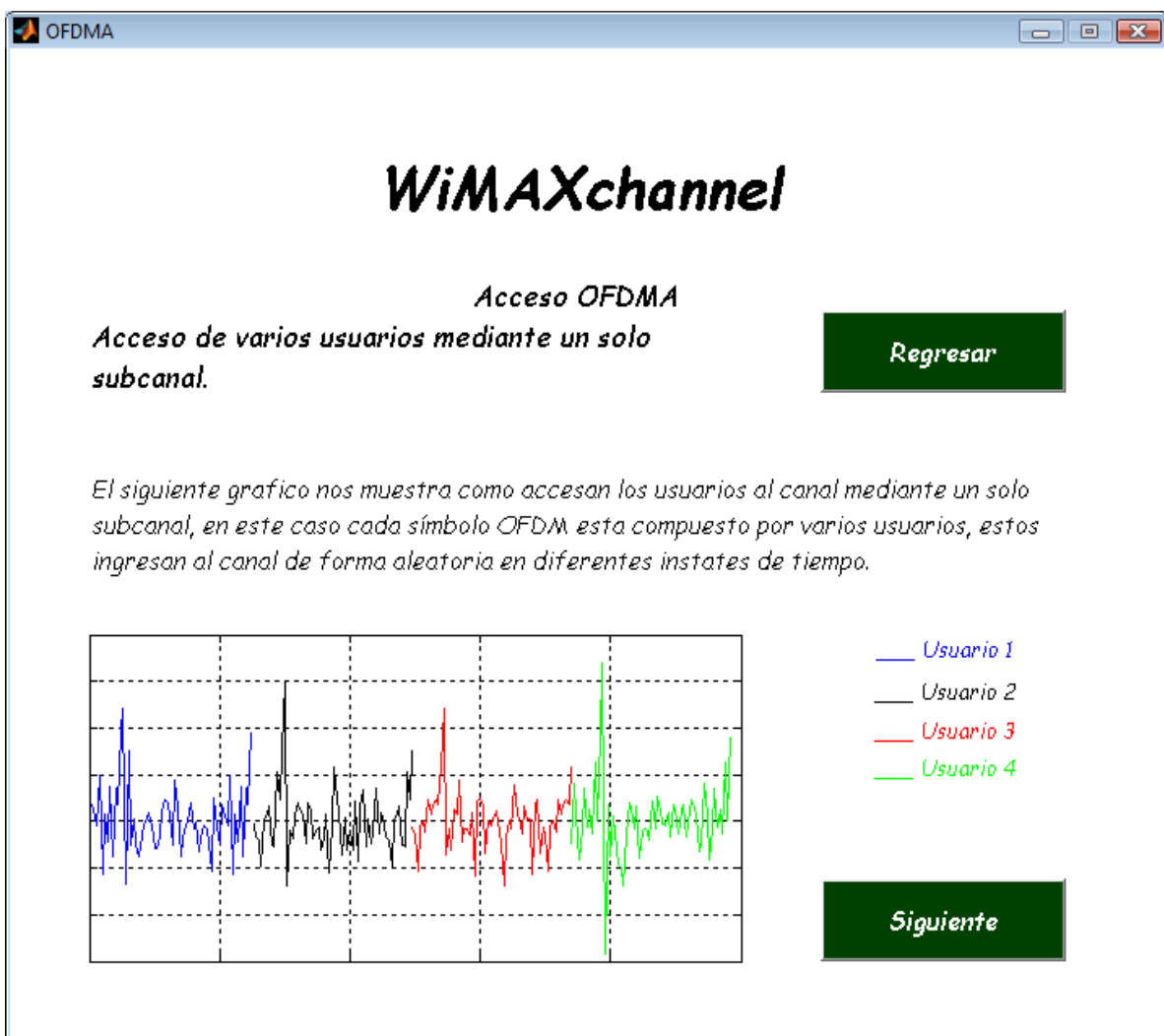


Figura 4.10. Acceso al canal de varios usuarios en un solo símbolo OFDM.

Al presionar el botón [Siguiente] podemos ver una segunda estrategia que puede desplegar el operador, cuando el número de usuarios es muy alto como para que todos inserten una porción de sus datos en un símbolo OFDM para ser transmitido la técnica anterior deja de ser eficaz, la solución es que cada usuario ocupe todo el símbolo OFDM para transmitir sus datos, una vez que el primer símbolo perteneciente al primer usuario es transmitido, se transmite el primer símbolo perteneciente al segundo usuario, y así hasta que todos los usuarios hayan tenido la oportunidad de transmitir su primer símbolo. El proceso se repite para el segundo, tercero, y N símbolos que desee transmitir cada usuario. La figura 4.11 muestra como funciona esta estrategia.

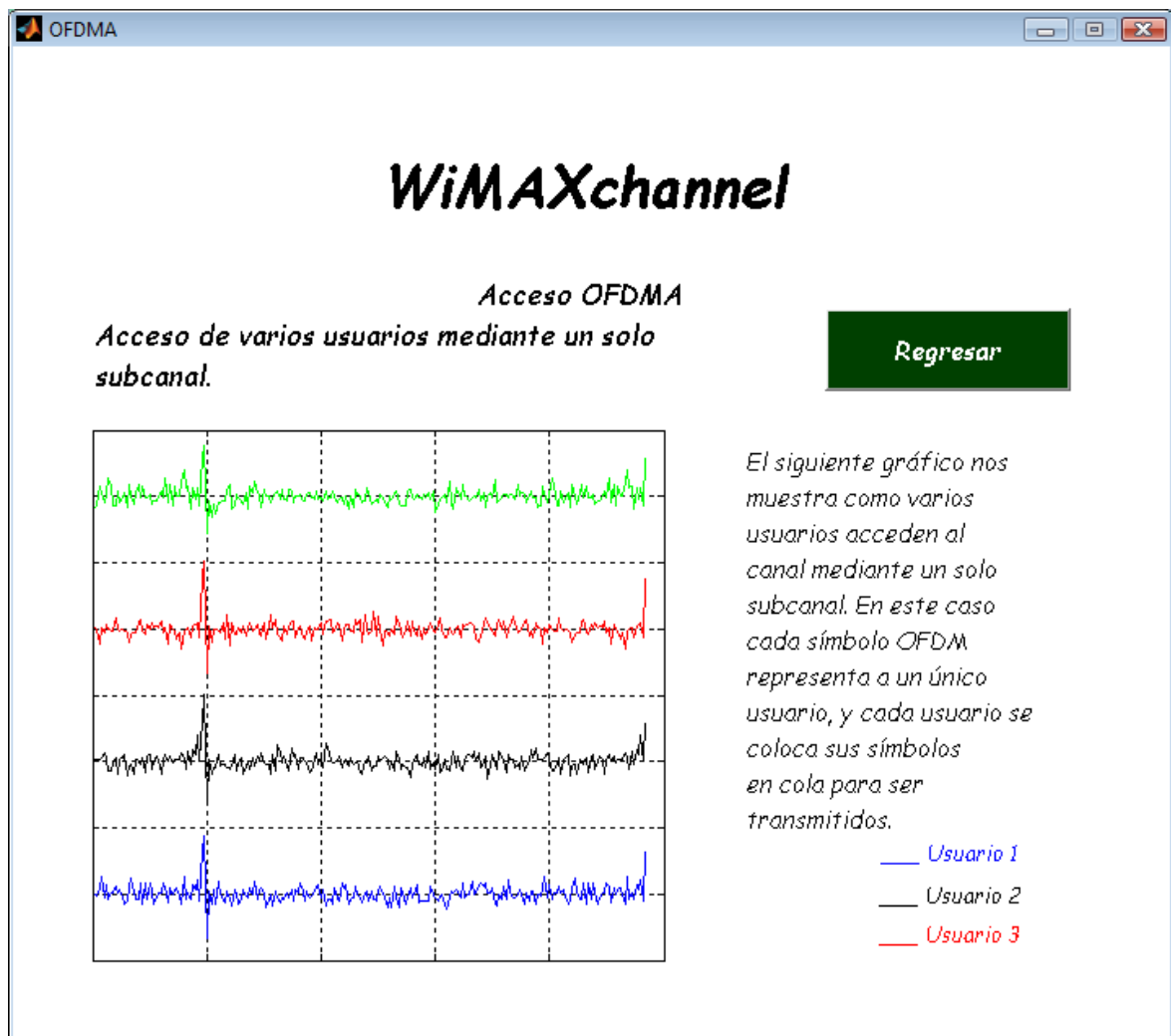


Figura 4.11. Acceso al canal de varios usuarios utilizando un símbolo OFDM cada uno.

4.3 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo A.

Simulación del modelo SUI-5.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-5 presionamos el botón [SUI-5] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.12.



Figura 4.12. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-5.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 2.4 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 158.18 dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 0.475 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 158.66 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 2.828 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = -1.401 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -6.822 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -10.60 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica], la ventana muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.13.

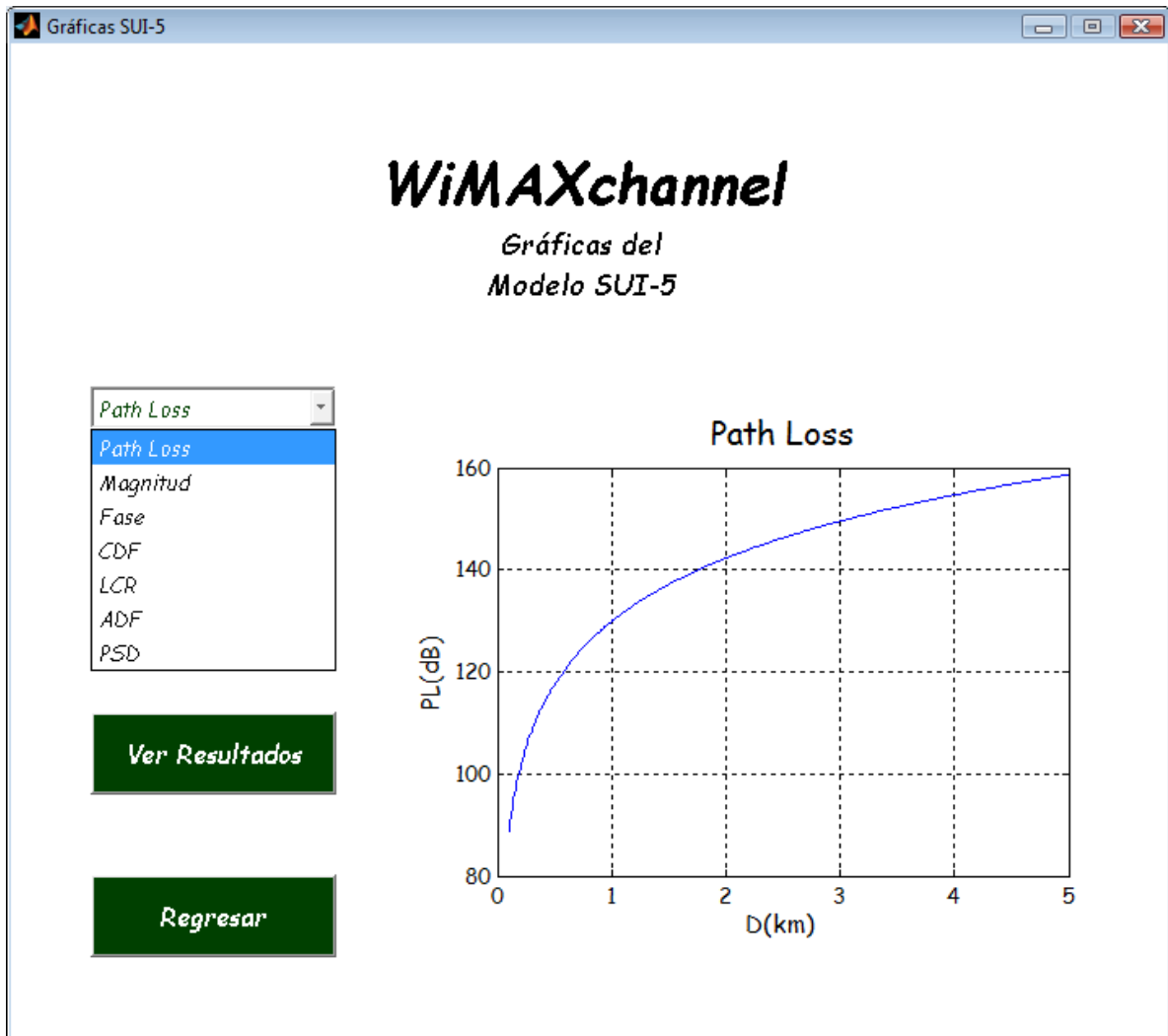


Figura 4.13. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-5.

Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.13 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor. Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal, los cuales varían a lo largo del tiempo. Esta pérdida de señal corresponde a los desvanecimientos por multitrayecto, como la topografía de los canales tipo A presentan una mayor cantidad de interferencias, la señal estará severamente sometida a los desvanecimientos multitrayecto. La característica de magnitud del canal así como las contribuciones de cada eco se presentan en la figura 4.14.

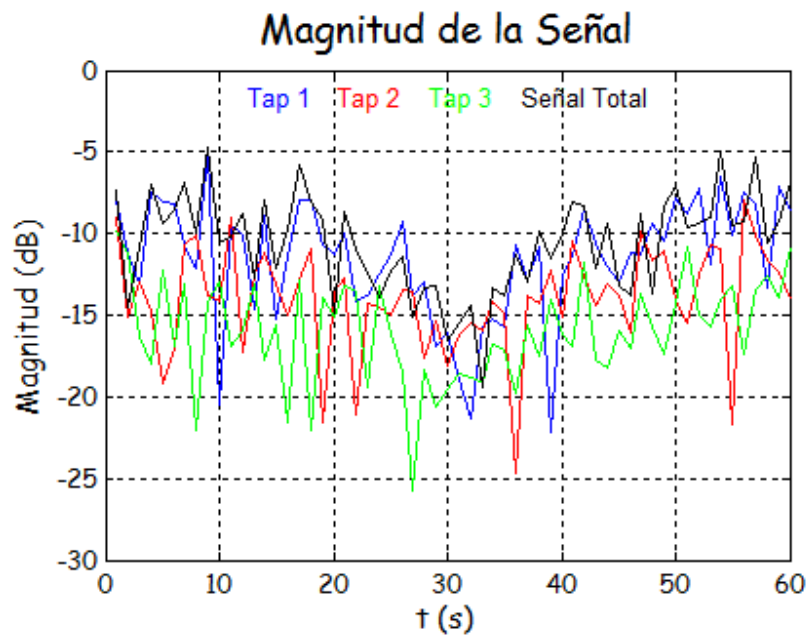


Figura 4.14. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-5.

En la figura 4.15 podemos observar la fase de la señal y la fase correspondiente a los ecos de que la forman, estas varían entre -180 y 180 grados, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

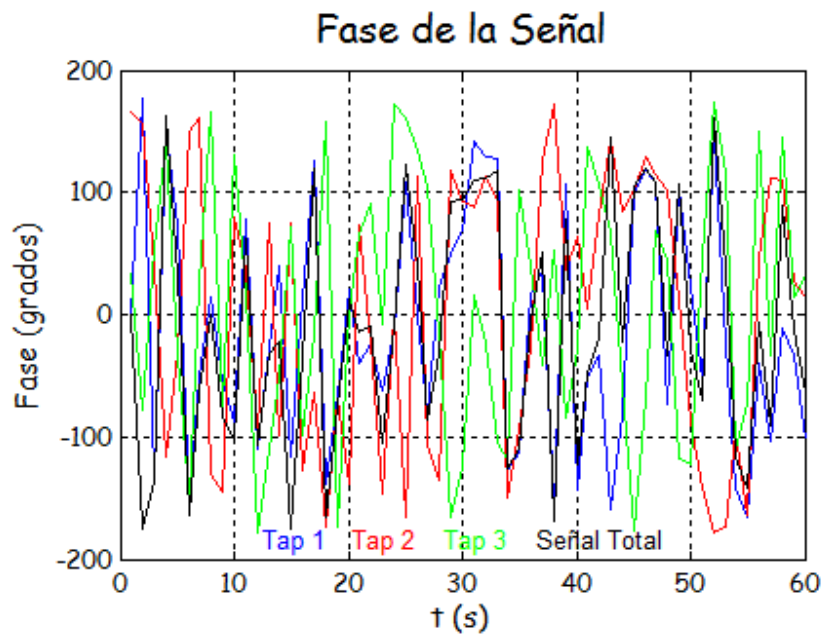


Figura 4.15. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-5.

La función de distribución acumulada (CDF) nos ayuda a observar la cantidad en que el nivel de potencia recibido de la señal requiere ser aumentado para alcanzar el un límite de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.16.

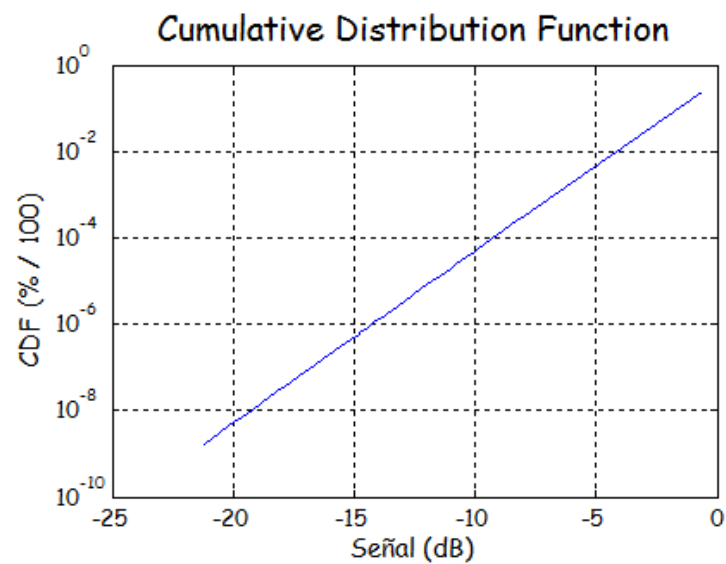


Figura 4.16. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-5.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra la cantidad de desvanecimientos de un nivel determinado de potencia que ocurren en un segundo; como se ve en la figura 4.17, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -5 y 0 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -15 y -20 dB, no van a ser tan comunes.

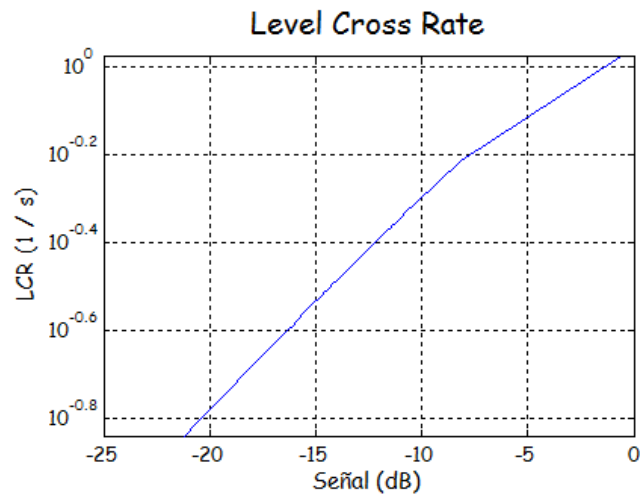


Figura 4.17. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-5.

La figura 4.18 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

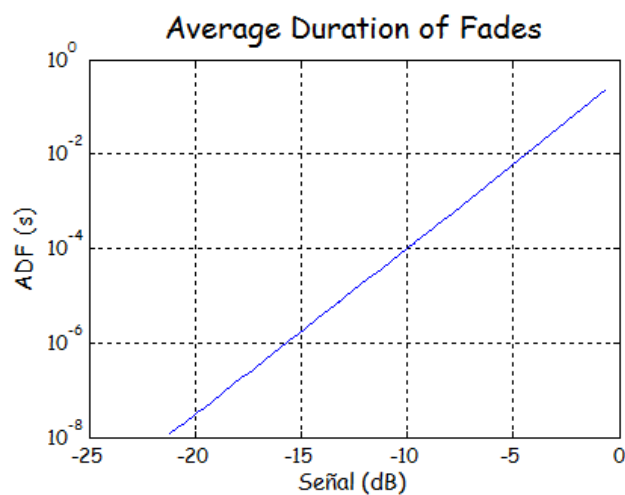


Figura 4.18. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-5.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del espectro Doppler del canal, es decir como se distribuye la potencia e lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, en la figura 4.19 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 2.5 Hz.

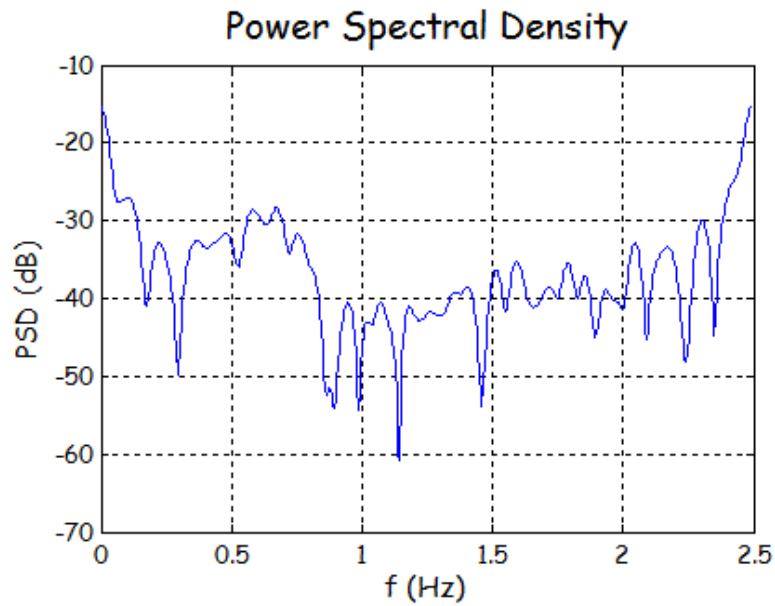


Figura 4.19. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-5.

Simulación del modelo SUI-6.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-6 presionamos el botón [SUI-6] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.20.



Figura 4.20. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-6.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 5.8 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 165.85 dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 2.774 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 168.62 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 2.958 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = -0.427 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -10.40 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -15.43 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que se muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.21, podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica].

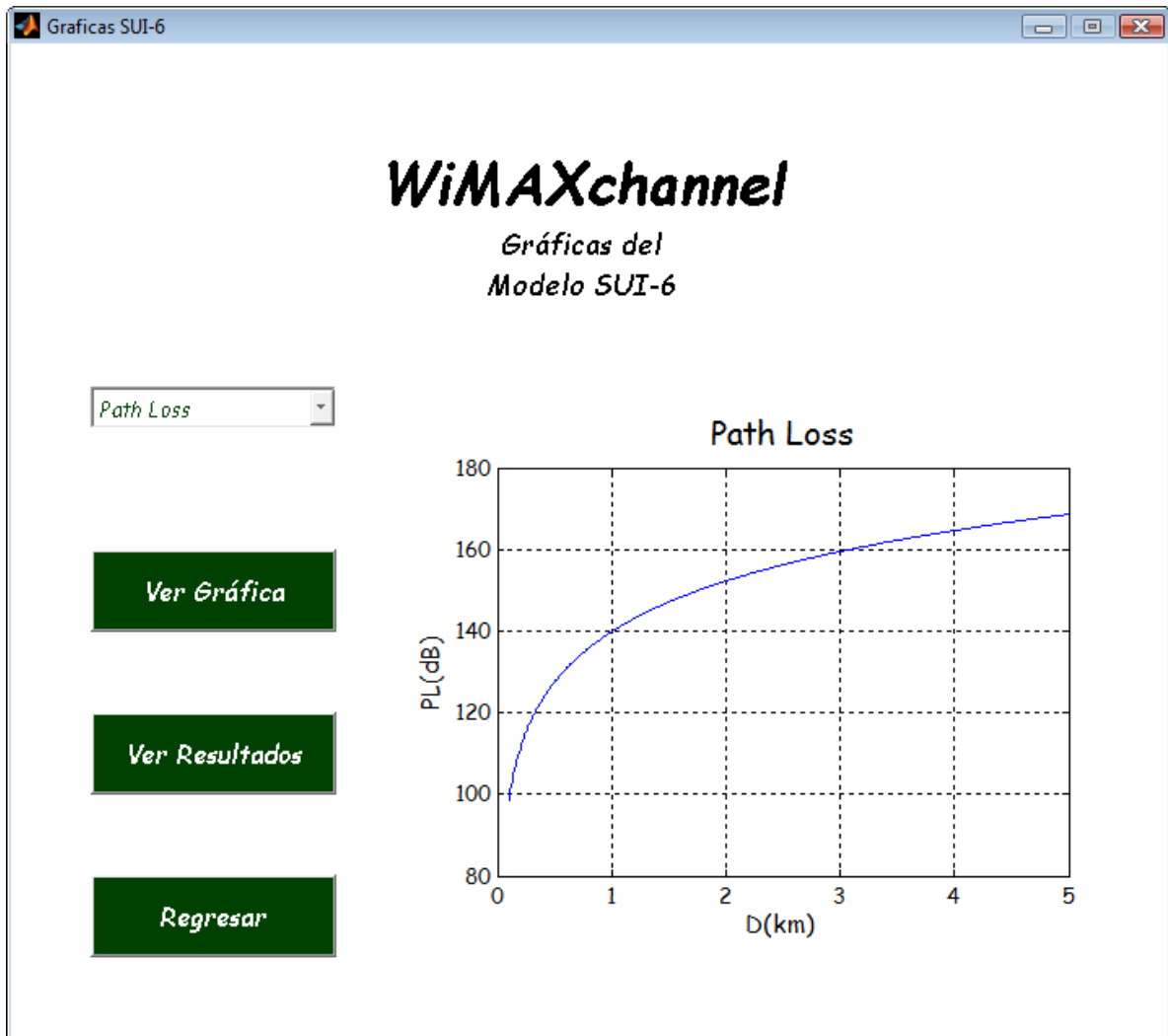


Figura 4.21. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-6.

Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada. Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.21 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal. La topografía de los canales tipo A presentan una mayor cantidad de interferencias, por lo tanto la señal estará expuesta severamente a los desvanecimientos multitrayecto. Las contribuciones de cada eco y la magnitud de la señal total se presentan en la figura 4.22.

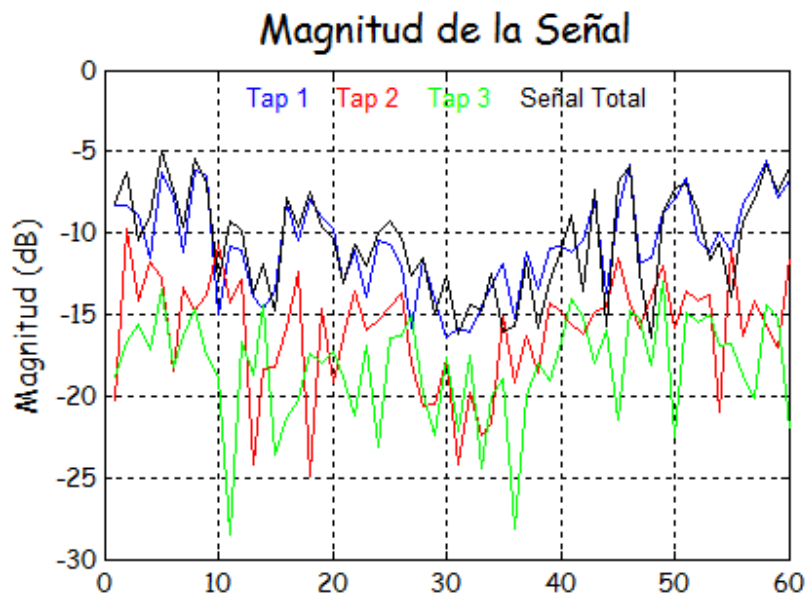


Figura 4.22. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-6.

En la figura 4.23 podemos observar la fase de la señal varía entre -180 y 180 grados tanto para la fase de la señal total como, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

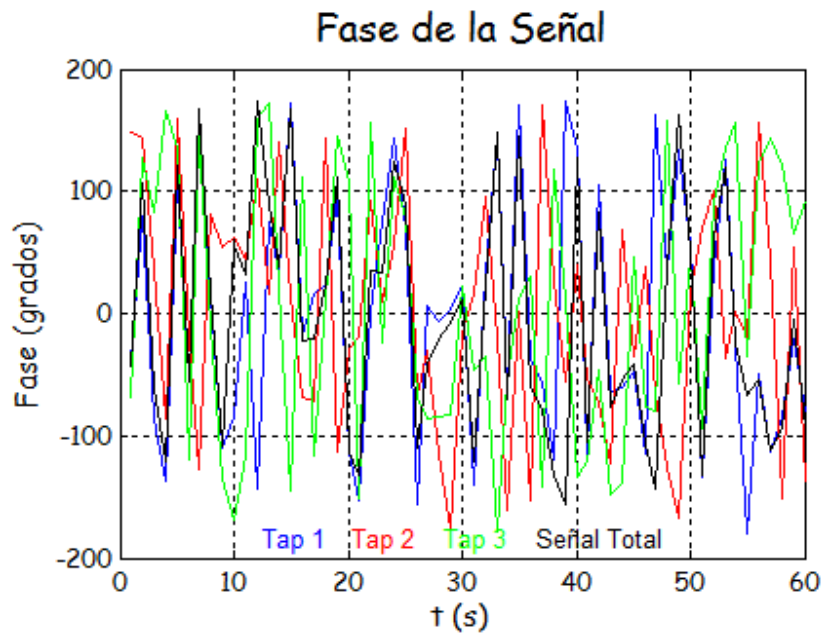


Figura 4.23. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-6.

La función de distribución acumulada (CDF) permite observar en que cantidad se requiere aumentar el nivel de potencia recibido de la señal para alcanzar el un valor de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.24.

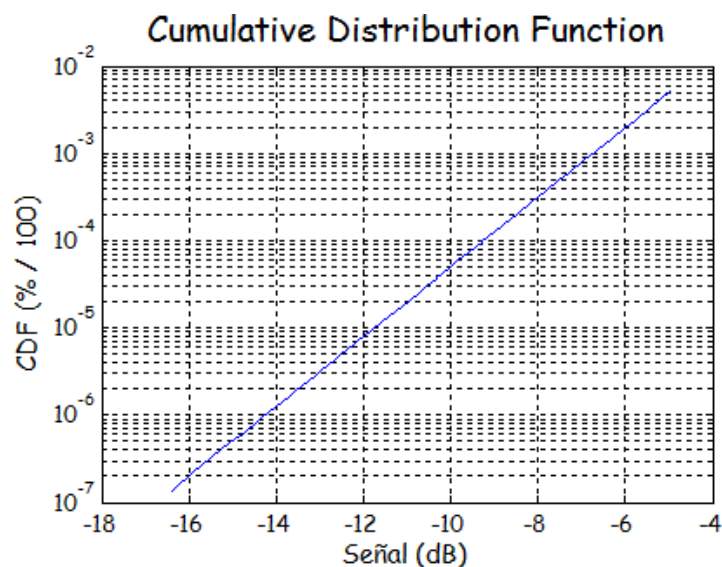


Figura 4.24. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-6.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra que tan frecuentemente se da la caída de un nivel de potencia dado; como se ve en la figura 4.25, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -8 y -4 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -12 y -16 dB, no van a ser tan comunes.

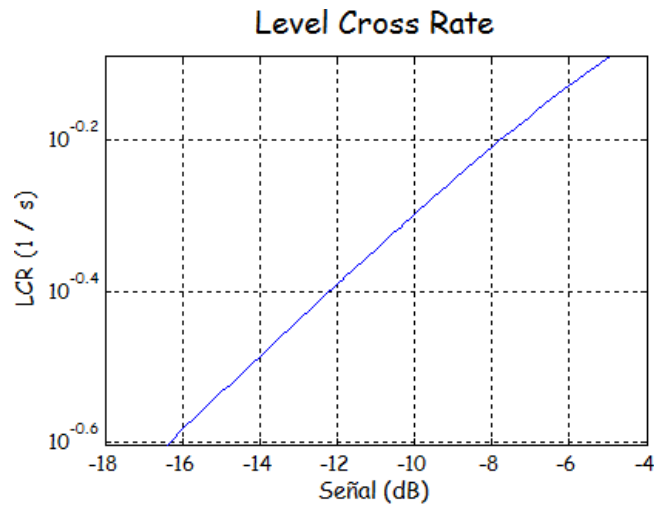


Figura 4.25. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-6.

La figura 4.26 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

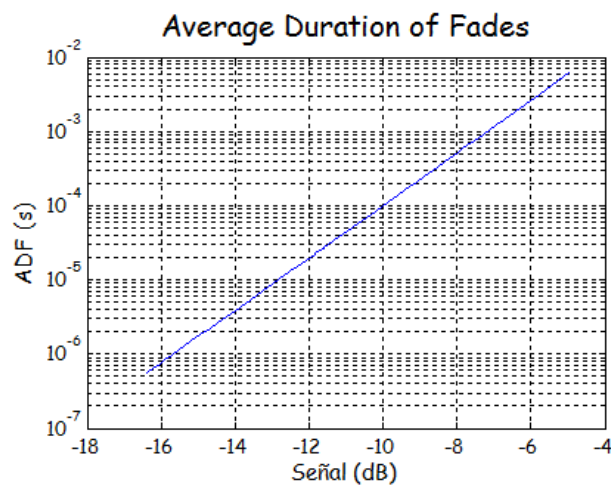


Figura 4.26. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-6.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, el cual es correspondiente al espectro Doppler, en la figura 4.27 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 0.5 Hz.

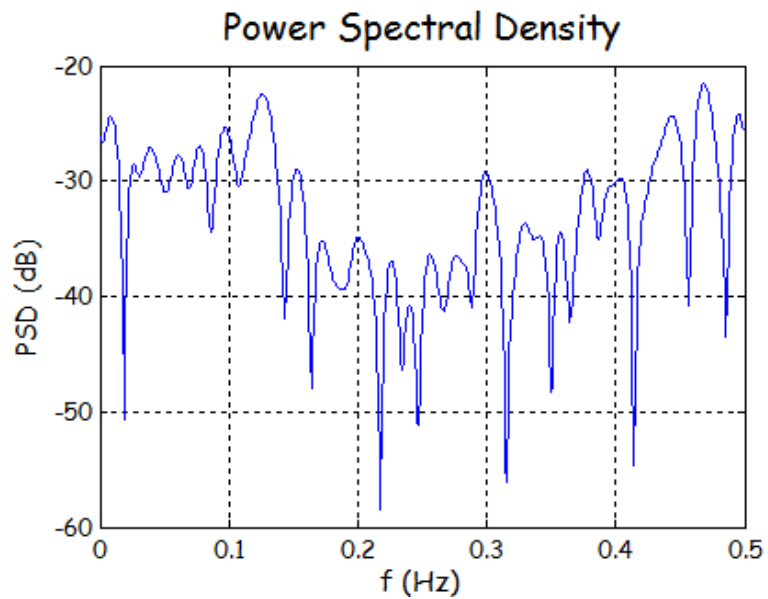


Figura 4.27. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-6.

4.4 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo B.

Simulación del modelo SUI-3.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-3 presionamos el botón [SUI-3] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.28.

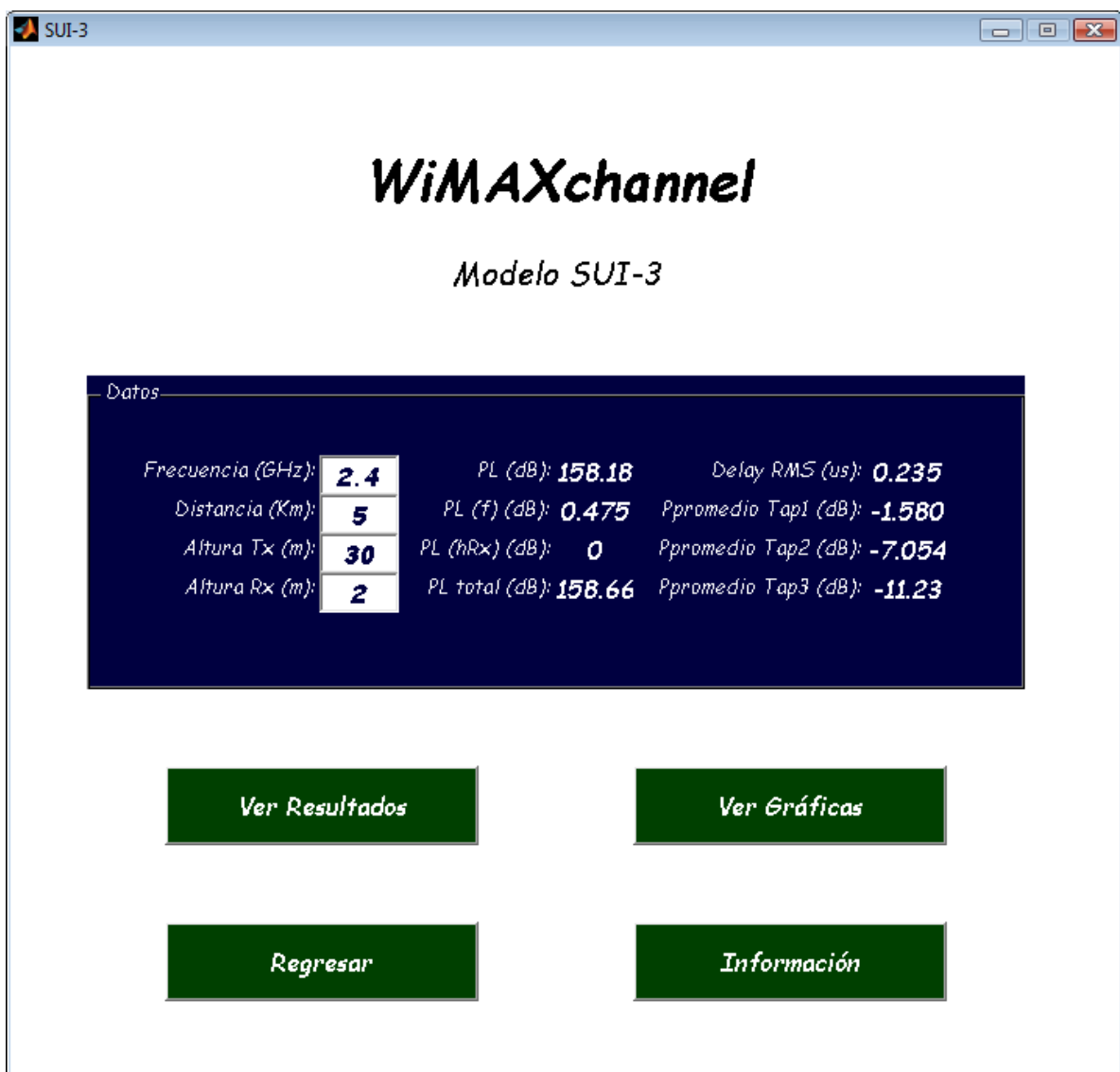


Figura 4.28. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-3.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 2.4 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 158.18 dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 0.475 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 158.66 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 0.235 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = -1.580 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -7.054 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -11.23 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica], la ventana muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.29.

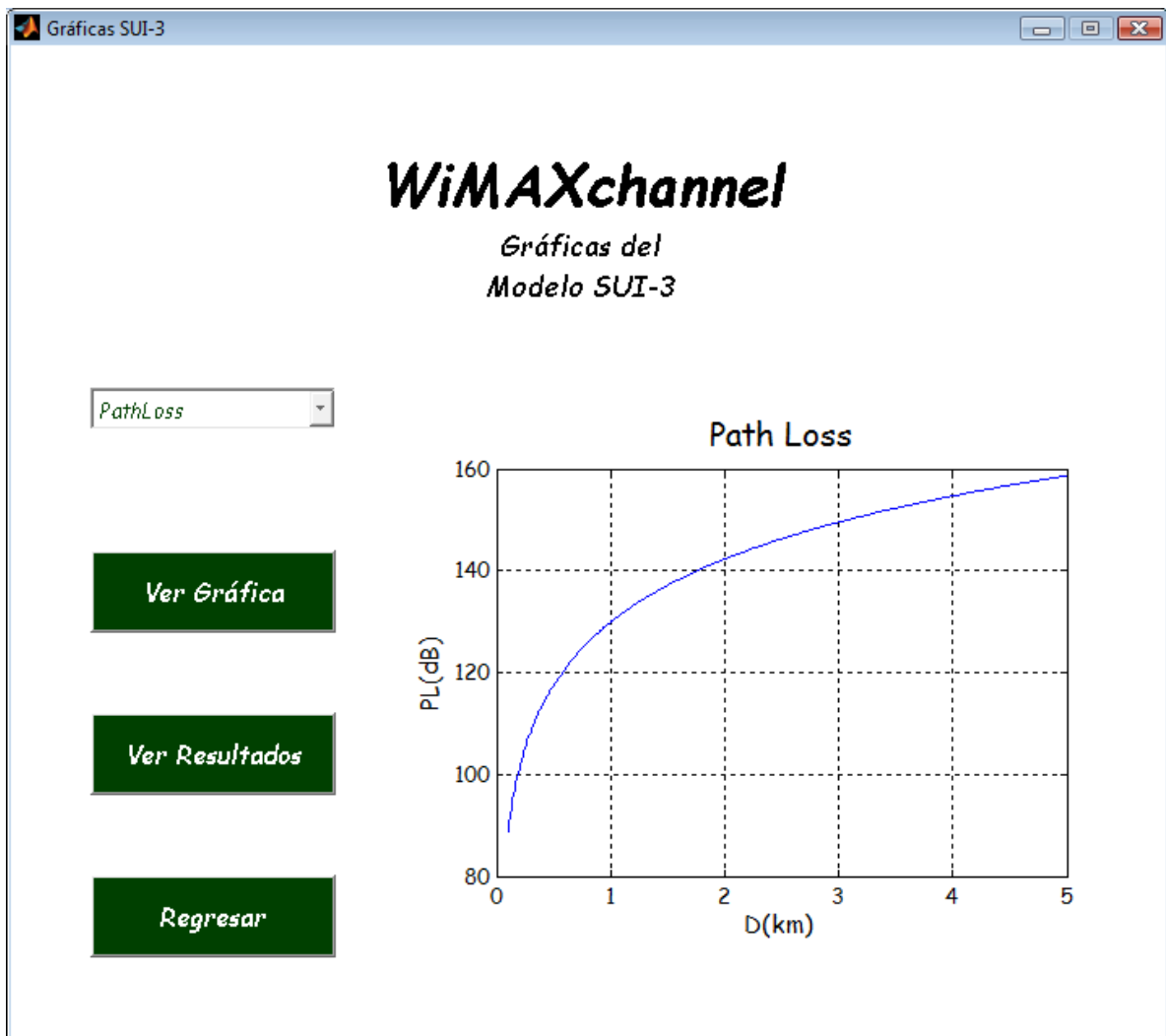


Figura 4.29. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-3.

Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.29 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor. Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal, los cuales varían a lo largo del tiempo. Esta pérdida de señal corresponde a los desvanecimientos por multitrayecto, como la topografía de los canales tipo B presentan una cantidad de interferencias media, la señal estará moderadamente sometida a los desvanecimientos multitrayecto. La característica de magnitud del canal así como las contribuciones de cada eco se presentan en la figura 4.30.

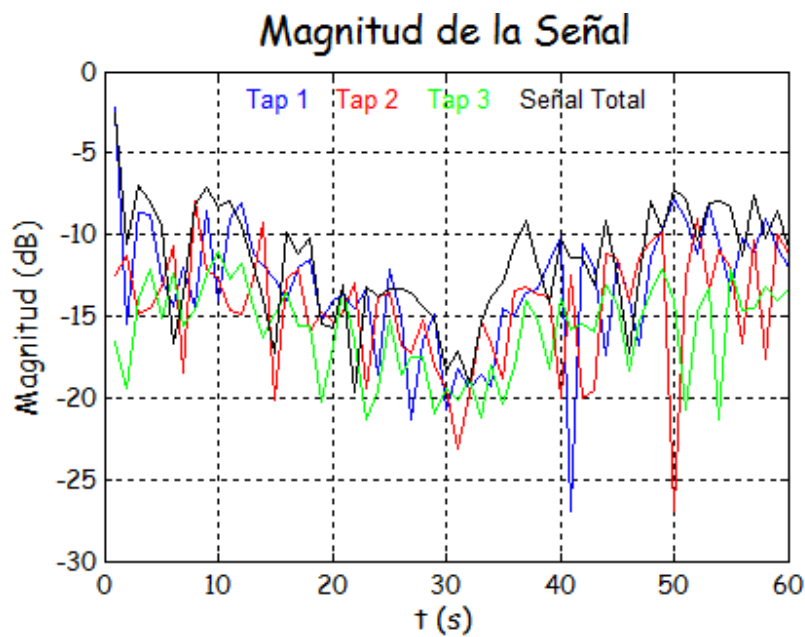


Figura 4.30. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-3.

En la figura 4.31 podemos observar la fase de la señal y la fase correspondiente a los ecos de que la forman, estas varían entre -180 y 180 grados, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

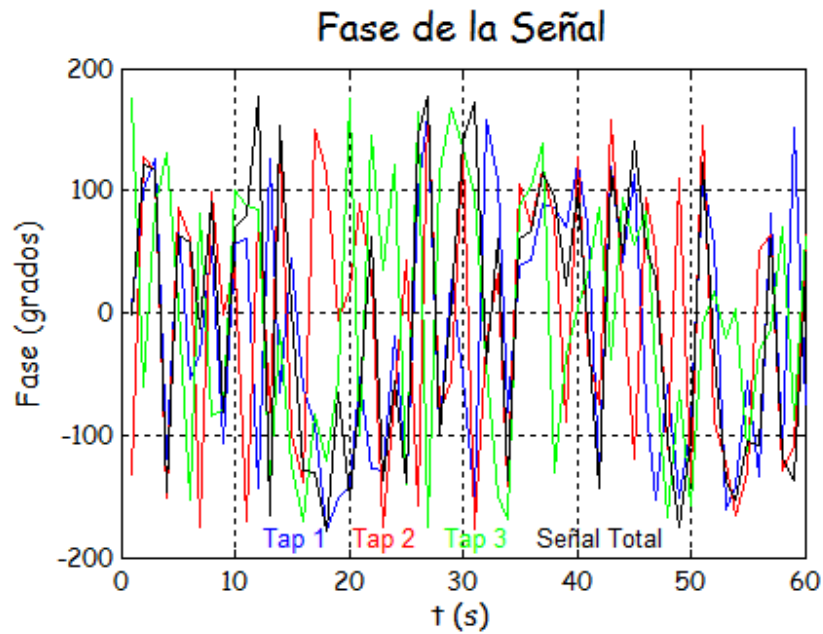


Figura 4.31. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-3.

La función de distribución acumulada (CDF) nos ayuda a observar la cantidad en que el nivel de potencia recibido de la señal requiere ser aumentado para alcanzar el un límite de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.32.

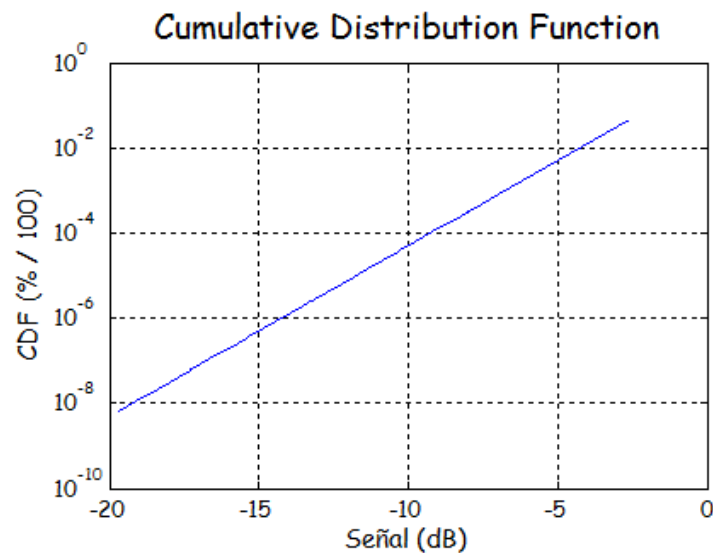


Figura 4.32. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-3.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra la cantidad de desvanecimientos de un nivel determinado de potencia que ocurren en un segundo; como se ve en la figura 4.33, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -5 y 0 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -15 y -20 dB, no van a ser tan comunes.

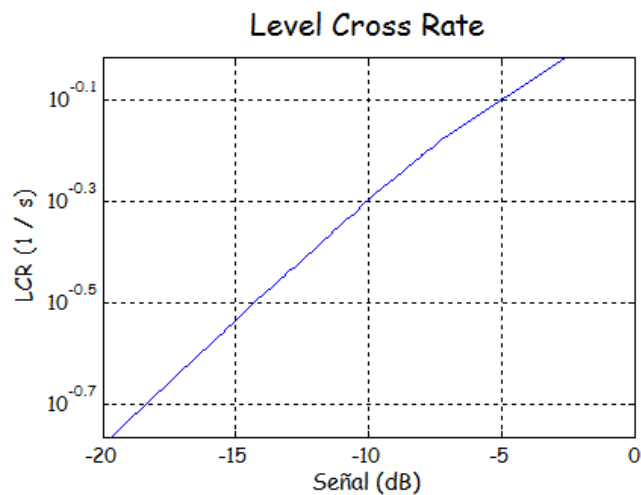


Figura 4.33. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-3.

La figura 4.34 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

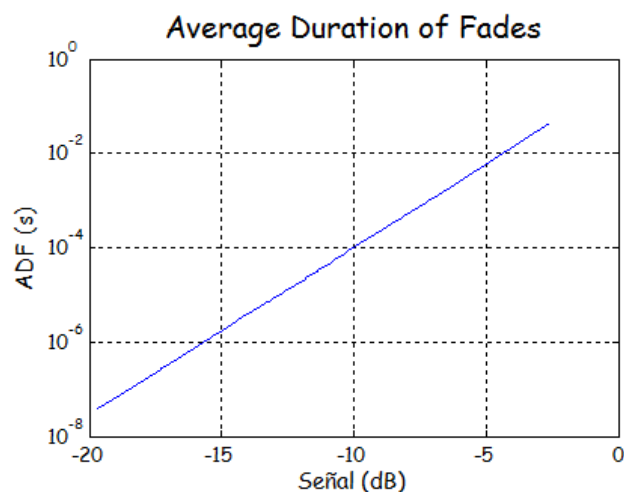


Figura 4.34. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-3.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del espectro Doppler del canal, es decir como se distribuye la potencia e lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, en la figura 4.35 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 0.5 Hz.

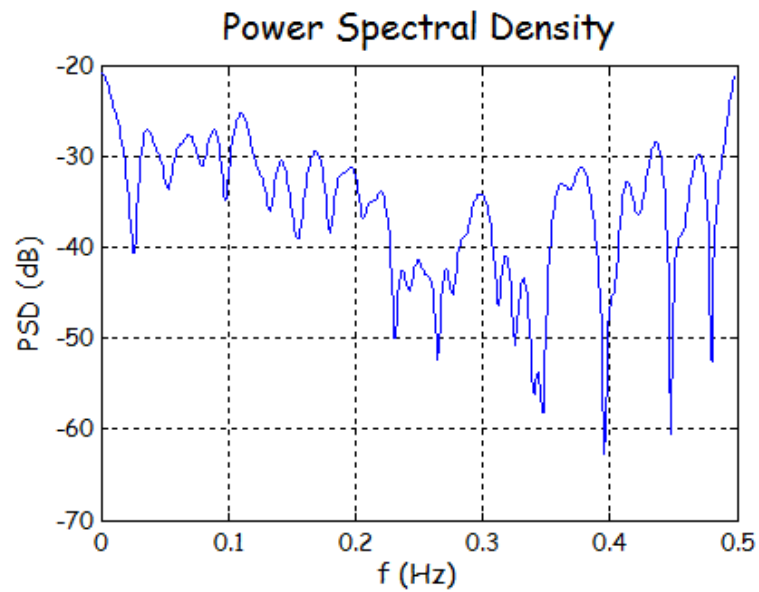


Figura 4.35. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-3.

Simulación del modelo SUI-4.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-4 presionamos el botón [SUI-4] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.36.



Figura 4.36. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-4.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 5.8 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 165.85 dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 2.774 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 168.62 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 1.1785 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = -1.309 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -6.026 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -10.04 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que se muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.37, podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica].

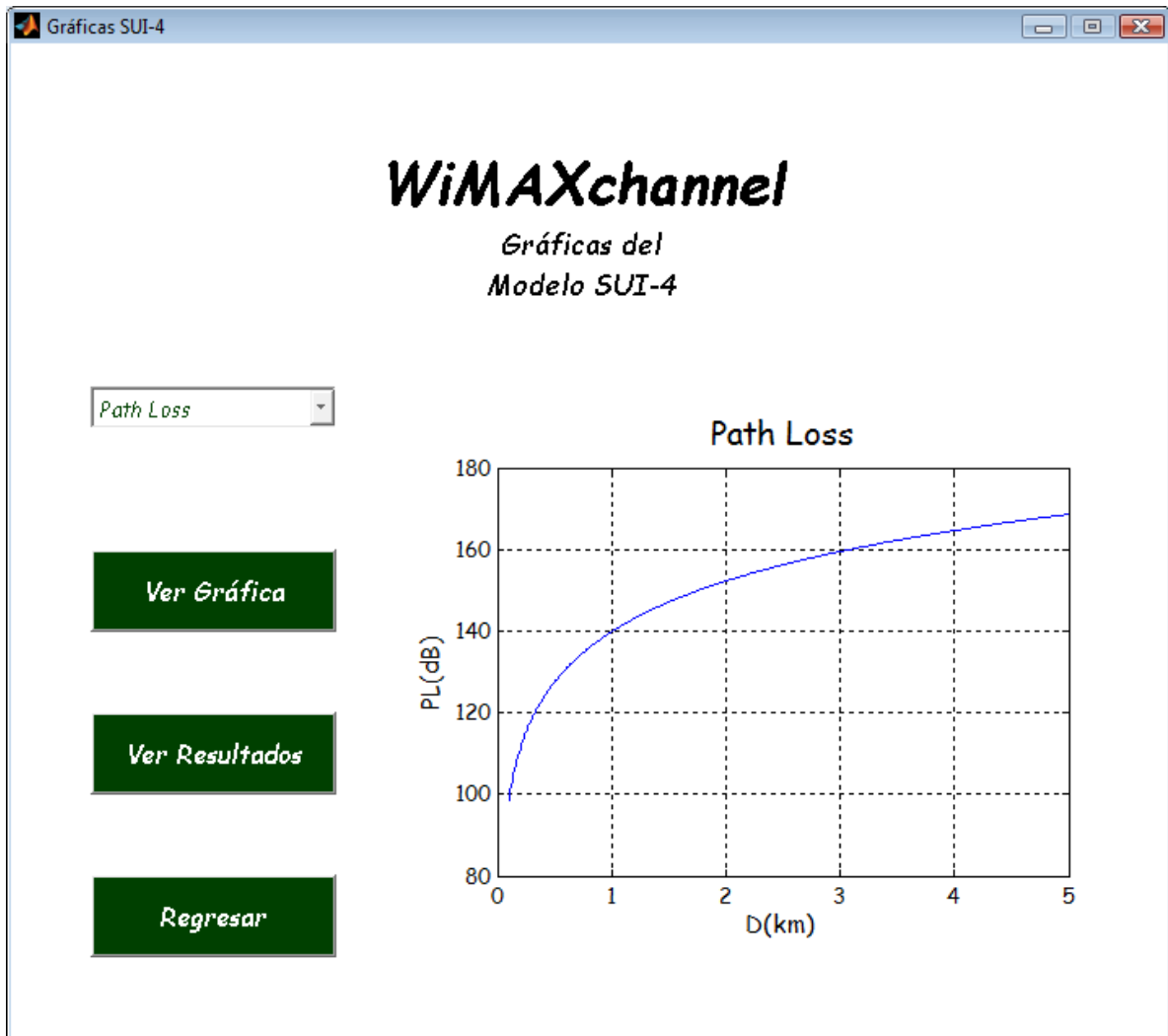


Figura 4.37. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-4.

Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada. Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.37 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal. La topografía de los canales tipo B presentan una cantidad de interferencias media, por lo tanto la señal estará expuesta moderadamente a los desvanecimientos multitrayecto. Las contribuciones de cada eco y la magnitud de la señal total se presentan en la figura 4.38.

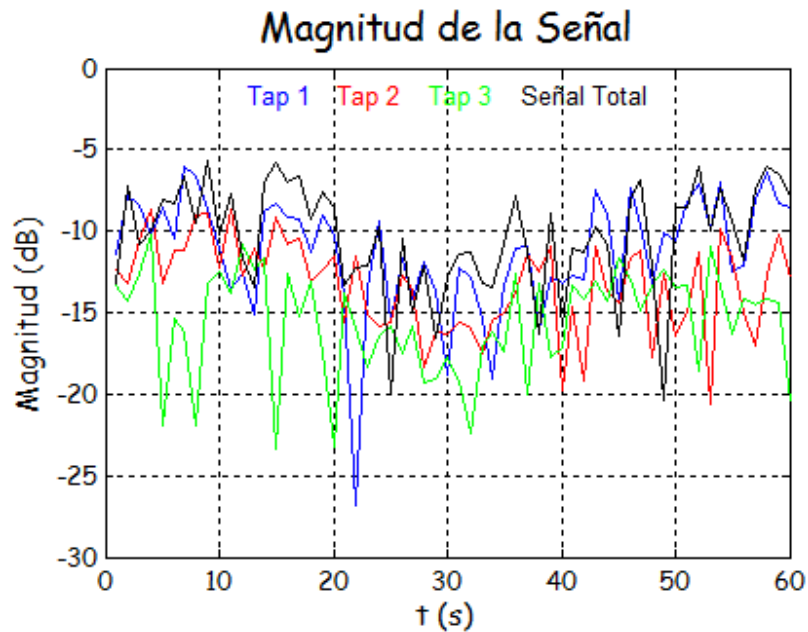


Figura 4.38. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-4.

En la figura 4.39 podemos observar la fase de la señal varía entre -180 y 180 grados tanto para la fase de la señal total como, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

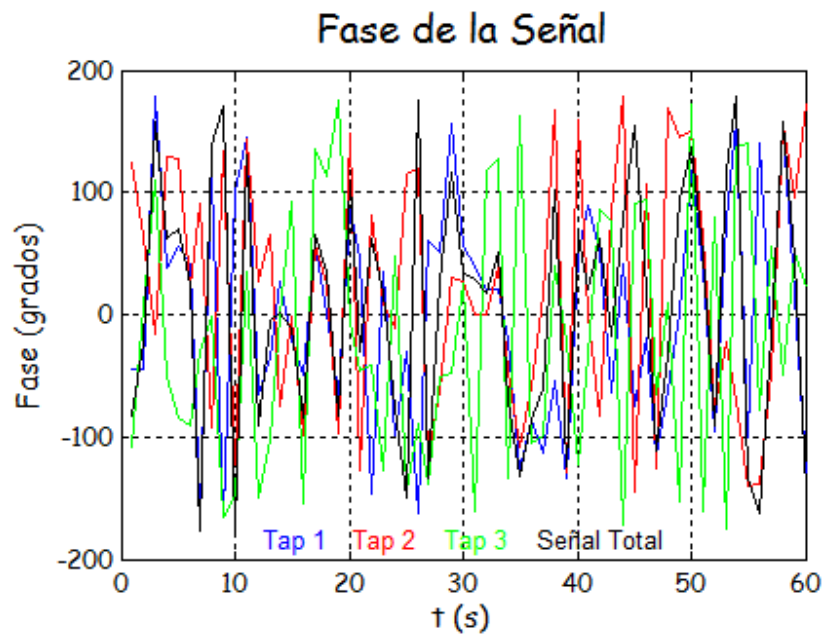


Figura 4.39. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-4.

La función de distribución acumulada (CDF) permite observar en que cantidad se requiere aumentar el nivel de potencia recibido de la señal para alcanzar el un valor de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.40.

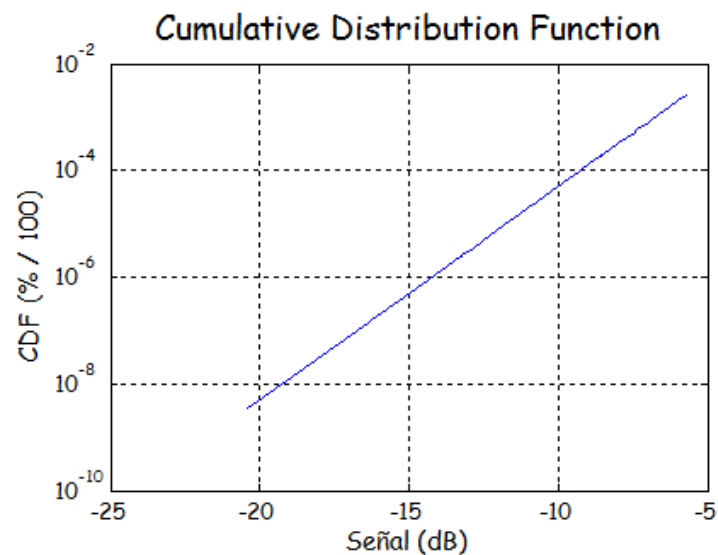


Figura 4.40. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-4.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra que tan frecuentemente se da la caída de un nivel de potencia dado; como se ve en la figura 4.41, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -10 y -5 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -15 y -20 dB, no van a ser tan comunes.

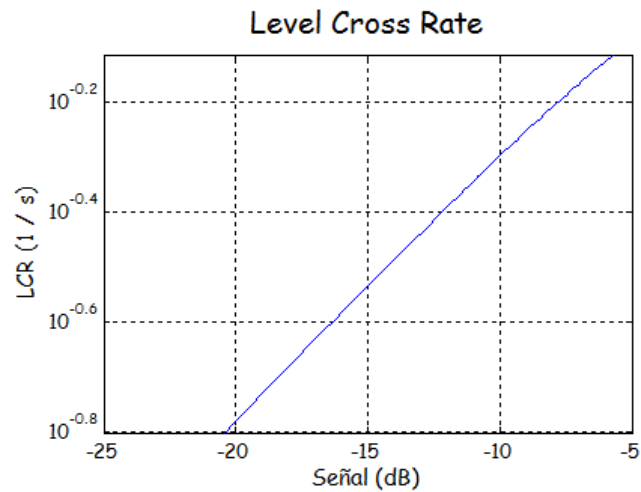


Figura 4.41. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-4.

La figura 4.42 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

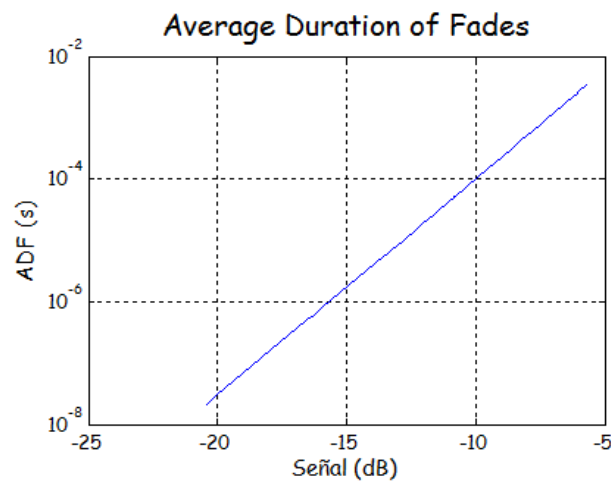


Figura 4.42. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-4.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, el cual es correspondiente al espectro Doppler, en la figura 4.43 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 0.25 Hz.

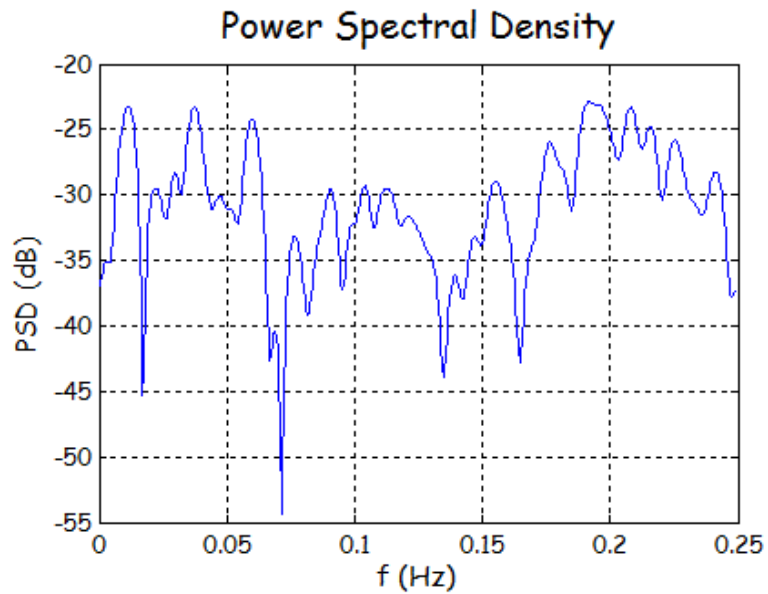


Figura 4.43. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-4.

4.5 Análisis de simulación de los modelos SUI tipo C.

Simulación del modelo SUI-1.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-1 presionamos el botón [SUI-1] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.44.



Figura 4.44. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-1.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 2.4 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 163.77dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 0.475 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 164.25 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 0.247 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = 0.0314 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -14.74 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -19.47 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica], la ventana muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.45.

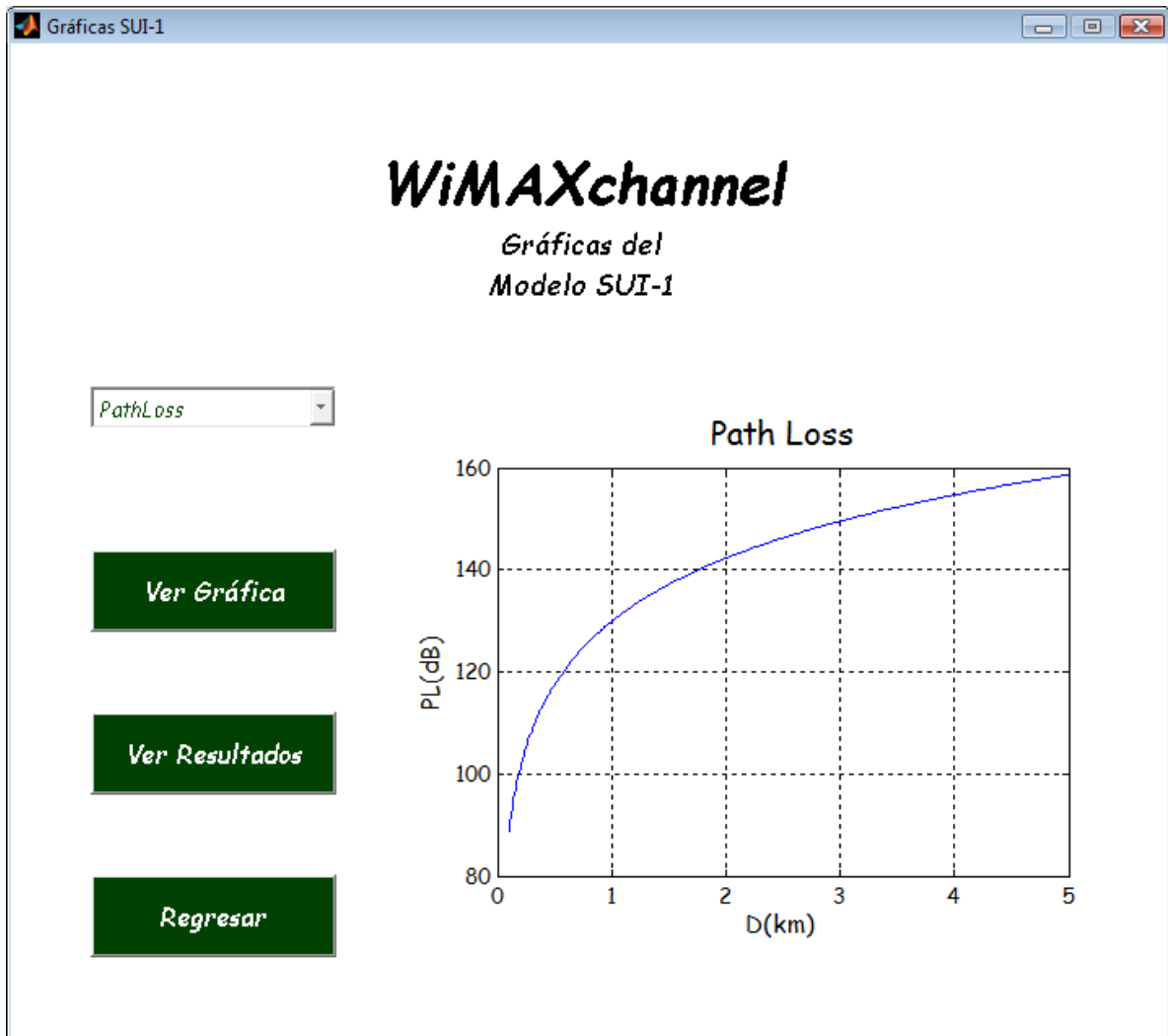


Figura 4.45. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-1.

Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.45 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor. Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal, los cuales varían a lo largo del tiempo. Esta pérdida de señal corresponde a los desvanecimientos por multitrayecto, como la topografía de los canales tipo C presentan una cantidad de interferencias baja, la señal estará levemente sometida a los desvanecimientos multitrayecto. La característica de magnitud del canal así como las contribuciones de cada eco se presentan en la figura 4.46.

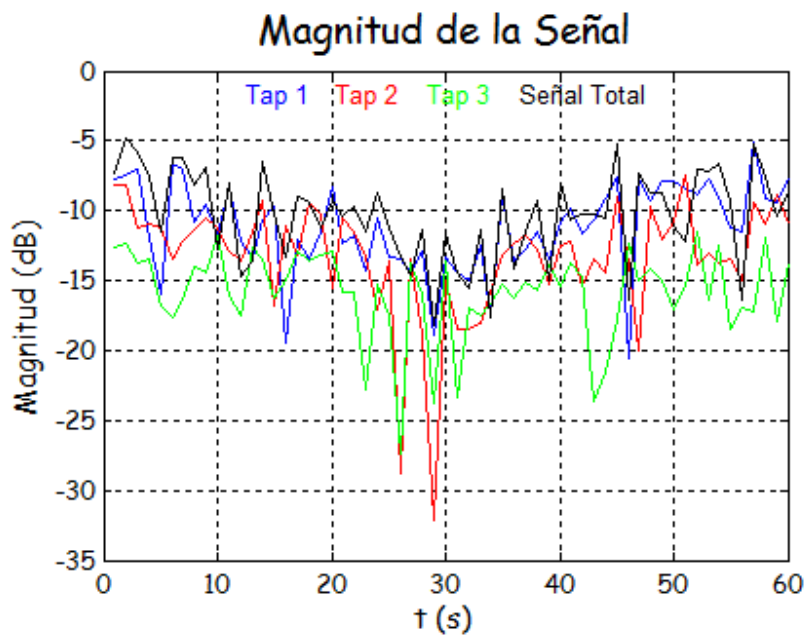


Figura 4.46. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-1.

En la figura 4.47 podemos observar la fase de la señal y la fase correspondiente a los ecos de que la forman, estas varían entre -180 y 180 grados, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

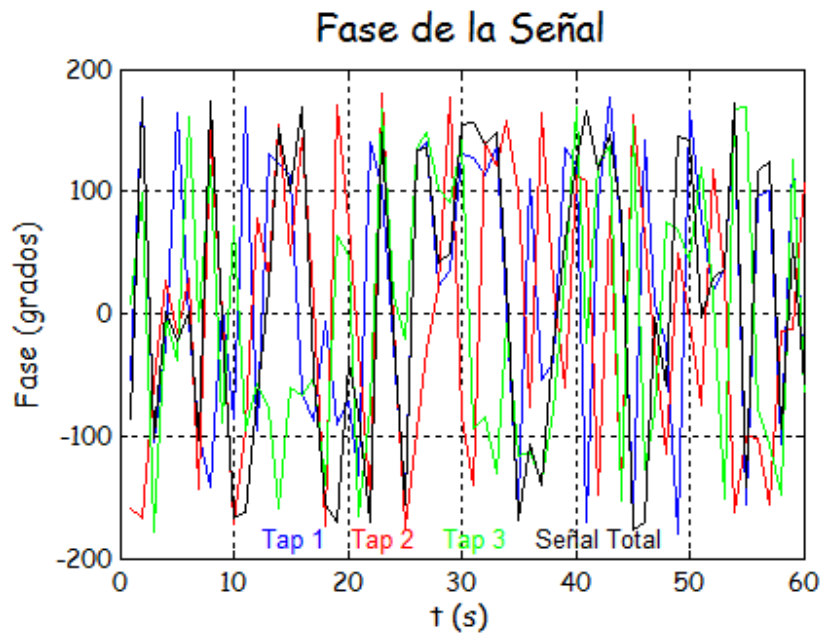


Figura 4.47. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-1.

La función de distribución acumulada (CDF) nos ayuda a observar la cantidad en que el nivel de potencia recibido de la señal requiere ser aumentado para alcanzar el un límite de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.48.

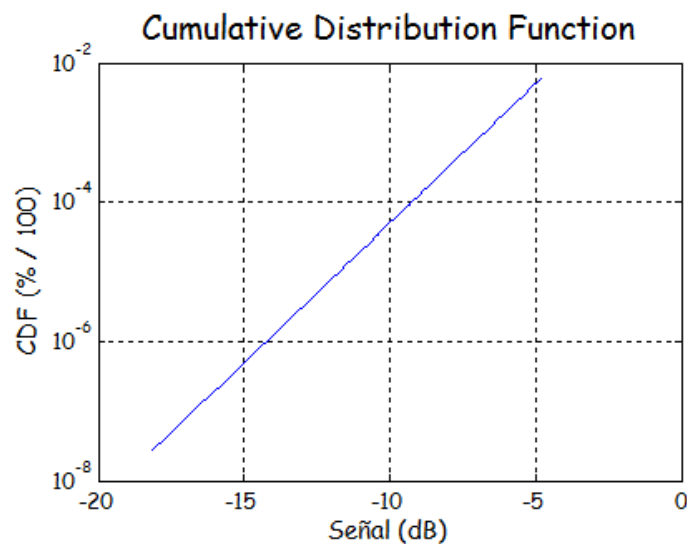


Figura 4.48. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-1.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra la cantidad de desvanecimientos de un nivel determinado de potencia que ocurren en un segundo; como se ve en la figura 4.49, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -10 y -5 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -15 y -20 dB, no van a ser tan comunes.

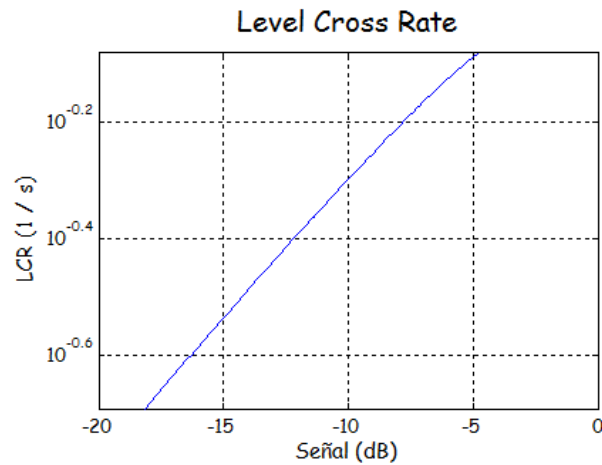


Figura 4.49. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-1.

La figura 4.50 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

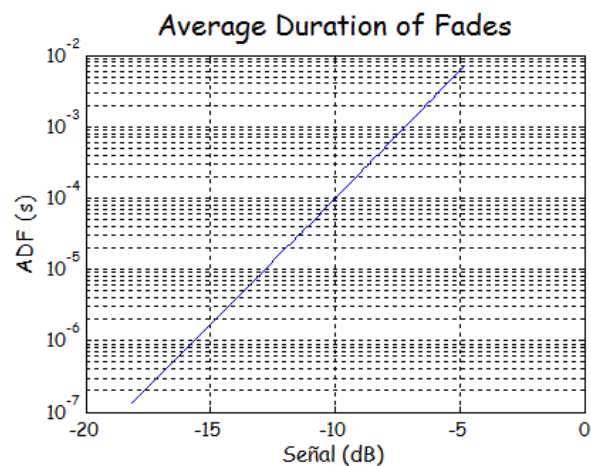


Figura 4.50. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-1.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del espectro Doppler del canal, es decir como se distribuye la potencia e lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, en la figura 4.51 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 0.5 Hz.

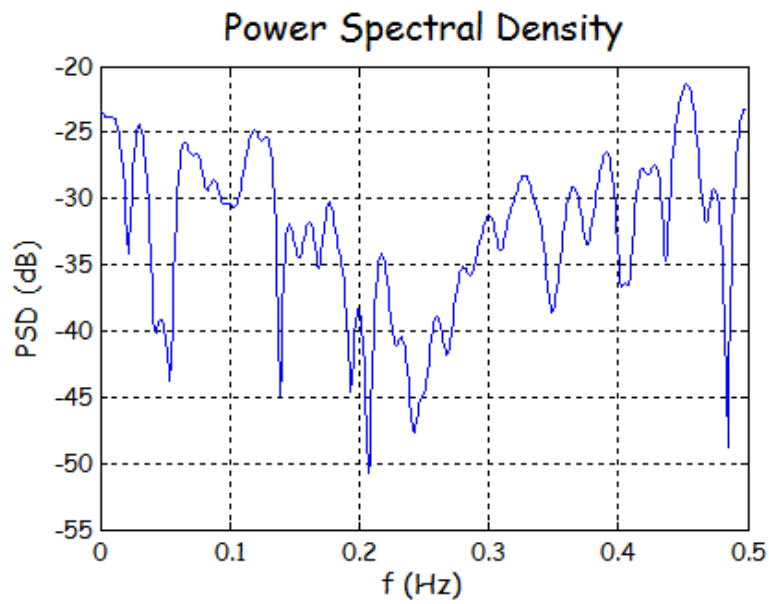


Figura 4.51. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-1.

Simulación del modelo SUI-2.

Para acceder a la simulación del modelo SUI-2 presionamos el botón [SUI-2] en la ventana inicial del software, este nos abrirá una ventana donde podemos ingresar los datos necesarios para la realización de la modulación, esta ventana se muestra en la figura 4.52.



Figura 4.52. Ventana inicial de la simulación del modelo SUI-2.

Los datos necesarios para realizar la simulación del modelo son: La frecuencia comprendida entre 2 y 11 GHz según el estándar IEEE 802.16d, la distancia entre 0.1 y 7 Km, la altura del transmisor entre 10 y 80 m, y al altura del receptor entre 2 y 10 m. Los valores escogidos para la simulación son los siguientes:

- Frecuencia = 5.8 GHz, debido a que esta pertenece a una banda no licenciada.
- Distancia = 5 Km, ya que esta es una distancia aproximada para realizar la transmisión bajo la modulación QPSK.
- Altura del transmisor (Altura Tx) = 30 m, es la altura aproximada de un edificio en la ciudad de Quito.
- Altura del receptor (Altura Rx) = 2 m.

Después de ingresar los datos presionamos el botón [Ver Resultados] y veremos los valores calculados, estos son los siguientes:

- Pérdida en el espacio libre (PL) = 165.85 dB.
- Corrección de pérdidas por frecuencia (PL (f)) = 2.774 dB.
- Corrección de pérdidas por la altura del receptor (PL (hRx)) = 0 dB.
- Pérdida total en el espacio libre (PL total) = 168.62 dB.
- Retardo del canal (Delay RMS) = 0.347 μ s.
- Potencia promedio del primer eco (Ppromedio Tap1) = -0.226 dB.
- Potencia promedio del segundo eco (Ppromedio Tap2) = -12.48 dB.
- Potencia promedio del tercer eco (Ppromedio Tap3) = -14.47 dB.

Para observar las gráficas generadas en la simulación presionamos el botón [Ver Gráficas], con este abrimos una nueva ventana en la que se muestra por default la gráfica de las pérdidas en el espacio libre, esta se puede ver en la figura 4.53, podemos seleccionar la gráfica que deseamos analizar de un menú, una vez seleccionada la gráfica presionamos el botón [Ver Gráfica].

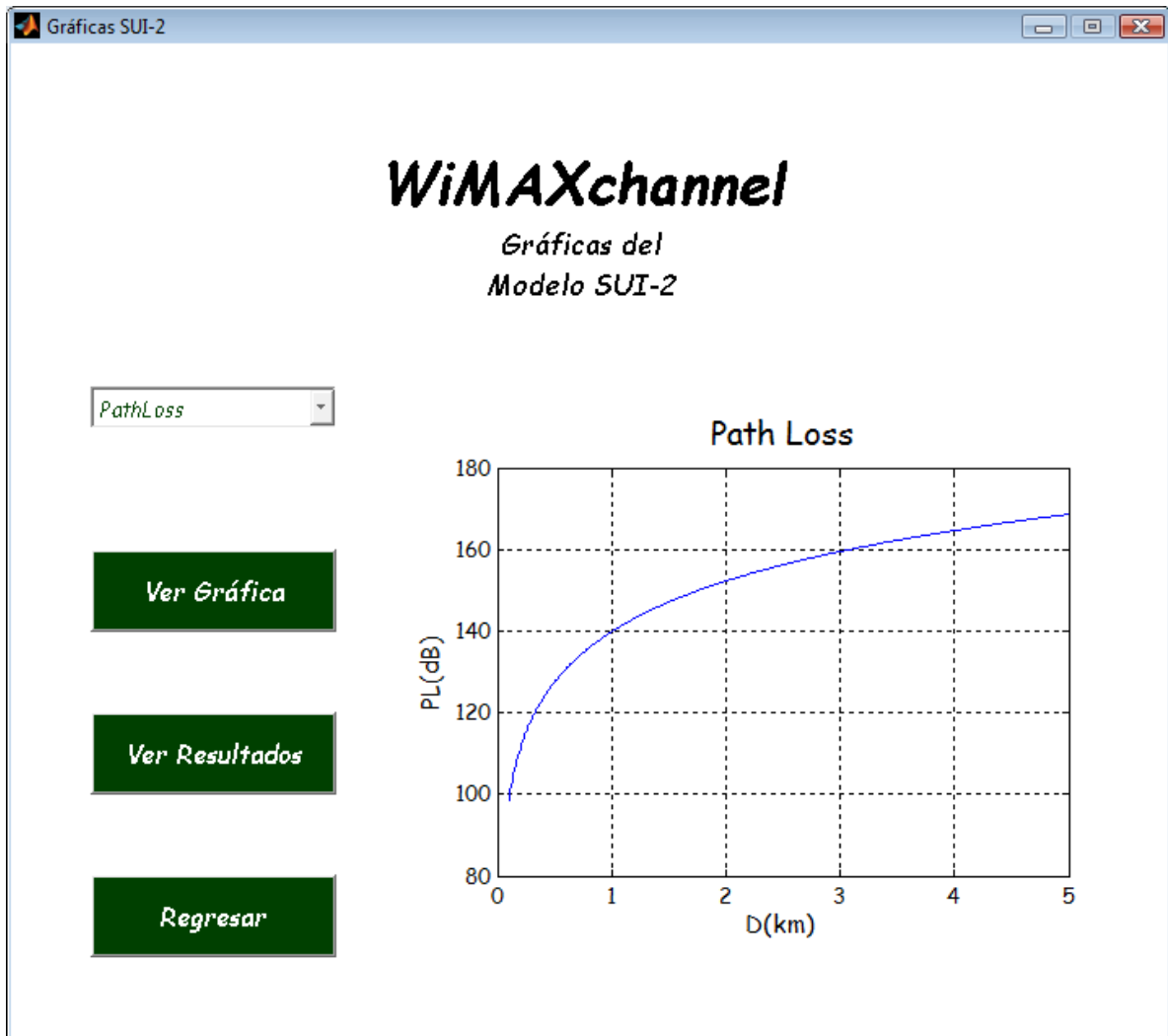


Figura 4.53. Ventana de gráficas de la simulación del modelo SUI-2.

Por medio de esta gráfica podemos tener una idea inicial de la sensibilidad necesaria en el receptor para que la onda transmitida sea detectada. Las pérdidas del espacio libre se presentan en función de la distancia existente entre el transmisor y el receptor, como se puede apreciar en la figura 4.53 a medida que se incrementa la distancia, la pérdida de potencia que experimenta la señal es mayor.

La magnitud de la señal representa la pérdida de esta cuando se expone a los efectos de multitrayecto del canal. La topografía de los canales tipo C presentan una cantidad de interferencias baja, por lo tanto la señal estará expuesta levemente a los desvanecimientos multitrayecto. Las contribuciones de cada eco y la magnitud de la señal total se presentan en la figura 4.54.

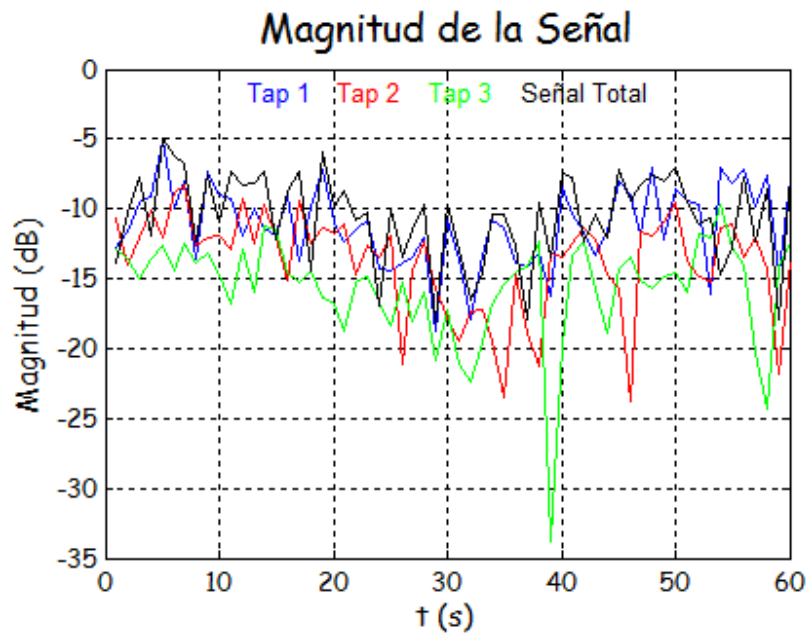


Figura 4.54. Magnitud de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-2.

En la figura 4.55 podemos observar la fase de la señal varía entre -180 y 180 grados tanto para la fase de la señal total como, dependiendo del instante de tiempo, la fase de la señal total es el resultado de la suma de los diferentes ecos, mediante esta gráfica podemos determinar los instantes en los que los ecos se suman o se restan produciendo un aporte constructivo o destructivo a la señal total.

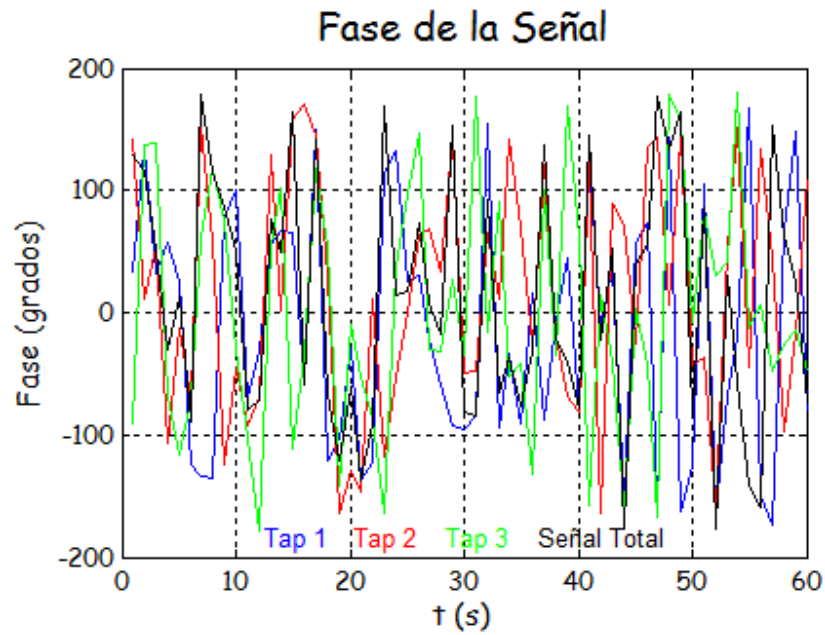


Figura 4.55. Fase de la señal con sus ecos simulados en el modelo SUI-2.

La función de distribución acumulada (CDF) permite observar en que cantidad se requiere aumentar el nivel de potencia recibido de la señal para alcanzar el un valor de potencia de recepción fijado en el diseño del canal. La CDF se muestra en la figura 4.56.

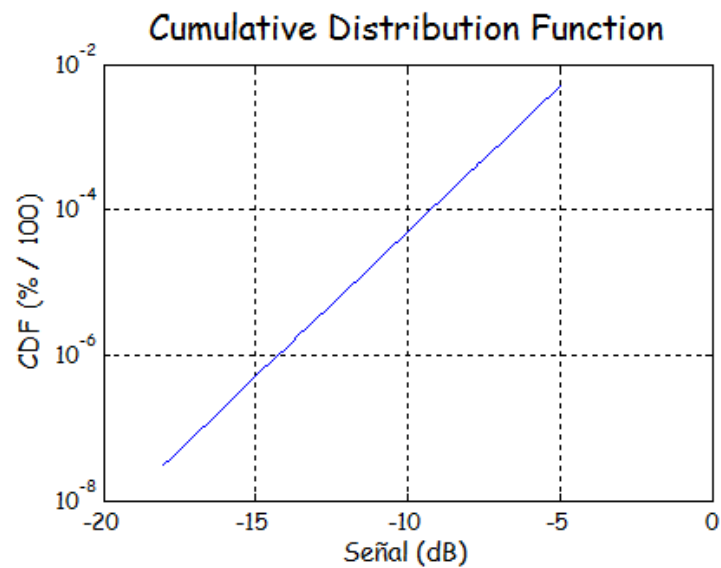


Figura 4.56. CDF de la señal simulada en el modelo SUI-2.

La tasa de cruce de nivel (LCR) nos muestra que tan frecuentemente se da la caída de un nivel de potencia dado; como se ve en la figura 4.57, los desvanecimientos correspondientes a niveles de potencia entre -10 y -5 dB van a ser frecuentes, mientras que aquellos de bajo nivel de potencia, entre -15 y -20 dB, no van a ser tan comunes.



Figura 4.57. LCR de la señal simulada en el modelo SUI-2.

La figura 4.58 nos muestra la duración promedio de los desvanecimientos (ADF), esto nos indica a que niveles de potencia se dan los desvanecimientos cortos o largos en el canal.

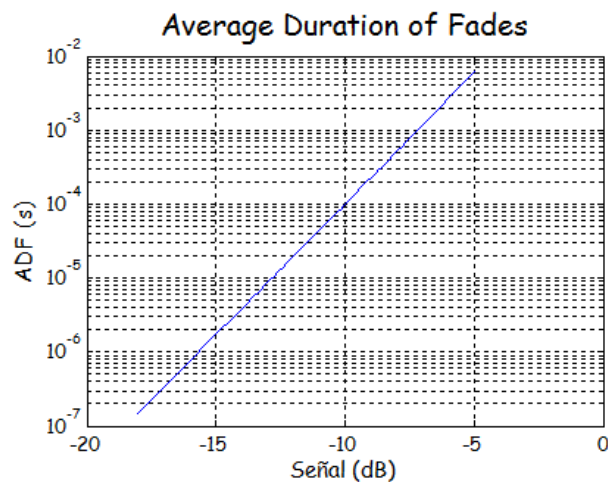


Figura 4.58. ADF de la señal simulada en el modelo SUI-2.

La densidad espectral de potencia (PSD) nos muestra como esta distribuida la potencia de la señal a lo largo del desplazamiento de frecuencia que presenta el canal, el cual es correspondiente al espectro Doppler, en la figura 4.59 podemos observar como se distribuye la potencia a lo largo de un espectro Doppler de 0.25 Hz.

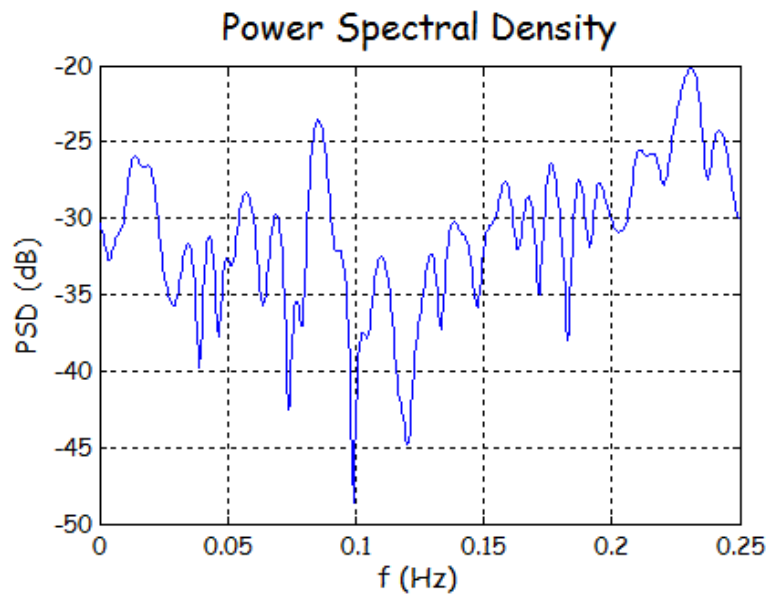


Figura 4.59. PSD de la señal simulada en el modelo SUI-2.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.

- En el presente proyecto se ha desarrollado un software capaz de simular los parámetros más importantes del canal de propagación para el diseño de redes de acceso inalámbrico de banda ancha para sistemas fijos, basado en la simulación de los modelos de propagación desarrollados por la Universidad de Stanford denominados modelos SUI, y aplicado a las condiciones del estándar IEEE 802.16d, el cual es el estándar que regula a la tecnología WiMAX.
- La implementación del software se realizó en la plataforma MATLAB, la cual nos brinda una herramienta poderosa para el cálculo matemático, así como también nos brinda la facilidad de crear un entorno visual por medio de la herramienta MATLAB GUIDE para que exista una interfaz gráfica más comprensible para interactuar con el usuario.
- WiMAX es una tecnología inalámbrica que busca satisfacer la necesidad de acceso de banda ancha de última milla, y es capaz de dar todos los niveles de servicio para un carrier de datos, es decir que también se la puede aplicar como una red backbone para el transporte de datos a una alta tasa de transmisión.
- Los modelos SUI son una recopilación de datos basados en conceptos teóricos y determinados empíricamente en distintos lugares que concuerdan con las características de los tres tipos de terreno determinados por su densidad boscosa y la topografía del mismo.

- La simulación de un canal de propagación se realiza de forma estadística debido a que no es factible implementar un software que realice la simulación en una locación específica, por tal razón para cada tipo de terreno se desarrollaron dos modelos SUI que encajan en las características del terreno pero con diferentes parámetros de retardo de canal, espectro Doppler, factor K, etc. con el objetivo de encontrar una aproximación mas exacta del comportamiento del canal en condiciones reales.
- La densidad boscosa que presenta el terreno es equivalente a la cantidad de edificaciones que se encuentran en una ciudad, por lo tanto si un modelo es aplicable a un terreno con alta densidad boscosa, este modelo también será aplicable a una ciudad con una gran cantidad de edificios altos.
- OFDM es una técnica que divide el espectro en varias sub-portadoras, lo que nos permite mejorar el desempeño del sistema ya que si presenta la pérdida de señal de una portadora, esta puede ser reemplazada y la cantidad de datos perdidos es menor, así el sistema esta en la capacidad de pedir que se reenvíen solo los datos perdidos y no el paquete total.
- En el software podemos observar el principio de funcionamiento de la técnica OFDMA pero no una simulación real de esta. Esto se debe a que los lenguajes de programación ejecutan los comandos en forma lineal uno tras otro, y ya que el acceso al canal se da de forma aleatoria se debería interrumpir la ejecución de los comandos para permitir a un usuario ingresar o salir del canal lo cual nos lleva a un error en el programa debido a que no se completaron correctamente determinadas funciones.
- OFDMA consiste en una técnica de acceso múltiple basado en OFDM, en el cual a cada usuario se le asigna una o más subportadoras. OFDMA es una combinación de FDMA y TDMA. Es decir, un usuario tiene asignado un número de subportadoras (FDMA), y estas asignaciones de subportadoras usuarios cambian en el tiempo (TDMA).

5.2 Recomendaciones.

- WiMAX es una alternativa para dar servicio de acceso de banda ancha de última milla en sectores donde para los operadores la inversión de tender el cableado necesario no es justificada, WiMAX es una opción recomendable debido a sus características de operación superiores a otras tecnologías, como las distancias que alcanza en entornos sin línea de vista y con tasas de transmisión altas.
- Es recomendable para cualquier software de simulación el desarrollo de un entorno gráfico el cual permita interactuar de forma más fácil con el usuario y facilite la comprensión de este, MATLAB es una de las mejores opciones para realizar estas tareas ya que nos facilita la creación del entorno gráfico con una alta capacidad de formulación matemática.
- Antes de realizar la simulación se recomienda observar la información que provee el software sobre el modelo o técnica que se está aplicando para evitar equivocaciones en el ingreso de datos y tener una base teórica de este, sin embargo es recomendable estudiar la teoría implicada para tener una mejor comprensión del moldeamiento del canal.
- Para realizar la simulación es necesario determinar el tipo de terreno para elegir correctamente que tipo de modelo utilizar, también es necesario establecer las características del terreno realizar la simulación de un modelo específico.
- Pese a que se determine un modelo de canal específico a simular, es recomendable realizar la simulación de los dos modelos que comparten las características del tipo de terreno con el objetivo de determinar cual de estos se aplica con mayor exactitud al entorno que se desea simular.
- Para realizar la simulación de la técnica OFDM es recomendable simular primero el canal a utilizar para entender mejor los efectos que este presenta sobre la señal modulada y como se distorsiona esta debido al canal.

ANEXO A-1

CODIFICACIÓN EN MATLAB DEL SOFTWARE WiMAXchannel.

CODIFICACIÓN EN MATLAB DEL SOFTWARE WiMAXchannel.

A continuación se muestran los códigos de MATLAB para realizar los cálculos necesarios para la simulación del canal de propagación y de la modulación OFDM. Estos códigos representan las funciones más importantes para el funcionamiento del software.

Coefficientes del Canal

```
function Canal = CoeficientesCanal (Potencia, FiltroDoppler, FactorK, TiempoSimulacion,
FactorNormalizacion)

Potencia = 10.^ (Potencia / 10);
Varianza = Potencia./ (FactorK + 1);
PotenciaConstante = Potencia.* (FactorK./ (FactorK + 1));
Constante = sqrt (PotenciaConstante);

CanalReal = sqrt (1 / 2) * (randn (3, TiempoSimulacion) + j * randn (3, TiempoSimulacion)).*
((sqrt (Varianza))' * ones (1, TiempoSimulacion));
CanalComplejo = Constante' * ones (1, TiempoSimulacion);

for Contador = 1 : 3
    f0 = [0 : FiltroDoppler / 2] / (FiltroDoppler / 2);
    PSD = 0.785 * f0.^ 4 - 1.72 * f0.^ 2 + 1;
    Filtro = [PSD(1 : end - 1) PSD(end : -1 : 2)];
    Filtro = sqrt (Filtro);
    Filtro = ifftshift (ifft (Filtro));
    Filtro = real (Filtro);
    Filtro = Filtro / sqrt (sum (Filtro.^ 2));
    Canal = fftfilt (Filtro, [CanalReal(Contador, :) zeros(1, FiltroDoppler)]);
    CanalReal (Contador, :) = Canal (1 + FiltroDoppler / 2 : end - FiltroDoppler / 2);
end

Canal = CanalReal + CanalComplejo;
Canal = Canal * 10 ^ (FactorNormalizacion / 20);
```

Pérdidas en el Espacio Libre

```
function PL = PathLoss (Frecuencia,Distancia,AlturaTx,Terreno)
```

```
switch Terreno
```

```
case 'A'
```

```
    a = 4.6;
```

```
    b = 0.0075;
```

```
    c = 12.6;
```

```
    s = 10.6;
```

```
case 'B'
```

```
    a = 4;
```

```
    b = 0.0065;
```

```
    c = 17.1;
```

```
    s = 9.4;
```

```
otherwise
```

```
    a = 3.6;
```

```
    b = 0.005;
```

```
    c = 20;
```

```
    s = 8.2;
```

```
end
```

```
d0 = 100;
```

```
LightSpeed = 3e+8;
```

```
Distancia = Distancia * 1e+3;
```

```
Frecuencia = Frecuencia * 1e+9;
```

```
ExponentePL = a - b * AlturaTx + c / AlturaTx;
```

```
wavelength = LightSpeed / Frecuencia;
```

```
A = 20 * log10 (4 * pi * d0 / wavelength);
```

```
PL = A + 10 * ExponentePL * log10 (Distancia/d0) + s;
```

Correcciones de Pérdidas

```
function PLhRx = PathLossAlturaRx (AlturaRx, Terreno)
```

```
switch Terreno
```

```
case 'C'
```

```
    PLhRx = -20 * log10 (AlturaRx / 2);
```

```
otherwise
```

```
    PLhRx = -10.8 * log10 (AlturaRx / 2);
```

```
End
```

```
function PLf = PathLossFrecuencia (Frecuencia)
```

```
Frecuencia = Frecuencia * 1e+3;
```

```
PLf = 6 * log10 (Frecuencia / 2000);
```

Receptor OFDM

```
function SignalRecovered = RxOFDM (Signal, Simbolos, CP)

SignalRx = [];
bits_out_cur = zeros (1, 192);

for a = 1 : Simbolos
    y_cur = Signal ((a - 1) * (194 + CP) + 1 + CP : a * (194 + CP));
    X_hat = round (fft (y_cur));
    X_hat = X_hat (1 : 194 / 2);
    real_index = 1 : 2 : 192;
    imag_index = 2 : 2 : 192;
    bits_out_cur (real_index) = real (X_hat (2 : length (X_hat)));
    bits_out_cur (imag_index) = imag (X_hat (2 : length (X_hat)));
    SignalRx = [SignalRx, bits_out_cur];
end

for a = 1 : length (SignalRx)
    if SignalRx (a) < 0
        SignalRx (a) = 0;
    elseif SignalRx (a) > 1
        SignalRx (a) = 1;
    else
        SignalRx (a) = round (SignalRx(a));
    end
end

SignalRecovered = SignalRx;
```

Transmisor OFDM

```
function Signal = TxOFDM (Nfft,Bits, Simbolos, CP)
```

```
Signal = [];
```

```
for a = 1 : Simbolos
```

```
    IndiceReal = Nfft * (a - 1) + 1 : 2 : Nfft * (a - 1) + Nfft;
```

```
    IndiceImaginario = Nfft * (a - 1) + 2 : 2 : Nfft * (a - 1) + Nfft;
```

```
    X = (Bits (IndiceReal) + j * Bits (IndiceImaginario));
```

```
    X = [0 X 0];
```

```
    x_hold = ifft ([X, conj( fliplr(X (2 : length(X) - 1)))]);
```

```
    x_hold = [x_hold(length(x_hold) - CP + 1 : length(x_hold)), x_hold];
```

```
    Signal = [Signal, x_hold];
```

```
end
```

```
Signal = real(Signal);
```

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, Jeffrey G; Ghosh, Arunabha; Muhamed, Rias, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, 1ra Edición, Prentice Hall, Estados Unidos 2007.
- Molisch, Andreas F, *Wireless Communications*, 1ra Edición, Wiley, Estados Unidos 2005.
- Hara, Shinsuke; Ramjee, Prasad, *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*, 1ra Edición, Artech House, Boston – Londres 2003.
- Hernando, José; Pérez, Fonlan, *Introduction to Mobile Communications Engineering*, 3ra Edición, Artech House, Boston 1999.
- Cevallos Tipan, Christian Omar, *Análisis y Desarrollo de un Software de Modelos de Simulación de un Canal Móvil Para las Bandas de 850 MHz, y 1900MHz*, Proyecto de Grado para la Obtención del Título de Ingeniería, Escuela Politécnica del Ejército 2006.
- Cuarto Boletín Tecnológico, WiMAX IEEE 802.16-2004, Gerencia de Políticas Regulatorias – OSIPTEL, Marzo 2006.
- Channel Models for Fixed Wireless Applications, http://wirelessman.org/tg3/contrib/802163c-01_29r4.pdf.
- Anexo 1, <http://toip.uchile.cl/mediawiki/upload/e/e5/AnexoFG-Marcomun.pdf>
- ¿Que es WiMAX?, http://www.codiumnetworks.com/img/Que_es_WiMAX.pdf.

- MARCANO, DIÓGENES, WiMAX, WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS: Acceso Inalámbrico Banda Ancha, <http://eventos.ula.ve/sitel/expo/DM-Wimax.pdf>.
- Langton, Charan, Intuitive Guide to Principles of Communications, <http://www.complextoreal.com/chapters/ofdm2.pdf>, 2004.
- Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications, http://wirelessman.org/tg3/contrib/802163p-00_49.pdf.

El proyecto de grado, “Análisis y Simulación del Canal de Propagación Invariante en el Tiempo del Estándar WiMAX IEEE 802.16d.”, fue entregado al Departamento de Eléctrica y Electrónica y reposa desde:

Sangolquí,

Ing. Gonzalo Olmedo M.Sc.

Coordinador de la Carrera de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

Dr. Jorge Carvajal
Secretario Académico

Carlos Alberto Novoa Velasco
Autor