



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

AUTOR: MADRIGAL RAMOS, JOHN ALEXANDER

**TEMA: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE UNA
RED LTE (RELEASE 8)**

DIRECTOR: ING. DANIEL ALTAMIRANO

CODIRECTOR: ING. RUBÉN LEÓN

SANGOLQUÍ, 13 DE ENERO DE 2015

Certificado de tutoría

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICADO

Ing. Daniel Altamirano MSc.

Ing. Rubén León MSc.

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE UNA RED LTE (RELEASE 8)”, realizado por John Alexander Madrigal Ramos, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en su reglamento.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

Sangolquí, 13 de Enero de 2015.

Ing. Daniel Altamirano MSc.

Ing. Rubén León MSc.

DIRECTOR

CODIRECTOR

Declaración de Responsabilidad

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

JOHN ALEXANDER MADRIGAL RAMOS

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE UNA RED LTE (RELEASE 8).”, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 13 de Enero de 2015.

John Alexander Madrigal Ramos

Autorización de publicación

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

JOHN ALEXANDER MADRIGAL RAMOS

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA CAPA FÍSICA DE UNA RED LTE (RELEASE 8).”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Sangolquí, 13 de Enero de 2015.

John Alexander Madrigal Ramos

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios por permitirme darme la salud y fortaleza a lo largo de la carrera. A mi papa Guillermo, por ser mi ejemplo de arduo trabajo y superación, porque gracias a ese esfuerzo he podido alcanzar mis metas. A mi mama Lilian que siempre se preocupo de mi, gracias por esos consejos y por haber formado el hombre que soy hoy en día. A mi familia en general que siempre han sido un soporte vital para superar las adversidades que se presentaron a lo largo de mi carrera. Y finalmente a todas las personas que de una u otra manera me dieron ese aliento para seguir adelante.

John A. Madrigal Ramos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme bendecido con la familia tan hermosa que tengo, a mis papas por haber depositado la confianza en mí y mediante ese esfuerzo poder culminar una etapa de mi vida. Gracias papi y mami en realidad no existen palabras para agradecer su infinito amor hacia mí y por darme siempre su apoyo y tiempo; Fue duro cuando comencé, ya que tuve que alejarme de ustedes y mis hermanas, en especial mi Pulguita, pero al culminar esta etapa me doy cuenta de los esfuerzos y de lo difícil que ha sido para todos, los fines de semana que iba a la casa eran de verdad la fuente de energía para seguir caminando y sobrellevar todas las dificultades, solo me queda decirles gracias por siempre estar ahí para mí y agradecer a Dios por los padres que tengo. Mamita Zoila Q.E.P.D y Mamita Fanny gracias por saberme aconsejar y guiarme para ser una mejor persona, les agradezco por depositar su amor y fe en mí.

A mi novia Nathaly que aunque al principio estuvimos tan lejos uno del otro siempre encontró la manera de hacerme sonreír y darme ese apoyo que tanto necesite, ahora que estamos más cerca es increíble ver cómo vamos cumpliendo las metas que nos propusimos cuando éramos tan jóvenes. Gracias por su increíble apoyo y por hacerme olvidar mis problemas simplemente con una sonrisa o un abrazo. A su abuelita Doña Judith Q.E.P.D. y a su mami Nancy por estar siempre pendientes de mí por quererme y acogerme como un hijo más en su seno familiar, y a la Familia Cerón Mantilla por todo su apoyo.

A ustedes Ing. Daniel Altamirano e Ing. Rubén León por haberme dado el apoyo para la realización de este proyecto de grado y de cada uno de los proyectos que nos hemos planteado. Sin su constante participación no habría sido posible el desarrollo de este, Dios les pague y sigan formando profesionales no solo que estén orientados a

la parte académica sino como lo han hecho conmigo mostrándome esa parte humana que debemos tener todos.

Y a mis amigos Kachin, Andrés, Diego, Jhovan y muchos otros por todas esas malas noches que a la final terminábamos pasando súper bien y siempre siendo los mejores en todo lo que nos propusiéramos. Gracias amigos por ese apoyo.

John A. Madrigal Ramos

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------------|
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| ÍNDICE GENERAL | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS | xiii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xv |
| RESUMEN | xxi |
| ABSTRACT | xxii |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Justificación e Importancia | 4 |
| 1.3 Alcance del Proyecto | 5 |
| 1.4 Objetivos | 7 |
| 1.4.1 General | 7 |
| 1.4.2 Específicos | 7 |
| 1.5 Organización de la Memoria | 7 |

| | | |
|----------|--|----------|
| 2 | MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1 | Estado del Arte | 9 |
| 2.2 | Arquitectura de una Red LTE (R8) | 12 |
| 2.2.1 | Red de Núcleo (CN) | 13 |
| 2.2.2 | Red de Acceso | 14 |
| 2.2.3 | Plano de Usuario | 16 |
| 2.2.4 | Plano de Control | 16 |
| 2.2.5 | Interfaces de Red | 17 |
| 2.3 | Capa Física | 20 |
| 2.3.1 | Canales Lógicos | 20 |
| 2.3.2 | Canales de Transporte | 21 |
| 2.3.3 | Canales Físicos | 22 |
| 2.3.4 | Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos | 23 |
| 2.4 | Especificaciones de la Capa Física | 25 |
| 2.4.1 | Introducción | 25 |
| 2.4.2 | Tecnologías de Múltiple Acceso | 25 |
| 2.4.3 | Estructura de una Trama | 31 |
| 2.4.4 | MIMO - <i>Multiple Inputs Multiple Outputs</i> | 33 |
| 2.4.5 | Modulación y Codificación | 35 |
| 2.4.6 | Malla de Recursos | 42 |
| 2.4.7 | Modelamiento de Canal | 47 |
| 2.4.8 | Ecualización | 49 |
| 2.4.9 | Modos de Transmisión | 49 |
| 2.4.10 | Adaptación de Enlace | 51 |
| 2.5 | Especificaciones del Modelo del Enlace de Bajada - <i>Downlink</i> | 52 |
| 2.6 | Especificaciones del Modelo del Enlace de Subida - <i>Uplink</i> | 54 |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| 3 | HARDWARE Y SOFTWARE | 56 |
| 3.1 | MATLAB/SIMULINK | 56 |
| 3.1.1 | MATLAB | 56 |
| 3.1.2 | Simulink | 57 |
| 3.2 | USRP - N210 | 58 |
| 3.3 | Daughterboard | 60 |
| 3.4 | Antena | 61 |
| 4 | DESARROLLO DE SIMULACIONES | 63 |
| 4.1 | Introducción | 63 |
| 4.2 | Codificación | 64 |
| 4.2.1 | Métodos Utilizados | 65 |
| 4.2.2 | Diagrama de Flujo | 65 |
| 4.3 | Modulación | 67 |
| 4.3.1 | Métodos Utilizados | 68 |
| 4.3.2 | Diagrama de Flujo | 69 |
| 4.4 | Modelamiento de Canal | 70 |
| 4.4.1 | Métodos Utilizados | 71 |
| 4.4.2 | Diagrama de Flujo | 71 |
| 4.5 | SISO | 73 |
| 4.5.1 | Métodos Utilizados | 74 |
| 4.5.2 | Diagrama de Flujo | 74 |
| 4.6 | SIMO | 76 |
| 4.6.1 | Métodos Utilizados | 77 |
| 4.6.2 | Diagrama de Flujo | 77 |
| 4.7 | Modos de Transmisión | 78 |
| 4.7.1 | Modo de Transmisión 2 | 78 |
| 4.7.2 | Modo de Transmisión 3 y 4 | 80 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.8 | Adaptación de Enlace con CQI | 82 |
| 4.8.1 | Diagrama de Flujo | 84 |
| 4.9 | Transmisión del <i>Downlink</i> mediante un USRP N210 | 86 |
| 4.10 | Transmisión del <i>Uplink</i> mediante un USRP N210 | 88 |
| 4.11 | Simulación de la Capa Física de LTE (R8) | 89 |
| 5 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 93 |
| 5.1 | Codificación | 93 |
| 5.2 | Modulación | 94 |
| 5.3 | Efectos de Canal | 96 |
| 5.4 | SISO | 98 |
| 5.5 | SIMO | 101 |
| 5.6 | Modos de Transmisión | 102 |
| 5.6.1 | Modo de Transmisión 2 | 102 |
| 5.6.2 | Modo de Transmisión 3 | 104 |
| 5.6.3 | Modo de Transmisión 4 | 106 |
| 5.7 | Adaptación de Enlace con CQI | 107 |
| 5.8 | Transmisión del Downlink mediante USRP N210 | 110 |
| 5.9 | Transmisión del Uplink mediante USRP N210 | 113 |
| 5.10 | Simulación de la Capa Física de LTE (R8) | 114 |
| 6 | CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO | 116 |
| 6.1 | Conclusiones | 116 |
| 6.2 | Recomendaciones | 118 |
| 6.3 | Trabajo Futuro | 119 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 120 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Tasas de transmisión de los sistemas de comunicaciones inalámbricas en las últimas dos décadas. Fuente: (Understanding LTE with MATLAB, 2014) | 3 |
| 2 | Evolución del Estándar de la 3GPP. Fuente: GSACOM (2014b) | 11 |
| 3 | Canales Lógicos. Fuente: Poole (2012) | 21 |
| 4 | Canales de Transporte. Fuente: Poole (2012) | 21 |
| 5 | Parámetros de la Capa Física de LTE (R8). Fuente: Innovations (2010) . . | 45 |
| 6 | Modos de Transmisión de LTE (R8). Fuente: Rohde and Schwarz (Febrero 2014) | 50 |
| 7 | Especificaciones Técnicas USRP-N210. Fuente: Research (2014c) | 59 |
| 8 | Especificaciones <i>Daughterboard</i> SBX. Fuente: Research (2014b) | 61 |
| 9 | Especificaciones Antena VERT900. Fuente: Research (2014e) | 62 |
| 10 | Objetos del Sistema Utilizados: Codificación. | 65 |
| 11 | Objetos del Sistema Utilizados: Modulación. | 68 |
| 12 | Objetos del Sistema Utilizados : Modelamiento de Canal. | 71 |
| 13 | Parámetros de la Simulación : SISO | 73 |
| 14 | Parámetros de la Simulación: SIMO | 76 |
| 15 | Parámetros de la Simulación: Adaptación de Enlace CQI | 83 |
| 16 | Parámetros de la Transmisión: <i>Uplink</i> | 88 |

| | | |
|----|--|-----|
| 17 | Parámetros de la Transmisión - Capa Física de LTE (R8) | 91 |
| 18 | Tasas de Transmisión - Variando Símbolos de Control - SISO | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Evolución de los estándares de comunicaciones inalámbricas en las últimas dos décadas. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 2 |
| 2 | Asignación de Espectro para Servicios IMT. Fuente: <i>Plan Nacional de Frecuencias</i> (4 de Julio del 2012) | 4 |
| 3 | Especificaciones del enlace de bajada de la capa física de LTE. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 6 |
| 4 | Especificaciones del enlace de subida de la capa física de LTE. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 6 |
| 5 | Hitos relevantes en el proceso de estandarización de LTE. Fuente: López (2009) | 9 |
| 6 | Crecimiento de Equipos de Usuario de LTE en los últimos años. Fuente: GSACOM (2014c) | 10 |
| 7 | Funcionalidad entre E-UTRAN y EPC. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 13 |
| 8 | Arquitectura de la Red de Acceso. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 14 |
| 9 | Pila de Protocolos de Usuario E-UTRAN. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 16 |
| 10 | Pila de Protocolos de Control E-UTRAN. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 17 |
| 11 | Interfaz S1. Fuente: Guide (2011) | 18 |
| 12 | Interfaz S1 - Plano de Control. Fuente: Lucent (2010) | 18 |
| 13 | Interfaz S1 - Plano de Usuario. Fuente: Lucent (2010) | 19 |
| 14 | Interfaz X2. Fuente: Lucent (2010) | 19 |
| 15 | Capa Física. Fuente: EUIT (2012) | 20 |

| | | |
|----|--|----|
| 16 | Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos Downlink. Fuente: EUIT (2012) | 24 |
| 17 | Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos Uplink. Fuente: EUIT (2012) | 24 |
| 18 | Señal OFDM representada en el Dominio del Tiempo y Frecuencia. Fuente: Agilent (2009) | 26 |
| 19 | Espectro de una Señal OFDM. Fuente: Yong Soo Cho (2010) | 27 |
| 20 | Tiempo de Guarda. Fuente: Telefónica (2013) | 28 |
| 21 | Asignación de Subportadoras en OFDM y OFDMA. Fuente: Agilent (2009) | 29 |
| 22 | Diagrama de Bloques de Downlink y Uplink para SC-FDMA. Fuente: Zyren and McCoy (2007) | 30 |
| 23 | Modos de Distribución de las Subportadoras en SC-FDMA. Fuente: Zyren and McCoy (2007) | 31 |
| 24 | Estructura Tipo 1 : FDD. Fuente: <i>ETSI TS 136.211</i> (2010) | 32 |
| 25 | Formato de la Ranura. Fuente: Innovations (2010) | 32 |
| 26 | Estructura Tipo 2 : TDD. Fuente: <i>ETSI TS 136.211</i> (2010) | 32 |
| 27 | SISO. Fuente: (Rohde & Schwarz, 2009) | 33 |
| 28 | Modos de Configuración de MIMO. Fuente: Guo (2012) | 34 |
| 29 | Sistema MIMO $M \times N$. Fuente: F. Khan (2009) | 35 |
| 30 | Diagramas de Constelación de QPSK, 16 QAM y 64 QAM. Fuente: Myung (2008) | 35 |
| 31 | Diagrama de Bloques de un Codificador Turbo. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 38 |
| 32 | Principio de QPP basado en entrelazamiento. Fuente: Erik Dahlman (2011) | 38 |
| 33 | Diagrama de Bloques de un Decodificador Turbo. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 39 |
| 34 | Segmentación de Bloques de Código. Fuente: Erik Dahlman (2011) . . . | 40 |

| | | |
|----|---|----|
| 35 | Procesamiento del Canal de Transporte Fuente: Erik Dahlman (2011) . . . | 41 |
| 36 | Malla de Recurso, una subtrama. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 42 |
| 37 | Malla de Recurso Completa. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 43 |
| 38 | Arreglo de los símbolos CSR en una subtrama. Fuente: Stefania Sesia (2009) | 46 |
| 39 | Arreglo de los símbolos CSR para diferentes números de antenas. Fuente: Understanding LTE with MATLAB (2014) | 46 |
| 40 | Ancho de Banda de la señal Vs. Ancho de banda del canal. Fuente: Arias (2009) | 47 |
| 41 | Ancho de Banda de la señal Vs. Ancho de banda del canal. Fuente: Arias (2009) | 48 |
| 42 | Modo de Transmisión 3 con 2 Antenas. Fuente: Rohde and Schwarz (Febrero 2014) | 51 |
| 43 | Modo de Transmisión 4 con 2 Antenas para un solo Usuario. Fuente: (Rohde & Schwarz, Febrero 2014) | 51 |
| 44 | Modelo de transmisión del enlace de bajada - (<i>Downlink</i>). Elaborado por: John Madrigal | 53 |
| 45 | Modelo de transmisión del enlace de subida - (<i>Uplink</i>). Elaborado por: John Madrigal | 55 |
| 46 | Esquema de un sistema SDR. Fuente: Alexander Galvis (2014) | 58 |
| 47 | Dispositivo USRP-N210. Fuente: Research (2014d) | 59 |
| 48 | <i>Daughterboard</i> SBX. Fuente: Research (2014a) | 60 |
| 49 | Antena Vert 900. Fuente: Research (2014e) | 61 |
| 50 | Entorno Gráfico de la Simulación: Framework | 63 |
| 51 | Entorno Gráfico de la Simulación: Codificación | 64 |

| | | |
|----|---|----|
| 52 | Diagrama de Flujos: Codificación Viterbi Soft y Hard Decision | 66 |
| 53 | Entorno Gráfico de la Simulación: Modulación | 67 |
| 54 | Diagrama de Flujos: Modulación - Canal de Transporte | 69 |
| 55 | Entorno Gráfico de la Simulación: Canal | 70 |
| 56 | Diagrama de Flujos : Efectos de Canal | 72 |
| 57 | Entorno de Simulación: SISO | 74 |
| 58 | Diagrama de Flujos: SISO | 75 |
| 59 | Entorno de Simulación: SIMO | 77 |
| 60 | Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 2 | 78 |
| 61 | Diagrama de Flujos: Modo de Transmisión 2 | 79 |
| 62 | Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 3 | 80 |
| 63 | Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 4 | 80 |
| 64 | Diagrama de Flujo: Modo de Transmisión 3 y 4 | 81 |
| 65 | Entorno de Simulación: Adaptación de Enlace CQI | 82 |
| 66 | Tabla de Valores Modulación y Tasa de Código según el SINR | 84 |
| 67 | Diagrama de Flujo: Adaptación de Enlace CQI | 85 |
| 68 | Diagrama de Bloques : Downlink | 86 |
| 69 | Diagrama de Bloques: Sistema de Envío | 87 |
| 70 | Entorno de Simulación: Transmisión del Enlace de Subida (<i>Uplink</i>) | 89 |
| 71 | Simulación Completa de la Capa Física de LTE R8 | 90 |
| 72 | Interfaz de Parámetros de la Simulación: Capa Física LTE R8 | 92 |
| 73 | Comparación de BER con diferentes Codificaciones | 93 |
| 74 | Gráficas BER | 95 |
| 75 | Canal con Desvanecimiento Plano y Baja Movilidad | 97 |
| 76 | Canal con Desvanecimiento Plano y Alta Movilidad | 97 |
| 77 | Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Baja Movilidad | 98 |
| 78 | Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Alta Movilidad | 98 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 79 | Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Constelación - SISO | 99 |
| 80 | Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Espectro | 99 |
| 81 | BER SISO con Ecualizador | 100 |
| 82 | Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Constelación - SIMO | 101 |
| 83 | Espectro de la Señal Transmitida y Receptada antes y después del Ecualizador - SIMO | 101 |
| 84 | BER - SIMO | 102 |
| 85 | Constelaciones con MIMO 2X2 | 103 |
| 86 | Señal con MIMO 2X2 | 103 |
| 87 | Rendimiento del BER en el Modo de Transmisión 2 | 104 |
| 88 | Constelaciones con MIMO 2X2 | 105 |
| 89 | Espectro de la señal con MIMO 2X2 | 106 |
| 90 | BER en el Modo de Transmisión 3 | 106 |
| 91 | BER en el Modo de Transmisión 4, según los Símbolos de Control | 107 |
| 92 | Resultados Adaptación de Enlace con CQI | 108 |
| 93 | Constelaciones - Adaptación de Enlace | 109 |
| 94 | Señales - Adaptación de Enlace | 109 |
| 95 | Vector SINR | 110 |
| 96 | Espectro de la Señal Transmitida Física y de Simulink - 1.4MHz | 111 |
| 97 | Espectro de la Señal Transmitida Física y de Simulink - 10MHz | 112 |
| 98 | Espectro de la Señal Transmitida Física por el USRP y un eNodeB - 20MHz | 112 |
| 99 | Espectro de la Señal generada en MATLAB y de la señal transmitida | 113 |
| 100 | Gráfica en 3D de la Señal a transmitirse. | 114 |
| 101 | Señal Transmitida - 20MHz | 115 |
| 102 | Señal Recibida - 20MHz | 115 |

RESUMEN

El presente proyecto contempla el modelamiento y simulación de la capa física de una red LTE (*Release 8*). El programa desarrollado denominado "LTE Framework" se basa en los conceptos del estándar desarrollado por la 3GPP, este permite realizar una variedad de simulaciones, las cuales están orientadas a la enseñanza mediante el análisis del BER, gráficas de constelaciones y señales, permitiendo de esta manera contrastar lo aprendido en la teoría. Se realizó una interfaz que sea amigable al usuario la cual permite realizar simulaciones de: Codificación, Modulación, Efectos de Canal, SISO, SIMO, Modos de Transmisión 2,3 y 4, Adaptación de Enlace con CQI y la simulación del Sistema Completo. A su vez permite interactuar con el equipo USRP N210 para él envío de datos estructurados según el estándar, tanto para el Uplink como para el Downlink, permitiendo escoger los parámetros como ancho de banda, modulación, tasa de codificación, todo esto para observar cómo se comporta la señal transmitida en un entorno real. El documento elaborado para este proyecto de grado toma en cuenta la teoría inmersa en la Capa Física y la resume en el Capítulo 2, en el Capítulo 3 se muestran el hardware y software utilizado, en el Capítulo 4 se encuentra la metodología que se utilizó para la realización de las simulaciones, en el Capítulo 5 se observa los resultados obtenidos de las diferentes posibilidades que se encuentran en el programa y finalmente en el Capítulo 6 se muestran las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro que se puede realizar a partir de este proyecto.

Palabras clave: LTE, Release, 3GPP, Downlink, Uplink, CQI, BER, SISO, SIMO, USRP.

ABSTRACT

This project contains the modeling and simulation of the physical layer of a LTE (Release 8) network. The developed program named "LTE Framework" is based on the concepts of the 3GPP standard, the program will allow you to perform a variety of simulations which are oriented to learn through graphics of BER, constellation and signals, thereby allowing contrast with what learned in theory. A user-friendly interface was designed to allow the user to perform simulations such as: Coding, Modulation, Channel Effects, SISO, SIMO, Transmission Modes 2, 3 and 4, Link Adaptation with CQI and the Complete System simulation. At the same time it lets you interact with an USRP N210 so we can send structured data according to the standard for both the uplink and for the downlink, allowing you to choose parameters as bandwidth, modulation, coding rate, all to observe how the transmitted signal behaves in a real environment. The document prepared for this graduation project takes into account the theory immersed in the Physical Layer and summarized in Chapter 2, Chapter 3 the hardware and software used, in Chapter 4 the methodology used to conduct the simulations is shown, in Chapter 5 the analysis and results of the different possibilities that are in the program and finally in Chapter 6 the conclusions, recommendations and future work that can be done from this project.

Keywords: LTE, Release, 3GPP, Downlink, Uplink, CQI, BER, SISO, SIMO, USRP.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La evolución de los estándares de comunicaciones celulares llega actualmente hasta la implementación del estándar de LTE siendo considerado de 4ta Generación en su Release 10, cabe recalcar la importancia de este tipo de sistema debido a la gran velocidad para la transmisión y recepción de datos, todo esto por la actual convergencia de servicios en los terminales móviles.

Los requerimientos de LTE se basan en dos componentes fundamentales del sistema evolucionado de UMTS que es el *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) y el *Evolved Packet Core* (EPC), los objetivos de estos son los siguientes:

- Cobertura y capacidad del sistema mejorada.
- Altas tasas de transmisión.
- Baja latencia.
- Costos de operación reducidos.

- Soporte para múltiples antenas.
- Operaciones de ancho de banda flexibles.
- Integración con sistemas existentes (UMTS, WiFi, etc.).

En la Figura 1 se observa la evolución de las tecnologías de telefonía móvil en las últimas dos décadas, a partir del año 2010 se comenzó la migración a redes LTE debido a la gran cantidad de información que este estándar puede manejar y que actualmente llega hasta 1Gbps en el Release 10 de la 3GPP. Así mismo se puede observar que los estándares europeos del IEEE convergen en el estándar de LTE.

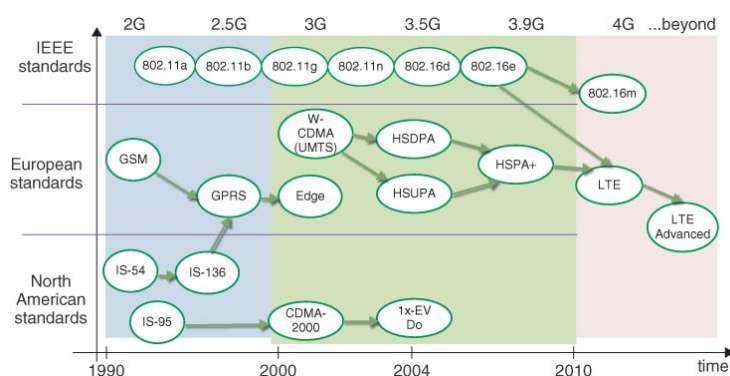


Figura 1: Evolución de los estándares de comunicaciones inalámbricas en las últimas dos décadas. **Fuente:** Understanding LTE with MATLAB (2014)

En la Tabla 1 se puede observar las diferentes tecnologías de comunicaciones inalámbricas las cuales han ido evolucionando, LTE-Advanced en su Release 10 alcanza la velocidad de 1Gbps en baja movilidad con diferentes características como radio cognitiva, agregación de portadora, entre otras; en GSM (2G) se tiene una tasa de transmisión de 9.6 kbps, en UMTS (3G) se tiene una tasa de 1.92 Mbps, en este momento es cuando la necesidad de los usuarios por ver contenido multimedia aumenta así como también el uso frecuente de dispositivos terminales como Smartphones, Tablets, entre otros; para llegar actualmente a LTE con el cual se tendrá una gran calidad de transmisión de datos para la convergencia de las aplicaciones de estos terminales móviles.

Tabla 1: Tasas de transmisión de los sistemas de comunicaciones inalámbricas en las últimas dos décadas. **Fuente:** (Understanding LTE with MATLAB, 2014)

| <i>Tecnología</i> | <i>Velocidad de Transmisión Teórica (Baja Movilidad)</i> |
|----------------------|--|
| GSM | 9.6 kbps |
| IS-95 | 14.4 kbps |
| GPRS | 171.2 kbps |
| EDGE | 473 kbps |
| CDMA-2000 (1xRTT) | 307 kbps |
| WCDMA (UMTS) | 1.92 Mbps |
| HSDPA (Rel 5) | 14 Mbps |
| CDMA-2000 (1X-EV-DO) | 3.1 Mbps |
| HSPA+ (Rel 6) | 84 Mbps |
| WiMAX (802.16e) | 26 Mbps |
| LTE (Rel 8) | 300 Mbps |
| WiMAX (802.16m) | 303 Mbps |
| LTE-Advanced | 1Gbps |

En Ecuador actualmente se está realizando la implementación de la red LTE (R8) mediante la empresa de telecomunicaciones del estado CNT EP (Corporación Nacional de Telecomunicaciones), la implementación se está realizando en las 3 ciudades más importantes del país Quito, Guayaquil y Cuenca, de esta manera se pretende implantar nuevos servicios para los usuarios los cuales dispondrán de una gran velocidad de conexión.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - "ESPE" se han realizado varios proyectos sobre el estándar 4G LTE, en donde se realiza el análisis de la implementación de

esta tecnología en Ecuador, diseños de redes para los valles de Tumbaco y Los Chillos, y así también la implementación en si del sistema en la ciudad de Quito.

En Ecuador se inicia el proceso de implementación de LTE, cuando el 4 de Julio de 2012 el Consejo Nacional de Telecomunicaciones CONATEL aprobó modificaciones en el Plan Nacional de Frecuencias para los servicios de International Mobile Telecommunications IMT con lo cual el Ministerio de Telecomunicaciones MINTEL y la Secretaria Nacional de Telecomunicaciones SENATEL lanzaron una campaña para socializar los beneficios de LTE. Actualmente, todas las operadoras Móviles tienen concesión del espectro para servicios de IMT, pero únicamente CNT en las bandas de APT 700 (Asia Pacific Telecommunications) y AWS (Advanced Wireless Services), las bandas que se le atribuyeron a CNT van desde los bloques A-D para el UL y desde A' a D' para el DL en la Banda 4 de AWS, las cuales se observan en la Figura 2.

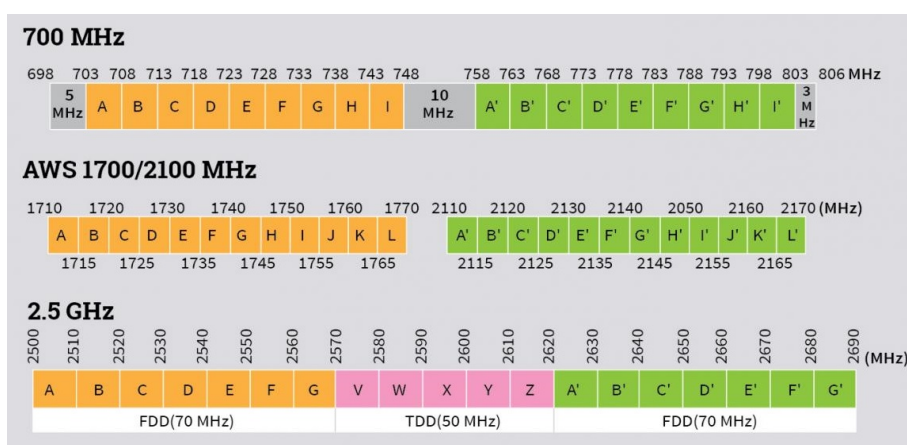


Figura 2: Asignación de Espectro para Servicios IMT. **Fuente:** *Plan Nacional de Frecuencias* (4 de Julio del 2012)

1.2 Justificación e Importancia

LTE puede proporcionar altas velocidades de datos, baja latencia y ancho de banda flexible. Para lograr estos objetivos se optó por varias tecnologías como Multiplexación

por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM) y tecnología MIMO. Además, otras tecnologías como codificación de canal robusta, adaptación de enlace y una arquitectura híbrida las cuáles también son de importancia, (Xuan, 2009).

La simulación de las tecnologías antes mencionadas permiten tener una visión clara de cómo LTE trabaja, permitiendo de esta manera analizar e interpretar gráficas del *Bit Error Rate* (BER) además del funcionamiento de la capa física y los canales físicos como: *Physical Downlink Shared Channel* y *Physical Uplink Shared Channel* (PDSCH y PUSCH respectivamente).

La realización de este proyecto permite colaborar con actividades académicas dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE en la asignatura de Redes de Nueva Generación del último nivel de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, para que de esta manera la teoría impartida se pueda contrastar mediante las simulaciones de la red LTE.

Además, implementar las características fundamentales de la red LTE mediante Radio Definido por Software permitirá realizar mediciones prácticas generando destrezas en el uso de equipos de laboratorio y campo por parte de los alumnos, así como también la interpretación de resultados.

1.3 Alcance del Proyecto

El presente proyecto busca entregar como producto final la simulación, mediante la herramienta de MATLAB Simulink, de la capa física de la Red LTE (Long Term Evolution), además de implementar la transmisión de datos que están estructurados para este tipo de red con el equipo USRP (Universal Software Radio Peripheral) N210 de Ettus Research (*USRP N210*, 2014).

Para la parte del enlace de bajada (Downlink) se implementara en Simulink el siguiente diagrama de bloques:

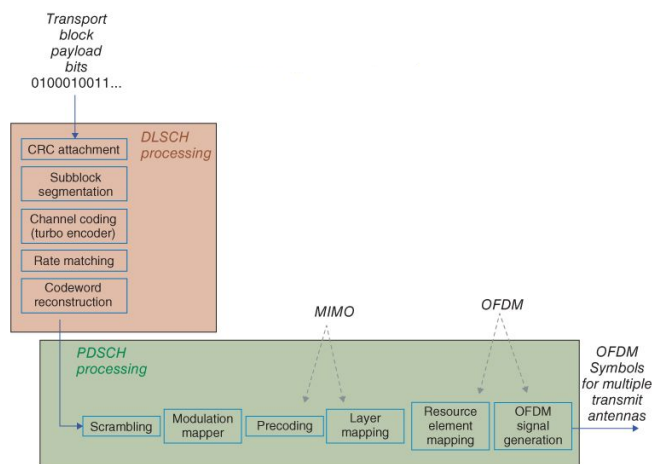


Figura 3: Especificaciones del enlace de bajada de la capa física de LTE. **Fuente:** Understanding LTE with MATLAB (2014)

Para el enlace de subida (Uplink) se implementara en Simulink el siguiente diagrama de bloques:

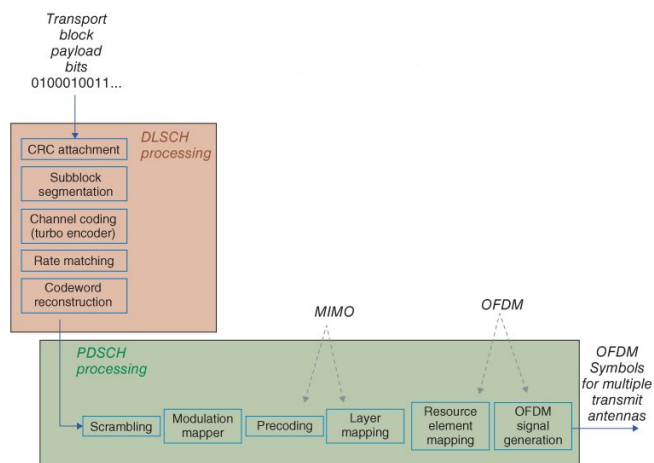


Figura 4: Especificaciones del enlace de subida de la capa física de LTE. **Fuente:** Understanding LTE with MATLAB (2014)

Mediante estas simulaciones se podrá comprender el funcionamiento de la capa

física de LTE, así como también se podrá interpretar las curvas del BER para diferentes parámetros, para una futura implementación de un sistema completo que permita realizar una comunicación entre dos terminales móviles.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Elaborar el modelamiento y simulación de la capa física de una red LTE (R8) que permita realizar un análisis del funcionamiento de esta mediante el uso de la herramienta MATLAB - Simulink.

1.4.2 Específicos

- Investigar las especificaciones técnicas de la capa física de una red LTE (R8).
- Realizar simulaciones de las diferentes modulaciones digitales (QPSK, 16QAM, 64QAM) que se encuentran estructuradas en LTE para obtener las gráficas del BER teóricas y simuladas mediante Matlab.
- Implementar un transmisor de LTE mediante un USRP N210, el cual permita observar el comportamiento de las señales al variar parámetros de la capa física.
- Analizar los resultados obtenidos mediante las simulaciones en Simulink.
- Analizar los parámetros de LTE mediante equipos de medición.

1.5 Organización de la Memoria

El presente trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se encuentra los fundamentos de la investigación de la Capa Física de la Red LTE (R8)

tomando en cuenta desde los conceptos básicos de la red hasta los más complejos que se incluyen en la capa física, en la Capítulo 3 se encuentra el Software y Hardware que ha sido utilizado para el presente trabajo. En el Capítulo 4 se procede a estructurar las diferentes simulaciones siempre tomando en cuenta que sea fácil de comprender, utilizar y que los resultados sean fácilmente identificados. En el Capítulo 5 se hace un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones mediante las gráficas de la tasa de error de bits, constelaciones, señales y el espectro. En el Capítulo 6 se encuentran las conclusiones, recomendaciones del presente trabajo, así como trabajos futuros que se pueden realizar a partir de este.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del Arte

El proceso de estandarización de LTE (R8) se comenzó a partir de Diciembre del año 2004, en la Figura 5 se puede observar cuales fueron los pasos fundamentales que se dieron para que se llegase a estandarizar y se proceda a las etapas de pruebas y comercialización.

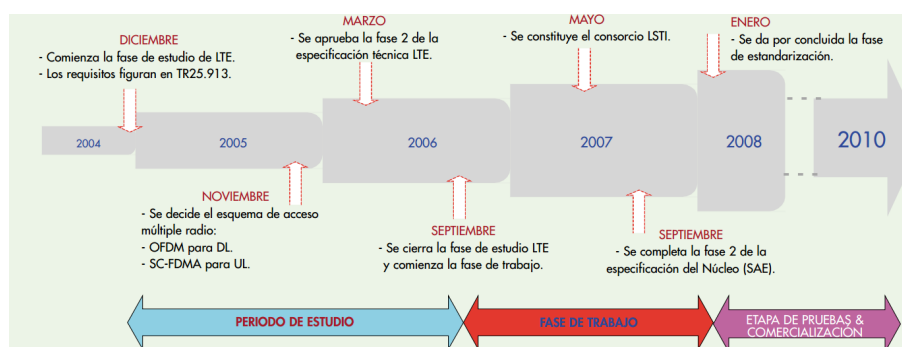


Figura 5: Hitos relevantes en el proceso de estandarización de LTE. **Fuente:** López (2009)

Todo este proceso de evolución de la tecnología móvil celular se debió a la convergencia de dispositivos móviles y con esto la creciente demanda de datos. La cantidad de dispositivos terminales de 4^{ta} Generación ha tenido un crecimiento exponencial desde su comercialización esto se puede observar en la Figura 6

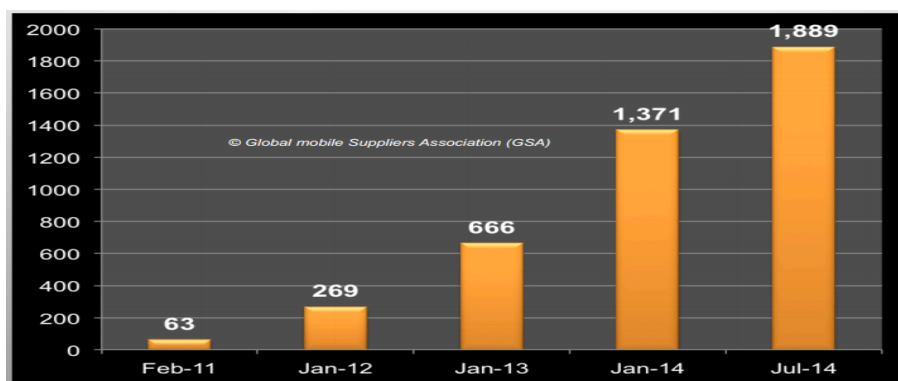


Figura 6: Crecimiento de Equipos de Usuario de LTE en los últimos años. **Fuente:** GSACOM (2014c)

Pero que hace de LTE tan rentable y que los usuarios adquieran nuevos equipos que soporten esta tecnología, a continuación se muestran las características principales de LTE:

- Tasas de velocidad máxima de 1Gbps en movilidad de baja movilidad y de 100 Mbps en alta movilidad (trenes, coches).
- Picos de Eficiencia espectral de 15 bits/Hz en Downlink y 6.75 bits/Hz en Uplink.
- Esta basado en modelo de red IP.
- Tecnología MIMO de hasta 4x4.

LTE actualmente llega a su Release 12 el cual esta siendo elaborado y se prevee que este listo para Diciembre del 2014, con el cual como se dijo anteriormente se ha ido mejorando de manera paulatina y constante, en la Tabla 2 se muestra las características principales en la evolución de los *Releases* de LTE.

Tabla 2: Evolución del Estándar de la 3GPP. **Fuente:** GSACOM (2014b)

| Release | Año | Características |
|----------------|------------|--|
| 8 | 2008 | 300Mbps DL y 75Mbps UL Ancho de banda Flexible 1.4-20 MHz Modo FDD y TDD Control de potencia Inter-Celdas MIMO Manejo de Interferencia Red basada en IP |
| 9 | 2009 | Femto Celdas - Home eNodeB (HenB) Self Organized Network (SON) eMBMS Servicios de Localización |
| 10 | 2011 | 1 Gbps Downlink 500 Mbps Uplink Agregación de portadora Ancho de Banda de hasta 100MHz MIMO 8x8 DL y 4x4 UL Coordinación entre celdas mejorada SON mejorada |
| 11 | 2013 | Agregación de portadora mejorada Nuevas bandas de trabajo Comunicación entre varias celdas simultaneamente Receptores mejorados |
| 12 | 2014 | Celdas Inteligentes Agregación de Portadora entre Sitios Técnicas para nuevas antenas y receptores avanzados Interconexión entre LTE y WiFi o HSDPA Mejoras de las tecnologías habilitadoras |

Actualmente con el Release 12 lo que se espera es tener modulaciones de un orden mas alto como 256 QAM en celdas inteligentes para el Downlink, así mismo tener una sincronización eficiente entre celdas. Para la mejora de antenas se desea tener el *beamforming* con elevación específica para un terminal, MIMO de hasta 64 antenas, mejoras en la agregación de portadora, con la posibilidad de agregar portadoras entre 2 celdas adyacentes o mas. Algo interesante es la conexión D2D (*Device-to-Device*) la cual permite establecer una comunicación directa entre dos dispositivos (GSACOM, 2014b).

Con todos estos beneficios LTE seguirá implementándose comercialmente en todo el mundo, según el reporte de GSA de Junio de 2014 existen 300 operadoras en 107 países con esta tecnología ya implementada y 557 operadoras en 163 países invirtiendo en la implementación de la misma. En Ecuador CNT EP es la única operadora con el espectro asignado para LTE, mientras que Claro y Movistar han realizado las peticiones para una extensión en la banda de 1900 MHz. (GSACOM, 2014a)

2.2 Arquitectura de una Red LTE (R8)

LTE ha sido diseñado para soportar servicios de conmutación de paquetes. Su objetivo es proporcionar Protocolos de Internet (IP) sin problemas de conectividad entre el Equipo de Usuario (UE) y la Red de Paquetes de Datos (PDN - *Packet Data Network*), sin interrumpir las aplicaciones de los usuarios finales durante la movilidad. LTE incluye términos como SAE, que es la evolución de la arquitectura del sistema, la cual viene acompañada de la evolución de la Red de Núcleo (EPC - *Evolved Packet Core*). LTE y SAE comprenden el sistema de paquetes evolucionado (EPS - *Evolved Packet System*).

EPS utiliza el concepto de los *Bearers* los cuales son flujos de paquetes IP con

una calidad de servicio (QoS) determinada entre el *Gateway* y el UE. Los Bearers son liberados por la E-UTRAN y la EPC, dependiendo de las aplicaciones que así los requieran.

2.2.1 Red de Núcleo (CN)

Esta red es responsable por el control sobre el UE y el establecimiento de los *Bearers*, esta formada por 3 nodos lógicos, que son:

- Puerta de enlace predeterminada a PDN (P-GW)
- Puerta de enlace predeterminada a Servicios (S-GW)
- Entidad de administración de movilidad (MME)

En la Figura 7 se observa la composición de la red a un alto nivel, la cual se compone de la red de acceso (E-UTRAN) y la red de núcleo (CN), esta arquitectura posee la particularidad de que el CN se compone de varios nodos lógicos, mientras que la red de acceso se compone esencialmente de un solo nodo lógico (eNodeB), estas están conectadas mediante una Interfaz S1 que se detallará posteriormente.

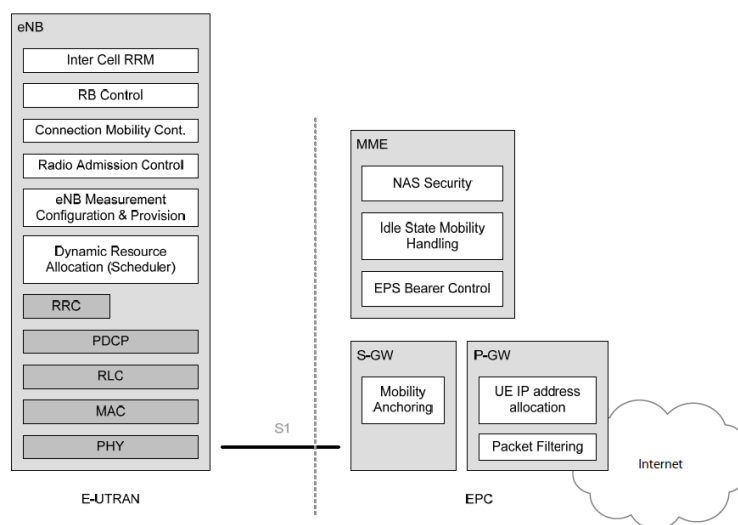


Figura 7: Funcionalidad entre E-UTRAN y EPC. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

A continuación se listan varias características de los nodos lógicos de la Red de Núcleo:

- P-GW
 - Es el responsable de asignación de direcciones IP para los UE's.
 - Aplica Calidad de Servicio (QoS) y filtra paquetes IP.
- S-GW
 - Los paquetes IP son transferidos al usuario a través del S-GW.
 - Sirve como soporte de movilidad local cuando existe un handover.
 - Administra funciones de los visitantes de la red.
- MME
 - Es el nodo de control, este procesa la señalización entre la CN y el UE.
 - Realiza funciones de gestión de bearers y otras relacionadas con la gestión de conectividad.

2.2.2 Red de Acceso

La red de acceso consiste en la unión de varios eNodeB como se observa en la Figura 8 los cuales están conectados mediante interfaces X2, y de estos hacia el MME/S-GW con interfaces S1.

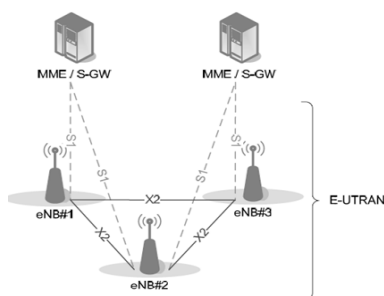


Figura 8: Arquitectura de la Red de Acceso. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

eNodeB

La función principal de un eNodeB es encargarse de la interfaz aire procesando aspectos como: codificación de canal, adaptación de velocidad, propagación entre otras, (Holma & Toskala, 2011). Y de manera general se encarga realizar la administración de recursos de radio, envío de información al S-GW, envío de mensajes de información a los usuarios, mediciones y reportes de la configuración para movilidad. (Agilent, 2009)

Protocolos de Acceso a Estratos

Estos protocolos sirven para la comunicación entre los distintos elementos de la red de acceso, se conocen como Protocolos de Acceso a Estratos (AS) y se listan a continuación, (Holma & Toskala, 2011):

- Administración de Recursos de Radio
 - Programación y Asignación dinámica de recursos a los UE's para UL y DL.
 - Control de Bearers.
 - Control de Admisión.
 - Control de Movilidad.
- Compresión de Cabecera
 - Asegura el uso eficiente de la interfaz de Radio.
 - Aplicado a servicio de VoIP (Voz sobre IP).
- Seguridad
 - Encriptación de datos a través de la interfaz de radio.

- Conectividad
 - Señalización hacia la MME y el Bearer hacia el S-GW.

2.2.3 Plano de Usuario

La pila de protocolos del plano de usuario en la E-UTRAN se muestra en gris en la Figura 9. Esta pila de protocolos consiste en la PDCP (Protocolo de Convergencia de Paquetes de Datos), RLC (Control de Enlace de Radio) y subcapas MAC (Control de Acceso al Medio) que terminan en el eNodeB a un lado de la red.

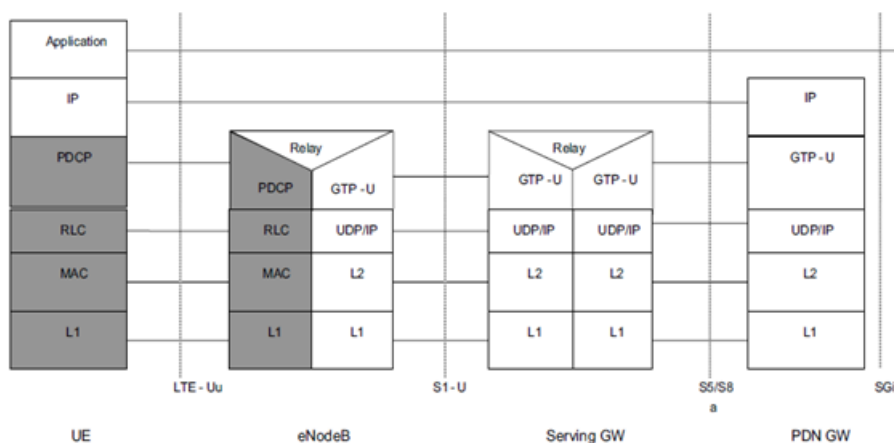


Figura 9: Pila de Protocolos de Usuario E-UTRAN. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

2.2.4 Plano de Control

El plano de control se basa en una pila de protocolos entre el UE y la MME y se muestra en la Figura 10. Para el plano de control la región de color gris indica los protocolos de acceso a estrato, estos son necesarios para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la interfaz. Las capas inferiores realizan las mismas funciones que en el plano de usuario con la excepción de que no hay ninguna función de compresión de cabecera para el plano de control, (Stefania Sesia, 2009).

Mediante estos dos planos se puede dimensionar de forma independiente los recursos físicos para la señalización del sistema y así mismo el envío de información entre usuarios.

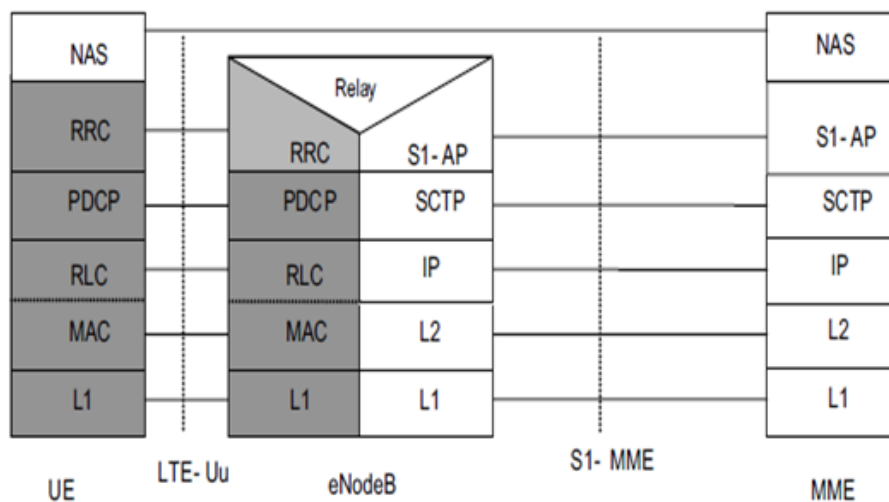


Figura 10: Pila de Protocolos de Control E-UTRAN. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

2.2.5 Interfaces de Red

Interfaz S1

La interfaz S1 interconecta a los eNodeB's, MME y S-GW, en el plano de usuario la interfaz se basa en GTP-U (*User Data Tunnelling*). En el plano de control la interfaz es similar a RANAP (*Radio Access Network Application Part*) con ciertas simplificaciones debido a las funcionalidades que tienen.

La interconexión entre los diferentes elementos en la Red LTE se muestra en la Figura 11. La estructura de esta interfaz esta basada en un pila de transporte totalmente IP, sin dependencia de la señalización de tipo SS7 que eran usadas en redes GSM o UMTS.

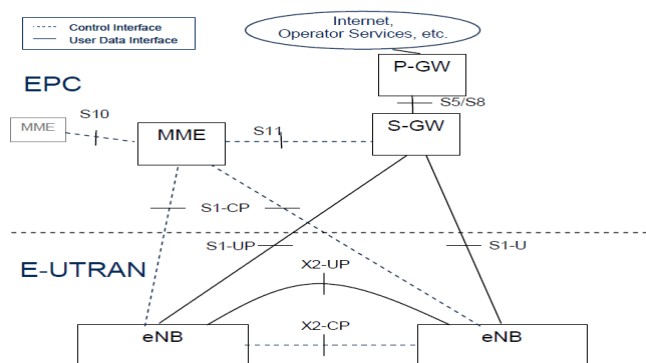


Figura 11: Interfaz S1. **Fuente:** Guide (2011)

Se establece que la interfaz S1 se divide en:

- S1-CP (Plano de Control)
 - La pila de protocolos del plano de control para la interfaz S1 se muestra en la Figura 12. El protocolo SCTP se lo usa para asegurar una transmisión de mensajes de señalización, la cual se aprovecha para manejar múltiples flujos de datos e implementar redundancia en transporte.

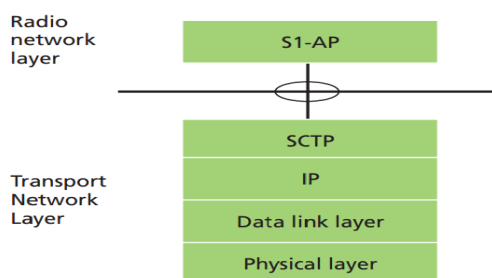


Figura 12: Interfaz S1 - Plano de Control. **Fuente:** Lucent (2010)

- S1-UP (Plano de Usuario)
 - La estructura del S1 para el plano de usuario se basa en GTP/UDP5/IP como se muestra en la Figura 13.

- Mediante esta interfaz se tiene control del flujo de datos del usuario, con lo cual se implementa diferenciación de servicio, por ejemplo tráfico en tiempo real.

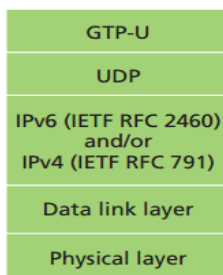


Figura 13: Interfaz S1 - Plano de Usuario. **Fuente:** Lucent (2010)

Interfaz X2

La interfaz X2 es la que permite el intercambio de información entre eNodeB's, así como la interfaz S1 esta se divide en el plano de control y el plano de usuario. En la Figura 14 se muestra la pila de protocolos para ambos casos.

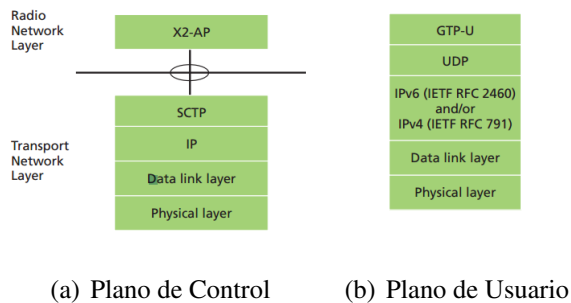


Figura 14: Interfaz X2. **Fuente:** Lucent (2010)

La interfaz X2 realiza el Handover de UE's, lo cual permite la movilidad, también maneja el balanceo de la carga y la administración de la interferencia. Debido al intercambio de información entre los eNodeB's se tiene un historial completo de los UE's.

2.3 Capa Física

La Capa Física como tal se concatena directamente con sus dos capas superiores de la Red LTE R8, las capas superiores le listan a continuación:

- Control de Recursos de Radio (RRC)
- Control de Acceso al Medio (MAC)

En la figura 15 se observa que entre la capa 1 y 2 existen canales de transporte los cuales llevan la información recibida, mientras que entre la capa 2 y 3 los datos se transmiten por canales lógicos, para poder realizar el control de los recursos, existe un canal entre la capa 1 y 3 el cuál envía la información de potencia e interferencia la cual se utiliza para que se tomen las medidas necesarias en próximas transmisiones.

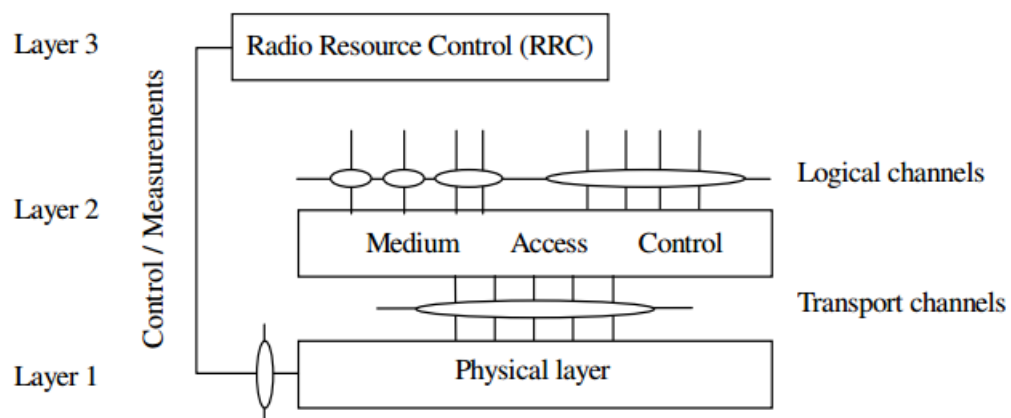


Figura 15: Capa Física. **Fuente:** EUIT (2012)

2.3.1 Canales Lógicos

Mediante estos se indican que tipo de información se intercambia. Los canales lógicos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Canales Lógicos. **Fuente:** Poole (2012)

| Canal Lógico | Tipo | Función |
|---------------------|-------------|--|
| BCCH | Control | Provee información del sistema a todos los UE's. |
| PCCH | Control | Usado conocer la ubicación de un UE en la red. |
| CCCH | Control | Usado para información de control hacia/desde un UE. |
| MCCH | Control | Usado para información que necesite recepción <i>multicast</i> . |
| DCCH | Control | Llevar información de control de un usuario específico. |
| DTCH | Tráfico | Transmisión de información de datos de usuario. |
| MTCH | Tráfico | Transmisión de datos para multiples usuarios. |

2.3.2 Canales de Transporte

Permiten saber como se estructura la información de distintos formatos, para esto se usan bloques de transporte (Transport Blocks TrBk), lo que estos bloques contienen son bits que llegan en un intervalo de tiempo (Transport Time Interval TTI). La función que cumple cada uno de estos se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Canales de Transporte. **Fuente:** Poole (2012)

| Canal de Transporte | Enlace | Función |
|----------------------------|---------------|---|
| BCH | DL | Mapea la información para el BCCH. |
| PCH | DL | Mapea la información para el PCCH |
| DL-SCH | DL | Canal compartido entre usuarios. |
| MCH | DL | Transmite la información del MCCH. |
| UL-SCH | UL | Canal principal para transferencia de Uplink. |
| RACH | UL | Usado para acceso inicial a la red. |

2.3.3 Canales Físicos

Establecen como se transmiten los bits de transporte en las Sub-Portadoras OFDM. Tiene funciones como la detección de errores en el canal de Transporte e indica estos a capas superiores, codificación y decodificación FEC, ajuste de la tasa de canal de transporte codificado al canal físico, control de potencia, modulación y demodulación y sincronización de tiempo y de frecuencia, entre otras. (EUIT, 2012). Los canales físicos se describen a continuación:

- **Downlink**

- PBCH (*Physical Broadcast Channel*)

- * Emite un número limitado de parámetros para el acceso inicial a la celda, como el ancho de banda del sistema para Downlink, la estructura de Indicador de Canal Hybrid ARQ y los 8 bits mas significativos del numero de *Frame* del sistema.
- * Usa modulación QPSK.

- PCFICH (*Physical Control Format Indicator Channel*)

- * Indica el número de símbolos de PDCCH por subtrama.
- * Usa modulación QPSK.

- PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*)

- * Planificación de UE.
- * Acuses de recibo (ACK/NACK)
- * Usa modulación QPSK.

- PHICH (*Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel*)

- * Lleva la información de HARQ: ACK/NACK.
- * Usa modulación BPSK en ejes I,Q con códigos expansores Walsh.

- PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*)
 - * Envío de datos de usuario y avisos.
 - * Usa modulaciones: QPSK, 16QAM, 64QAM.
- PMCH (*Physical Multicast Channel*)
 - * Difunde información para el servicio eMBMS.
 - * Usa modulaciones: QPSK, 16QAM, 64QAM.

- **Uplink**

- PRACH (*Physical Random Access Channel*)
 - * Permite el establecimiento de conexiones.
- PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*)
 - * Planificación UE, ACK/NACK.
 - * Usa modulaciones: BPSK, QPSK.
- PUSCH (*Physical Uplink Shared Channel*)
 - * Envío datos de usuario.
 - * Usa modulaciones: QPSK, 16QAM, 64QAM

2.3.4 Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos

Downlink

En la Figura 16 se muestra la relación que existe entre los Canales de Transporte y Canales Físicos para el Downlink.

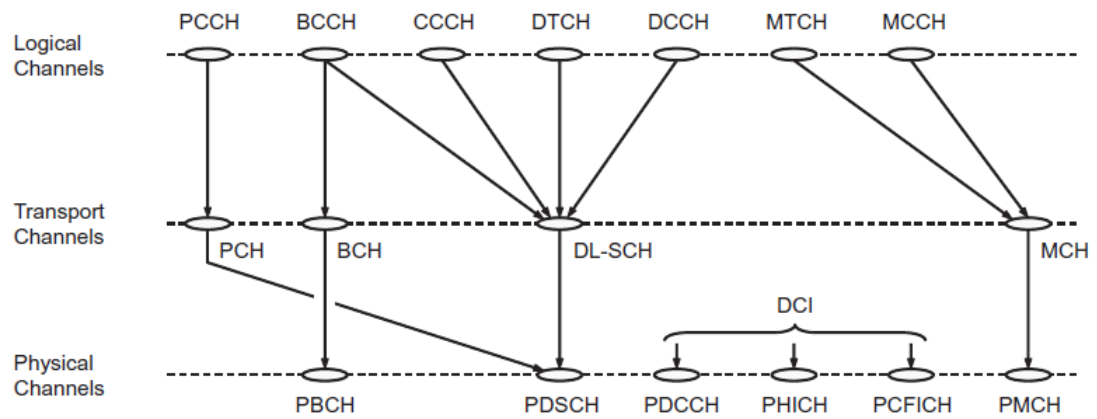


Figura 16: Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos Downlink. **Fuente:** EUIT (2012)

Uplink

En la Figura 17 se muestra la relación que existe entre los Canales de Transporte y Canales Físicos para el Uplink.

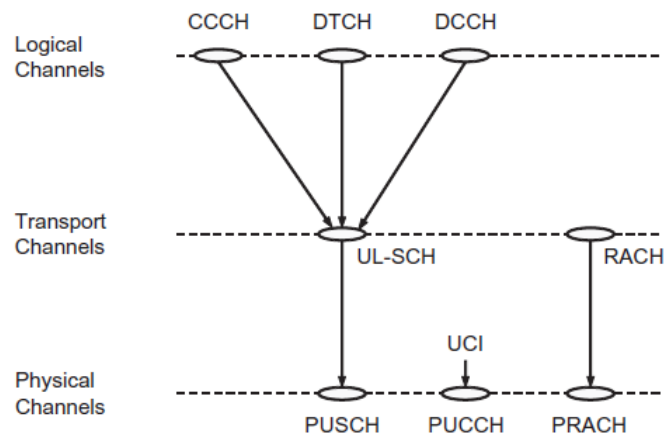


Figura 17: Correspondencia de Canales de Transporte - Canales Físicos Uplink. **Fuente:** EUIT (2012)

2.4 Especificaciones de la Capa Física

2.4.1 Introducción

El diseño de la capa física de LTE esta influenciado directamente por los requerimientos de velocidad (Downlink - 300Mbps / Uplink - 75Mbps) , eficiencia espectral y múltiples anchos de banda (1.4/3/5/10/15/20MHz) para el R8. Para cumplir estos requerimientos la 3GPP selecciono la tecnología OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales) como la base de LTE; Así también se decidió usar técnicas de múltiples antenas como lo es MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas) la cual incrementa la capacidad del canal (Multiplexación Espacial) y mejora la robustez de la señal para mitigar problemas de ruido.

Estas dos tecnologías son las habilitadoras y son la mayor diferencia con tecnología como 3G la cual se basa en CDMA (Acceso Múltiple por División de Códigos). Para el Downlink se usa OFDMA y para el Uplink se usa SC-FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia con Única Portadora). Así mismo se puede usar dos modos, FDD (Duplexación por División de Frecuencia) o TDD (Duplexación por División de Tiempo). Esta tesis se enfocará en FDD.

2.4.2 Tecnologías de Múltiple Acceso

OFDM

OFDM es una técnica de Multiplexación Multiportadora la cual ofrece una comunicación robusta en contra del desvanecimiento por múltiples trayectos y una fácil sincronización y ecualización en el receptor (Sturm, Zwick, & Wiesbeck, 2009).

OFDM usa un amplio numero de subportadoras separadas ortogonalmente, las cuales son transmitidas en paralelo. Cada subportadora es modulada con un esquema convencional (QPSK, 16QAM, 64QAM) a una tasa de símbolo baja. La combinación

de cientos o miles de subportadoras permiten incrementar la tasa de velocidad. En la Figura 18 se observa las claves para entender una señal OFDM en el tiempo y la frecuencia.

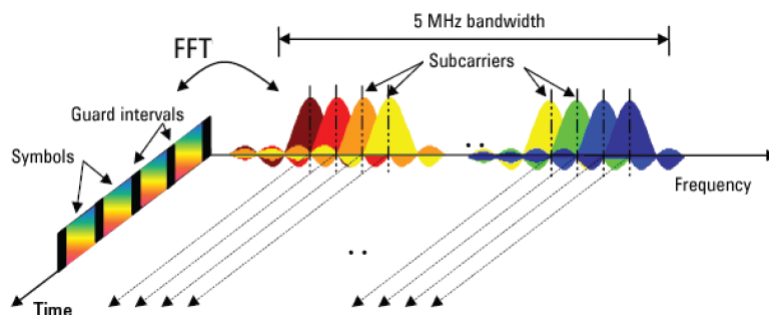


Figura 18: Señal OFDM representada en el Dominio del Tiempo y Frecuencia. **Fuente:** Agilent (2009)

En el dominio de la frecuencia múltiples tonos adyacentes o subportadoras son moduladas independientemente, mientras que en el dominio del tiempo los intervalos de guarda son insertados entre cada símbolo, esto para prevenir la Interferencia Inter-simbólica (ISI) en el receptor la cual es causada por propagación de múltiples trayectos en el canal.

El desarrollo de la obtención de las fórmulas para OFDM puede ser revisada en (Rethnakaran.P, 2003), en el cual se obtiene la ecuación 2.1, esta no es más que la Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT) la cual puede ser computada eficientemente por algoritmos de IFFT (Transformada Rápida Inversa de Fourier).

$$X_m = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{(j2\pi km/N)} \quad m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

Existe una característica muy importante en OFDM y es que la subportadora central debe de ser cero. El espectro de una señal OFDM se observa en la Figura 19.

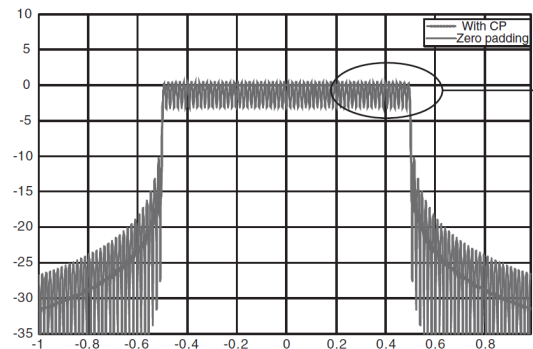


Figura 19: Espectro de una Señal OFDM. **Fuente:** Yong Soo Cho (2010)

Entre muchas de las ventajas que brinda OFDM se listan las mas relevantes a continuación:

- Ancho de Banda variable (1.4/3/5/10/15/20 MHz).
- Alta eficiencia espectral.
- Baja complejidad en la implementación del receptor.
- Robustez frente a las diferencias de retardo.
- Ideal para la implementación con MIMO.

Debido a la forma en la que se estructura la señal de OFDM existen ciertas desventajas, las cuales se listan a continuación:

- El espaciamiento entre subportadoras es muy pequeño, lo cual hace a OFDM que sea sensible a errores de frecuencia y ruido de fase.
- OFDM es sensible al efecto Doppler lo que causa interferencia entre subportadoras.
- Se necesita un mayor procesamiento que con tecnologías como CDMA en los bordes de las células.

Tiempo de Guarda

Para evitar la Interferencia entre Símbolos ISI, se habilita un tiempo de guarda, por lo que el tiempo útil de un símbolo es:

$$T_u = T_S - T_g \quad (2.2)$$

Durante el tiempo de guarda el receptor no lee la información, así, colas de los ecos de un impulso transmitido que caen dentro del tiempo de guarda no afectan al símbolo siguiente es decir que no ahí ISI como se puede observar en la Figura 20.

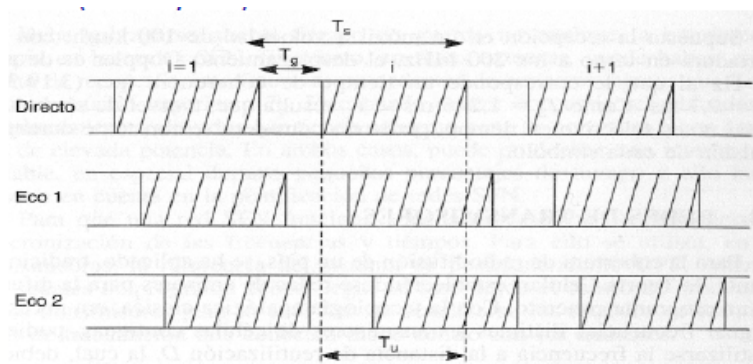


Figura 20: Tiempo de Guarda. **Fuente:** Telefónica (2013)

Prefijo Cíclico (CP)

El intervalo de guarda contiene una copia de las últimas muestras del símbolo denominada Prefijo Cíclico, este es usado para mantener la continuidad en la transmisión y para poder aplicar la convolución cíclica y la ecualización en frecuencia cuando se recibe. Este tiempo que dura el Prefijo Cíclico se denomina T_{CP} .

El valor del CP debe ser tomado con dependencia entre la potencial eliminación de ISI y la reducción de $\frac{E_b}{N_0}$ o Relación Señal Ruido. Para LTE la duración es de $5.2\mu s$ para el primer símbolo mientras que para el resto es de $4.7\mu s$. La duración de cada símbolo es de $66.7\mu s$ lo que nos da un total de $71.9\mu s$ para el primer símbolo y de $71.3\mu s$ para el resto, como se puede apreciar en la Figura 25.

OFDMA

OFDMA es una extensión de OFDM para la implementación de un sistema multiusuario, esta tecnología se encarga de distribuir las subportadoras a diferentes usuarios al mismo tiempo, generalmente estas se reúnen en grupos contiguos para simplificar y aumentar el rendimiento al indicar que subportadora se le ha asignado a cada usuario (Holma & Toskala, 2009; Stefania Sesia, 2009).

Basado en las condiciones del canal mediante una retro-alimentación con el equipo de usuario se puede realizar un asignamiento de subportadora adaptativo para el mismo, mejorando considerablemente la eficiencia espectral del sistema comparado con sistemas de un solo usuario OFDM.

Para cada usuario se tiene un grupo de subportadoras las cuales tienen un tiempo específico de duración, estos bloques de tiempo se los conoce como Bloques de Recurso (RB's - *Resource Blocks*). En la Figura 21 se observa como se asignan las subportadoras para un sistema OFDM y OFDMA, también se puede comparar que para el primero se organiza consecutivamente, mientras que para la segunda los usuarios pueden estar organizados en tiempo y en frecuencia, a lo cual se le denomina como diversidad en tiempo y frecuencia.

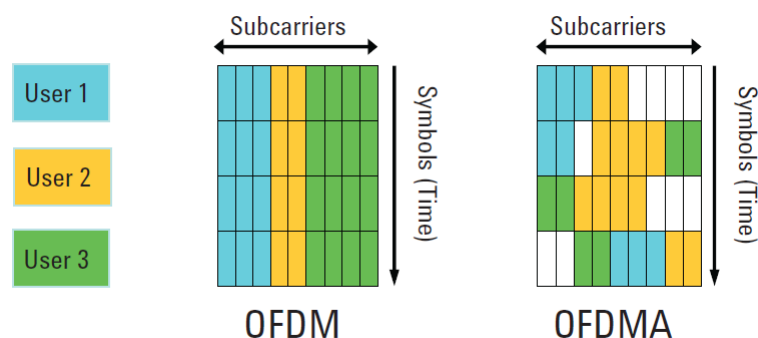


Figura 21: Asignación de Subportadoras en OFDM y OFDMA. **Fuente:** Agilent (2009)

SC-FDMA

Los requerimientos del Downlink con el Uplink difieren en algunas especificaciones, algo primordial que se debe considerar es que para un equipo de usuario el consumo de energía debe de ser bajo, por lo que se adopta SC-FDMA la cual cumple con estos requerimientos.

El transmisor es prácticamente idéntico al de OFDMA y ofrece la misma protección ante los múltiples trayectos, en la Figura 22 se observa que los cuadros grises son funciones unicamente de SC-FDMA mientras que los blancos son comunes con OFDMA tanto como para el transmisor y el receptor.

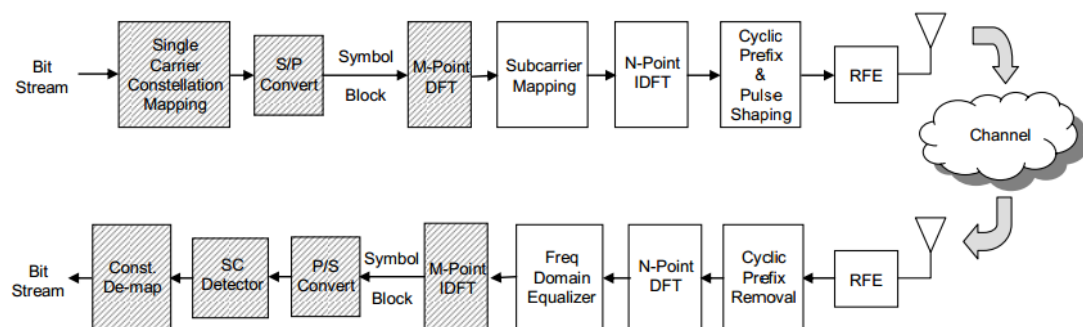


Figura 22: Diagrama de Bloques de Downlink y Uplink para SC-FDMA. **Fuente:** Zyren and McCoy (2007)

Otra característica muy importante de SC-FDMA es que las subportadoras pueden estar en un modo localizado o distribuido como se observa en la Figura 23, pero generalmente trabajara con el modo localizado, esto es debido a que se aprovecha la ganancia selectiva de frecuencia.

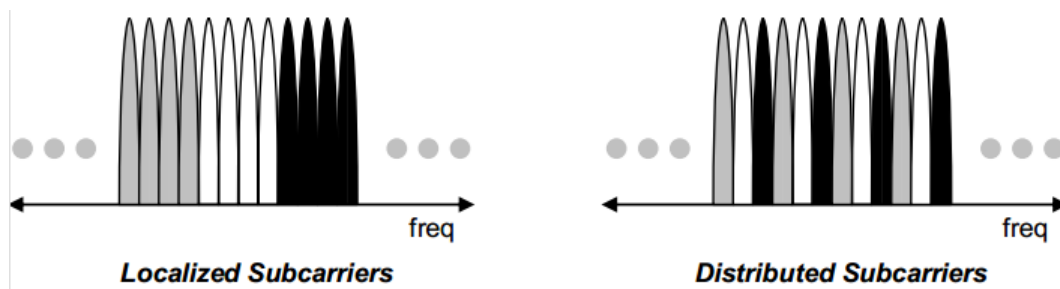


Figura 23: Modos de Distribución de las Subportadoras en SC-FDMA. **Fuente:** Zyren and McCoy (2007)

2.4.3 Estructura de una Trama

Existen dos tipos de Tramas soportadas para LTE (R8), una es en el modo FDD y otro en TDD, Tipo 1 y 2 respectivamente. Ambos tienen la característica de que la unidad básica de tiempo es: $T_s = \frac{1}{(15000 \times 2048)} s$, tanto para Uplink como para Downlink, estas se organizan en tramas de radio de 10ms, lo cual se obtiene de $T_f = 307200 \times T_s = 10ms$, información específica se puede encontrar en (ETSI TS 136.211, 2010).

Estructura Tipo 1

En la Figura 24 se observa la trama de Tipo 1. Esta es aplicable tanto a modo *Full-Duplex* o *Half-Duplex*. Cada trama de radio consiste en 20 ranuras, numeradas de 0 al 19, el tiempo de ranura es de 0.5ms y se calcula como se observa en la Ecuación 2.3.

$$T_{ranura} = 15360 \times T_s = 0.5ms \quad (2.3)$$

Las transmisiones de Uplink y Downlink se encuentran separadas en el dominio de la frecuencia. En el modo *Half-Duplex* el UE no puede transmitir y recibir al mismo tiempo, mientras que en *Full-Duplex* no existe esa restricción.

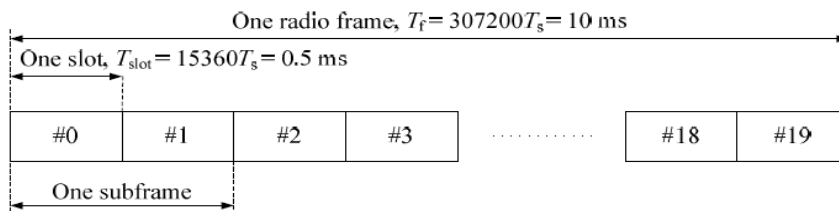


Figura 24: Estructura Tipo 1 : FDD. Fuente: ETSI TS 136.211 (2010)

De manera detallada se puede observar una ranura en la Figura 25, en donde se muestran el valor en tiempo de los elementos que componen una ranura.

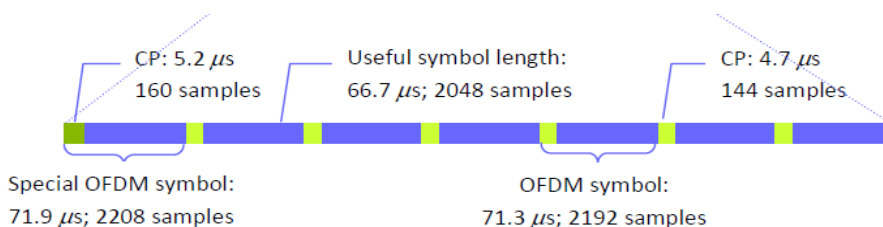


Figura 25: Formato de la Ranura. Fuente: Innovations (2010)

Estructura Tipo 2

La estructura de tipo 2 es solo aplicable a TDD, en donde al igual que la tipo 1 tiene una duración total de 10ms, solo que a esta se la divide en dos tramas de 5ms, cada una de estas consiste en 5 subtramas de 1ms, las primeras cinco están reservadas para el DL mientras que las siguientes son para el UL. En la Figura 26 se observa como se forma este tipo de estructura.

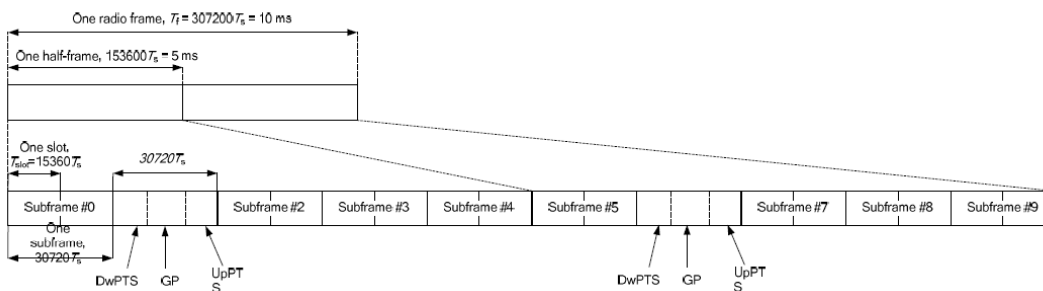


Figura 26: Estructura Tipo 2 : TDD. Fuente: ETSI TS 136.211 (2010)

2.4.4 MIMO - *Multiple Inputs Multiple Outputs*

Concepto

MIMO surge con la necesidad de mitigar problemas de propagación y de esta manera tener una comunicación más robusta en diferentes tipos de canales, así también para mejorar las tasas de transmisión, los sistemas convencionales solo usaban una antena para transmitir y una para recibir, a esto se le llama SISO - *Single Input, Single Output* como se puede observar en la Figura 27.



Figura 27: SISO. **Fuente:** (Rohde & Schwarz, 2009)

En LTE el objetivo de esta tecnología es tener altas tasas de transmisión, baja latencia y tecnología de acceso de radio optimizada para paquetes, para el enlace de bajada existen diferentes modos de transmisión los cuales se listan a continuación (Rohde & Schwarz, 2009):

- Transmisión con una sola antena.
- Diversidad de transmisión.
- Multiplexación Espacial en lazo abierto, retro-alimentación no necesaria.
- Multiplexación Espacial en lazo cerrado, retro-alimentación necesaria.
- Multi Usuario MIMO.
- Pre codificación en lazo cerrado.
- Formación de Haz (*Beamforming*).

Para el UL se debe considerar que el equipo terminal es de baja complejidad debido a esto se utiliza MU-MIMO, con lo cual múltiples usuarios usan el mismo canal y el consumo de energía es mínimo.

Los modelos definidos para realizar comunicación con múltiples antenas se los puede observar en la Figura 28, en donde se tiene:

- SISO
- SIMO - *Single Input, Multiple Output*
- MISO - *Multiple Input, Single Output*
- MIMO

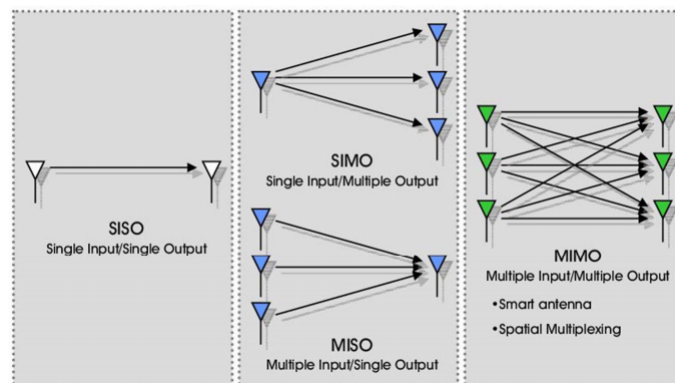


Figura 28: Modos de Configuración de MIMO. **Fuente:** Guo (2012)

Capacidad de Canal

Un canal MIMO consiste en la información de ganancia del canal y fase para cada enlace de las antenas, es así que para un canal $M \times N$ este consiste en una matriz $H_{N \times M}$ como se observa en la Ecuación 2.4, en donde h_{NM} representa la ganancia del canal de una antena de transmisión M a una antena de recepción N , para que de esta manera se pueda realizar una estimación en la Matriz MIMO y así separar señales de referencia

y piloto, las cuales son transmitidas por cada antenna. En la Figura 29 se observa un sistema MIMO de $M \times N$.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

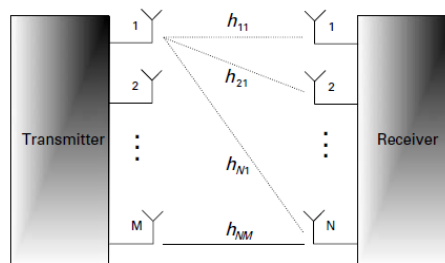


Figura 29: Sistema MIMO $M \times N$. **Fuente:** F. Khan (2009)

2.4.5 Modulación y Codificación

Esquemas de Modulación

Los esquemas de modulación usados en LTE (R8) incluyen QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*, 16QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*, 64QAM, en la Figura 30 se observan los diagramas de constelación de estas tres modulaciones.

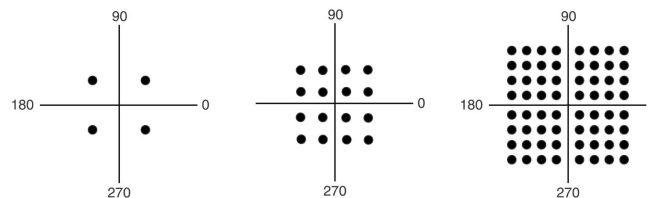


Figura 30: Diagramas de Constelación de QPSK, 16 QAM y 64 QAM. **Fuente:** Myung (2008)

La ventaja de usar diferentes esquemas de modulación se observa al momento de realizar la modulación adaptativa basada en las condiciones de canal, cuando el canal es relativamente limpio se usa 64QAM lo cual incrementa la tasa de transmisión, mientras que si el canal tiene más señales que interfieran se usa QPSK que es más robusta a las interferencias debido a separación entre símbolos que esta tiene. Para el mapeamiento de los datos binarios se usan tablas las cuales están indicadas en (*ETSI TS 136.211*, 2010).

Aleatorización a Nivel de Bit

En el procesamiento del *Downlink* la palabra de código es generada con la salida de la codificación de canal, estos bits son aleatorizados por una secuencia (diferentes secuencias son usadas para las distintas celdas), de esta manera se evita la interferencia entre las mismas, para lograr esto los bits son tratados para que tengan la identidad de celda mediante generadores de secuencias lo cual es aplicado a los canales de transporte y a los canales de control.

La Aleatorización esta compuesta de dos partes: Generación de Secuencia Pseudo Randómica y multiplicación a nivel de bits, la primera es generada por una *Gold Sequence* con una longitud de 31. La secuencia de salida esta definida como un operación específica entre dos secuencias que están dadas por los polinomios indicados en la Ecuación 2.5. Para la segunda secuencia los datos dependerán de la Identidad de la Celda, el número de palabras de código y el índice de subtrama. Y para la multiplicación se implementa una OR exclusiva entre los bits que ingresan con la *Gold Sequence*

$$p_1(x) = x^{31} + x^3 + 1 \quad p_2(x) = x^{31} + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (2.5)$$

Para el receptor las operaciones son las inversas, se usa la misma secuencia Pseudo

Randómica pero la desaleatorización se puede realizar de dos maneras, ya sea por *Hard Decision* o por *Soft Decision* en la cual, la entrada no son bits sino LLR's (*Log Likelihood Ratios*).

Codificación de Canal

La codificación de canal es el conjunto entre el procesamiento de los canales de Transporte con modulación y aleatorización, además de esto se adjunta los códigos correctores de errores basados en Códigos Turbo y un mecanismo de detección, siendo este el de CRC. La mayoría de canales Físicos usan Códigos Turbo a excepción del BCH el cual se basa en Códigos Convolutivos.

La Codificación Turbo es la base de la Codificación de Canal en LTE (R8), siendo este usado en otros sistemas de comunicaciones inalámbricas debido a su robustez.

Códigos Turbo

Los Códigos Turbo son algoritmos los cuales realizan una concatenación convolutiva de datos, en otras palabras son dos codificadores convencionales en paralelo separados por un entrelazador, este tipo de código fue seleccionado debido a que para la decodificación si se realizan un número de iteraciones tienes mejor rendimiento que los clásicos (Narayanan & Stuber, 1997).

LTE usa una tasa de codificación de $1/3$, el codificador se basa en la concatenación en paralelo de codificadores de 8 estados separados por un entrelazador interno, la salida de este se compone de tres flujos, el primero son bits sistemáticos, los dos siguientes son conocidos como flujos de Paridad 1 y Paridad 2, cada codificador tiene sus bits de cola con los cual si llamamos K a la salida de este proceso tendremos un vector de longitud $K+4$, todas las salidas son multiplexadas. En la Figura 31 se observa en diagrama de bloques de un Codificador Turbo.

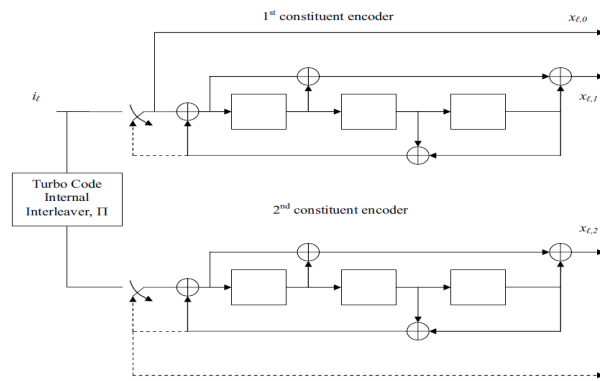


Figura 31: Diagrama de Bloques de un Codificador Turbo. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

La estructura de Trellis que se usa en los codificadores esta basada en un esquema Permutación Cuadrática Polinomial (QPP) como se observa en la Figura 32, con la cual se tiene que la relación entre los índices de salida con los de entrada esta dado con la Ecuación 2.6, en donde K es el tamaños del bloque de entrada, f_1 y f_2 son constantes que dependen de K. El tamaño mínimo de es de 40 y el máximo es de 6144.

$$p(i) = (f_1 * i + f * i^2) \text{mod}(k) \tag{2.6}$$

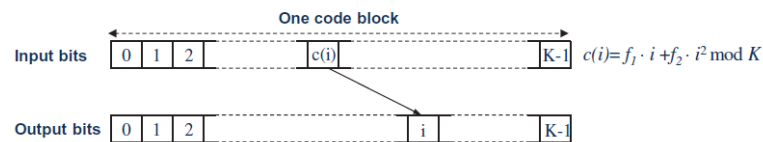


Figura 32: Principio de QPP basado en entrelazamiento. **Fuente:** Erik Dahlman (2011)

Los polinomios que describen el codificador se muestran en la Ecuación: 2.7.

$$G_0(z) = 1 + z^{-2} + z^{-3} \quad G_1(z) = 1 + z^{-1} + z^{-3} \tag{2.7}$$

Decodificador Turbo

En el lado del receptor el decodificador turbo invierte las operaciones realizadas por el codificador, este esta basado en dos decodificadores de tipo *A Posteriori Prob-*

ability (APP) y dos entrelazadores en un lazo con retro-alimentación, se usa la misma estructura de Trellis con la diferencia de que es una operación iterativa, la complejidad computacional dependerá únicamente de el número de iteraciones. En la Figura 33 se puede observar el diagrama de bloques del Decodificador Turbo.

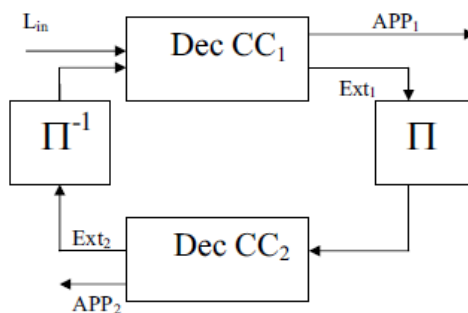


Figura 33: Diagrama de Bloques de un Decodificador Turbo. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

Mecanismo de Terminación Temprana

El número de iteraciones realizadas por el decodificador turbo es una de sus principales características, pero implementarlo significa una carga computacional muy alta, es por eso que se usa el mecanismo de terminación temprana, con el cual añadiendo el CRC en el decodificador se puede detectar la presencia de bits erróneos en cada iteración, con esto evitamos este alto procesamiento, en tal caso que hubiesen se realizará una retransmisión de los datos.

Adaptación de Velocidad

La adaptación de velocidad es una característica importante en LTE, esta ayuda a incrementar la tasa de transmisión basándose en las condiciones del canal, en canales de baja interferencia se puede codificar con tasas cerca a la unidad, mientras que en canales con alta interferencia se puede reducir la tasa con el fin de mitigar los errores.

En la codificación de canal se empieza con la tasa de 1/3 y se usa la adaptación

de velocidad para llegar a la tasa deseada, para una tasa menor a 1/3 se repiten los bits codificados, y para una tasa mayor se remueven bits mediante métodos de intercalado, estos se basan en preservar la distancia de Hamming. La adaptación de velocidad se compone de:

- Intercalado entre sub-bloques.
- Entrelazado de bits de paridad.
- *Bit Pruning*.
- Selección de bit basado en la tasa y transmisión.

Segmentación en Códigos de Bloques

En LTE el bloque de transporte se conecta a la capa física y MAC, este bloque contiene una gran cantidad de datos que son transmitidos al mismo tiempo, la codificación de canal es una de las primeras operaciones que se le realizan a cada uno, si la trama de entrada excede el tamaño máximo el bloque de transporte es dividido a bloques mas pequeños conocidos como bloques de código (*Codeblocks*). Al final a cada bloque de código se le aplica el CRC, codificación turbo y adaptación de velocidad. En la Figura 34 se observa el proceso para la inserción del CRC.

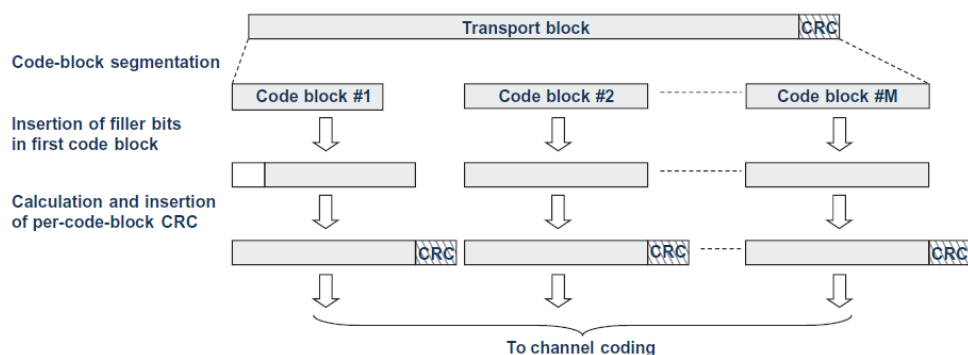


Figura 34: Segmentación de Bloques de Código. **Fuente:** Erik Dahlman (2011)

Procesamiento del Canal de Transporte

Para el procesamiento del canal de transporte se necesitan cinco componentes fundamentales que son:

- Concatenación del CRC.
- Segmentación de Bloques de Código y concatenación del CRC específico.
- Codificación Turbo basada en tasa 1/3.
- Adaptación de velocidad para gestionar cual tasa de codificación.
- Concatenación de Bloques de Código.

Estos componentes se muestran en la Figura 35, en donde al final del procesamiento se tendrá la salida para que sea procesada en la malla de recursos de LTE y posterior modulación con OFDM.

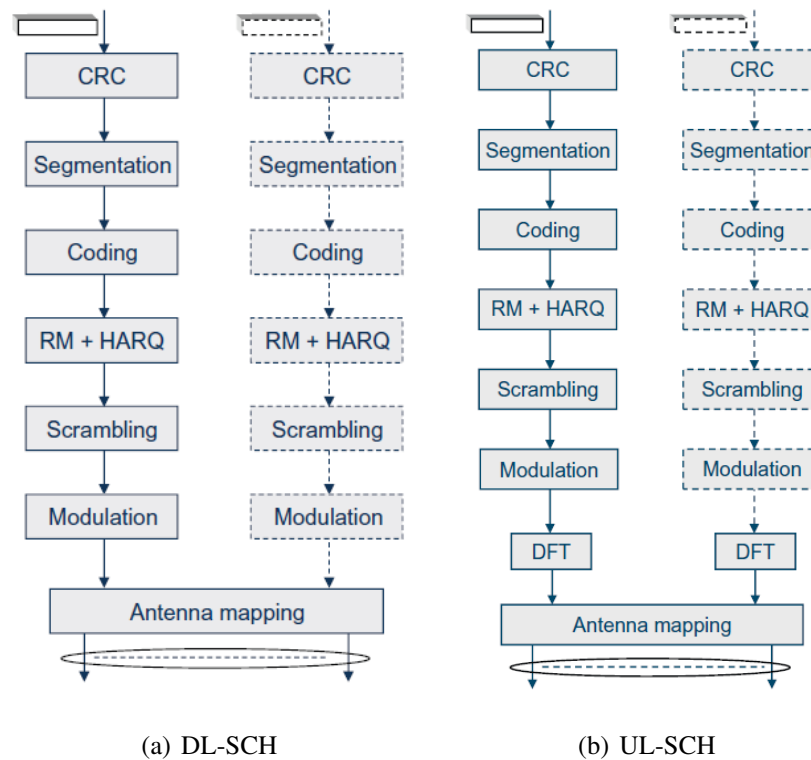


Figura 35: Procesamiento del Canal de Transporte **Fuente:** Erik Dahlman (2011)

2.4.6 Malla de Recursos

La malla de recursos es en esencia una matriz cuyos elementos están modulados en símbolos, en una representación en 2 Dimensiones se tiene que en el eje Y las subportadoras alineadas en frecuencia mientras que en el eje X están los símbolos OFDM alineados en el tiempo, en cada ranura de tiempo de 0.5ms se encuentran 7 símbolos, lo que da un total de 14 por cada subtrama.

Básicamente existen tres tipos de señales en la malla de recursos, estos son: Información del usuario, Señales específicas de referencia de celda e Información de control, como se puede observar en la Figura 36, se tiene 14 símbolos en cada subtrama de 1ms, las señales de referencia son colocadas de manera específica en cada elemento del bloque de recurso RB, de igual forma la información de control siempre se encontrará al inicio de la subtrama.

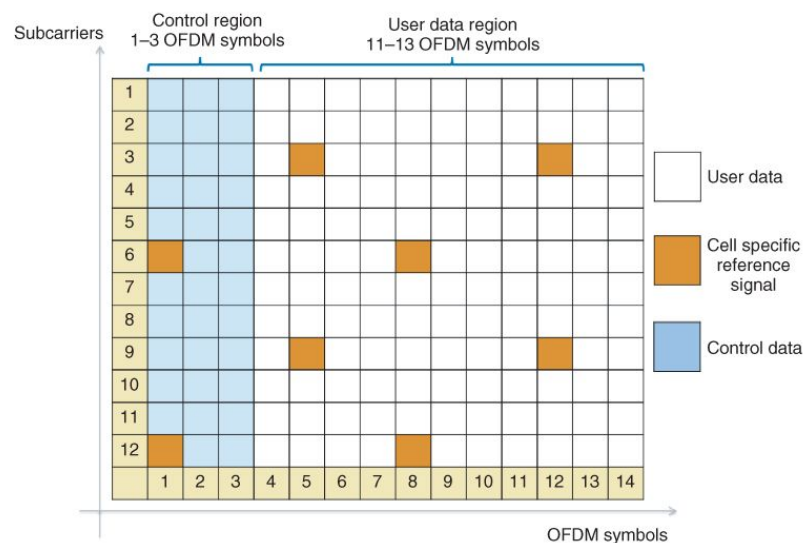


Figura 36: Malla de Recurso, una subtrama. **Fuente:** Understanding LTE with MATLAB (2014)

En la Figura 37 se observa la malla de recursos completa con todos los tipos de señales que la conforman, estas señales tienen una posición específica la cual se indica

a continuación:

- Todos las subtramas contienen:
 - Información de usuario, PDSCH.
 - Señales de Referencia Comunes, CSR's.
 - Información de Control, PDCCH.
- Subtramas 0 y 5 contienen:
 - Señales primarias de sincronismo, PSS.
 - Señales secundarias de sincronismo, SSS.
 - Subtrama 0: PBCH.

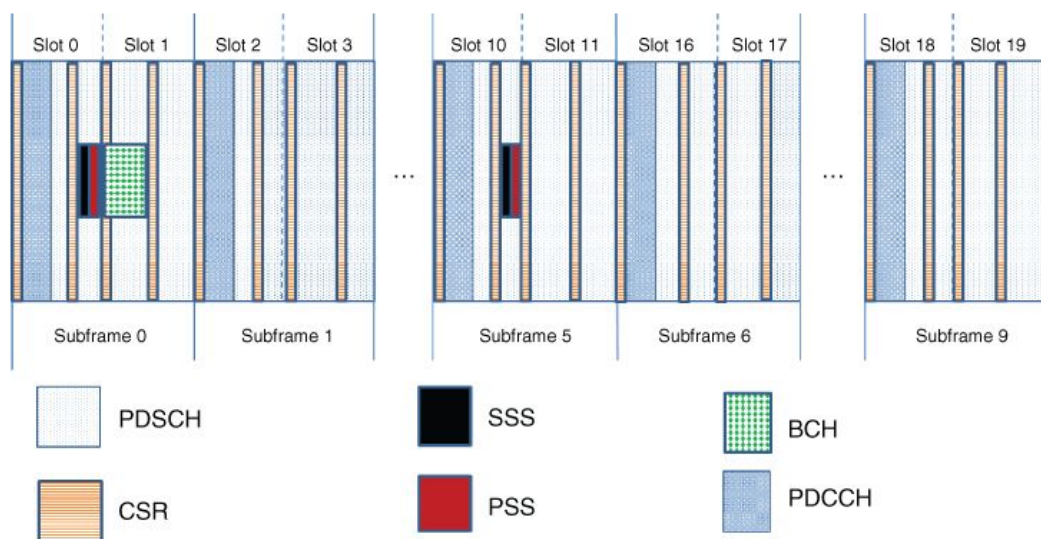


Figura 37: Malla de Recurso Completa. **Fuente:** Understanding LTE with MATLAB (2014)

El número total de símbolos viene dado por la Ecuación 2.8 en donde N_{rb} es el número de bloques de recurso en la malla de recursos, N_{SC} número de subportadoras

en los bloques de recurso, N_{simbolos} número de símbolos por ranura y N_{ranuras} número de ranuras por subtrama.

$$N_{\text{total}} = N_{\text{rb}} \cdot N_{\text{SC}} \times N_{\text{simbolos}} \cdot N_{\text{ranuras}} \quad (2.8)$$

El número de ranuras por subtrama N_{ranuras} es un valor constante de 2 , el número de símbolos por ranura N_{simbolos} depende CP utilizado , el determinado es de 7. El número de subportadoras por bloque de recurso N_{SC} depende también del CP si se usa el normal es de 12. Siendo así que la malla completa depende únicamente de los bloques de recurso, los cuales están directamente relacionados con el ancho de banda usado. En la Tabla 5 se exponen las características fundamentales de los parámetros de la capa física de LTE.

Tabla 5: Parámetros de la Capa Física de LTE (R8). **Fuente:** Innovations (2010)

| | | | | | | |
|--|---|------|------|-------|-------|-------|
| Ancho de Banda [MHz] | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Trama [ms] | 10 | | | | | |
| Subtrama [ms] | 5 | | | | | |
| Δf [kHz] | 15 | | | | | |
| F. de Muestreo [MHz] | 1.92 | 3.84 | 7.68 | 15.36 | 23.04 | 30.72 |
| Tamaño de la FFT | 128 | 256 | 512 | 1024 | 1536 | 2048 |
| SP Ocupadas | 75 | 150 | 300 | 600 | 900 | 1200 |
| SP No Ocupadas | 53 | 106 | 212 | 424 | 636 | 848 |
| Número de RB's | 6 | 12 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| AB Ocupado [MHz] | 1.08 | 2.7 | 4.5 | 9 | 13.5 | 18 |
| AB de Guarda [MHz] | 0.32 | 0.3 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
| Eficiencia del AB | 72% | 90% | 90% | 90% | 90% | 90% |
| Throughput Teórico [Mbps] | | | | | | |
| Símbolos OFDM/Subtrama | 7/6 (short/long CP) | | | | | |
| CP (Normal) [μs] | 5.2 (Primer Símbolo) / 4.69 (Seis Símbolos) | | | | | |
| CP (Extendido) [μs] | 16.67 | | | | | |

Señales de Referencia

Las señales de referencia son usadas para realizar una estimación del canal, éstas especifican cuantas antenas se están usando en una celda, la identidad de la celda, el índice de subtrama y el índice del símbolo OFDM que contienen las CSR. La forma de posicionar estas señales en la malla de recursos es específica como se observa en la Figura 38, en donde debe existir una señal cada seis subportadoras, así mismo el espaciamiento entre dos señales es de 45 kHz, todo esto para el caso de una sola antena.

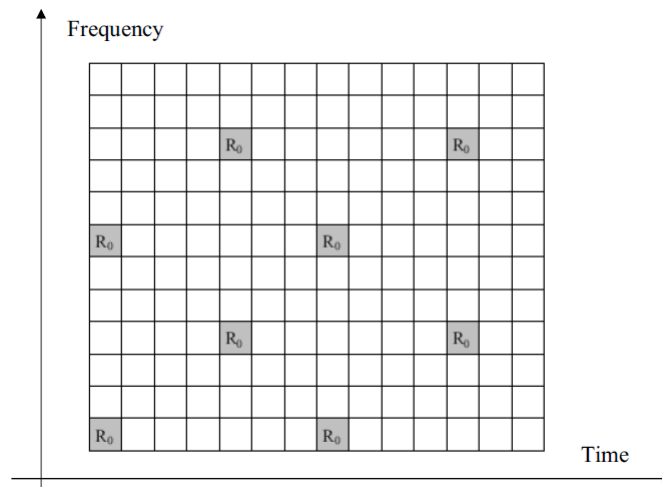


Figura 38: Arreglo de los símbolos CSR en una subtrama. **Fuente:** Stefania Sesia (2009)

Para las señales de referencia de múltiples antenas lo que se hace es añadir señales nulas en cada puerto de la antena para que de esta manera cada señal transmitida sea diferenciada por el UE al momento de recibir información. Como un resumen de las configuraciones para diferente número de antenas se observa la Figura 39.

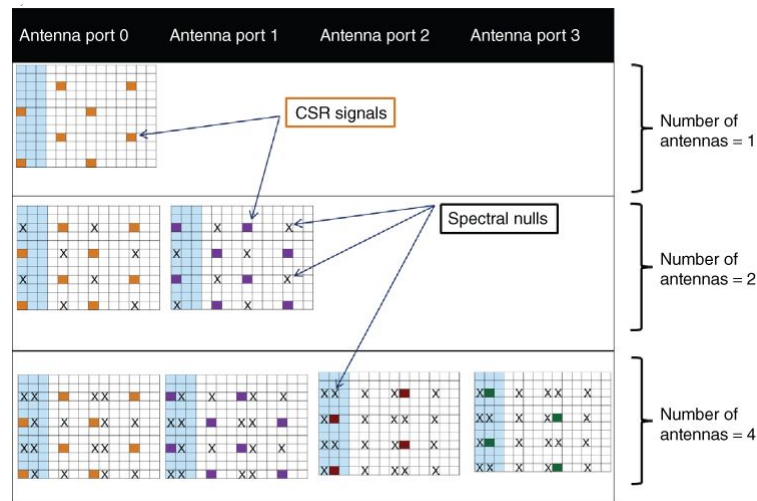


Figura 39: Arreglo de los símbolos CSR para diferentes números de antenas. **Fuente:**

Understanding LTE with MATLAB (2014)

2.4.7 Modelamiento de Canal

El modelamiento de canal es una representación matemática de la relación entre la potencia transmitida y la recibida en una comunicación inalámbrica, este describe los efectos del canal sobre la señal transmitida. El desvanecimiento en el canal es la variación de la potencia durante la propagación de la señal en tiempo y frecuencia, en donde se modifica la amplitud y la fase. Este desvanecimiento ocurre por la distancia, obstáculos, movimiento del transmisor o receptor y por múltiples trayectos. (S. Khan, 2011)

El objetivo del modelamiento de canal es poner a prueba el rendimiento del sistema de comunicaciones, existen diferentes tipos, pero para esta tesis se toman en cuenta :

- Canal con Desvanecimiento Plano
 - Se produce cuando el ancho de banda de la señal es menor al ancho de banda de coherencia del canal, como se observa en la Figura 40.
 - Se presenta bajo condiciones de niebla o aire extremadamente frío.

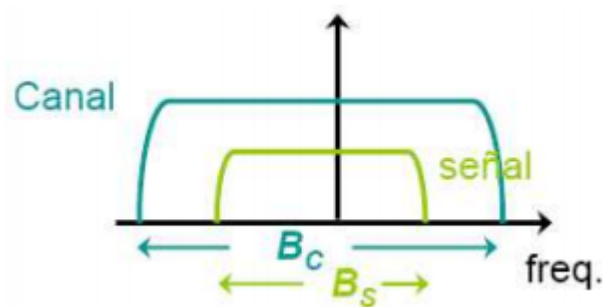


Figura 40: Ancho de Banda de la señal Vs. Ancho de banda del canal. **Fuente:**

Arias (2009)

- Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia

- Se produce cuando el ancho de banda de la señal es mayor al ancho de banda de coherencia del canal, como se observa en la Figura 41.
- Causado por la interferencia de rayos de la atmósfera.

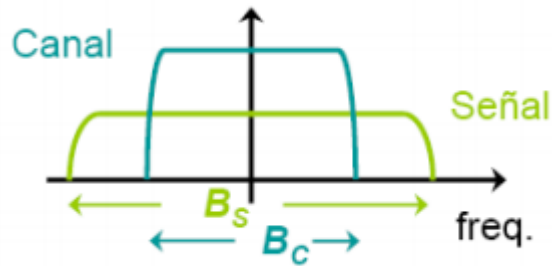


Figura 41: Ancho de Banda de la señal Vs. Ancho de banda del canal. **Fuente:**
Arias (2009)

- Canal EPA - *Extended Pedestrian A*
 - Modelo semi-empírico para simular condiciones de velocidades de peatones.
 - Entorno de propagación de bajo retardo.
- Canal EVA - *Extended Vehicular A*
 - Modelo semi-empírico para simular condiciones de velocidades de automóviles.
 - Entorno de propagación de alto retardo.

Estimación de Canal

La estimación de canal es realizada para examinar las señales de referencia las cuales son insertadas en la malla de recursos, con las cuales el receptor puede tener la información de la celda, el ancho de banda usado, entre otros parámetros (Van de Beek, Edfors, Sandell, Wilson, & Ola Borjesson, 1995).

2.4.8 Ecuación

La Ecuación sirve fundamentalmente para mitigar la degradación de la señal por Interferencia Intersimbólica (ISI) (Rappaport et al., 1996), existen diferentes tipos de ecualizadores los cuales son listados a continuación:

- *ZFE - Zero Forcing Equalizer*
 - Este tipo de ecualizador lo que hace es forzar a cero el ISI pero no realiza ningun tratamiento sobre el ruido del canal, con lo cual se tiene un rendimiento inferior al ecualizador MMSE. (John R. Barry, 2003)

- *MMSE - Minimum Mean Square Error*
 - Es un filtro lineal el cual tiene como objetivo minimizar la varianza entre la diferencia de la información transmitida y la señal que sale del ecualizador, además de suprimir el ruido lo cual no hacia el ecualizador ZF, este es efectivo para un desvanecimiento de canal con frecuencia selectiva (Klein, Kaleh, & Baier, 1996).

2.4.9 Modos de Transmisión

En LTE (R8) los modos de transmisión dependen directamente de MIMO existen 7 modos los cuales son descritos en la Tabla 6.

Tabla 6: Modos de Transmisión de LTE (R8). **Fuente:** Rohde and Schwarz (Febrero 2014)

| Modo | Descripción | No. Antenas |
|-------------|---|--------------------|
| 1 | Transmisión con una Sola Antena | 1 |
| 2 | Diversidad de Transmisión | 2 a 4 |
| 3 | Multiplexación Espacial en Lazo Abierto | 2 a 4 |
| 4 | Multiplexación Espacial en Lazo Cerrado | 2 a 4 |
| 5 | MIMO Multi - Usuario | 2 a 4 |
| 6 | Multiplexación Espacial usando una sola capa de transmisión | 2 a 4 |
| 7 | Formación de Haz (<i>Beamforming</i>) | 1 |

En esta tesis se toman en cuenta los modos de transmisión 1,2,3 y 4, los cuales se explican a continuación.

Modo De Transmisión 1 (Transmisión con una Sola Antena)

Utiliza una sola antena para realizar la transmisión de información.

Modo De Transmisión 2 (Diversidad de Transmisión)

Este modo es el predeterminado, envía la misma información por una o varias antenas en donde cada flujo usa diferente codificación y recursos de frecuencia, esto mejora la señal transmitida lo cual hace que la transmisión sea más robusta y provee un mayor *Throughput*, (Rohde & Schwarz, Febrero 2014).

Modo De Transmisión 3 (Multiplexación Espacial en Lazo Abierto)

El objetivo de este modo es mejorar la tasa de transmisión mediante la Multiplexación Espacial de 2 a 4 capas en las antenas respectivamente, en la Figura 42 se observa un ejemplo para 2 antenas, (Rohde & Schwarz, Febrero 2014).

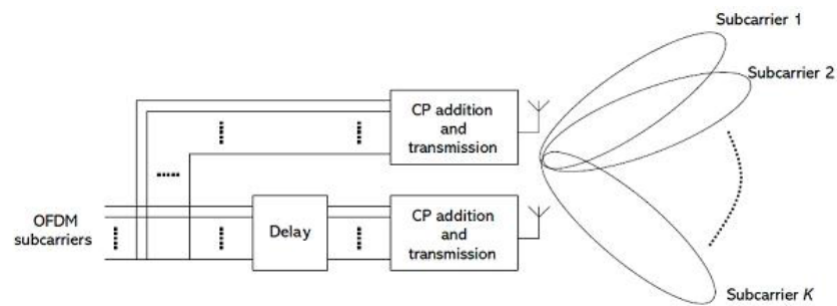


Figura 42: Modo de Transmisión 3 con 2 Antenas. **Fuente:** Rohde and Schwarz (Febrero 2014)

Modo De Transmisión 4 (Multiplexación Espacial en Lazo Cerrado)

Funciona de la misma manera que el modo de transmisión 3, pero este permite que el UE envíe la información acerca de la calidad del canal incluyendo el tipo de precodificación del *codebook*, la cual es una tabla definida tanto en el Tx como en el Rx, más información se puede encontrar en : (ETSI TS 136.211, 2010). En la Figura 43 se observa un ejemplo para dos flujos de datos y un solo usuario final.

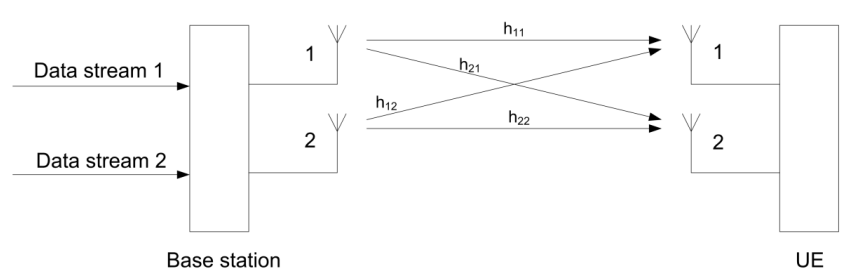


Figura 43: Modo de Transmisión 4 con 2 Antenas para un solo Usuario. **Fuente:** (Rohde & Schwarz, Febrero 2014)

2.4.10 Adaptación de Enlace

La adaptación de enlace permite cambiar ciertos parámetros de transmisión dependiendo de la condición de canal, los cambios que se pueden realizar están radicados en el Ancho de Banda, Modo de Transmisión, número de capas, matriz de precodi-

ficación, esquemas de modulación y codificación, potencia de transmisión. Mediante el cambio de estos se puede incrementar la tasa de transmisión. (Understanding LTE with MATLAB, 2014).

En el receptor se hacen mediciones las cuales permiten indicar los cambios que se deben realizar mediante indicadores como el Indicador de Calidad del Canal - CQI, Indicador de Precodificación de la Matriz - PMI o un Indicador de Rango - RI.

CQI

La medición del CQI permite especificar la mejor constelación para la modulación y tasa de codificación dependiendo de la calidad del enlace, todo esto mediante el Rango de la Interferencia de la Señal mas el Ruido - SINR, la tabla que indica la variación de parámetros según el CQI se puede consultar en (Understanding LTE with MATLAB, 2014).

2.5 Especificaciones del Modelo del Enlace de Bajada - *Downlink*

La cadena de operaciones para el procesamiento de señales en el transmisor se resume como la combinación del bloque de transporte y el procesamiento del canal física, este consiste en el tratamiento del DLSCH y el PDSCH, y puede ser resumido de la siguiente manera:

1. Generación de Información
2. Generación de CRC y Concatenación
3. Codificación de Canal
4. Aleatorización de Bits (*Scrambling*)

5. Modulaci3n
6. Elecci3n del Modo de Transmisi3n
7. Generaci3n de Se~aales Espec~ficas de Referencia CSR
8. Mapeamiento de las Se~aales en la Malla de Recursos
9. Modulaci3n en S~mbolos OFDM

Cada uno de los componentes listados se han revisado a lo largo del presente cap~tulo, el diagrama de bloques total se puede observar en la Figura 44, en la cual se incluye el bloque para la adaptaci3n con el equipo de RF USRP N210 el cual ser~a descrito en el Cap~tulo 3.

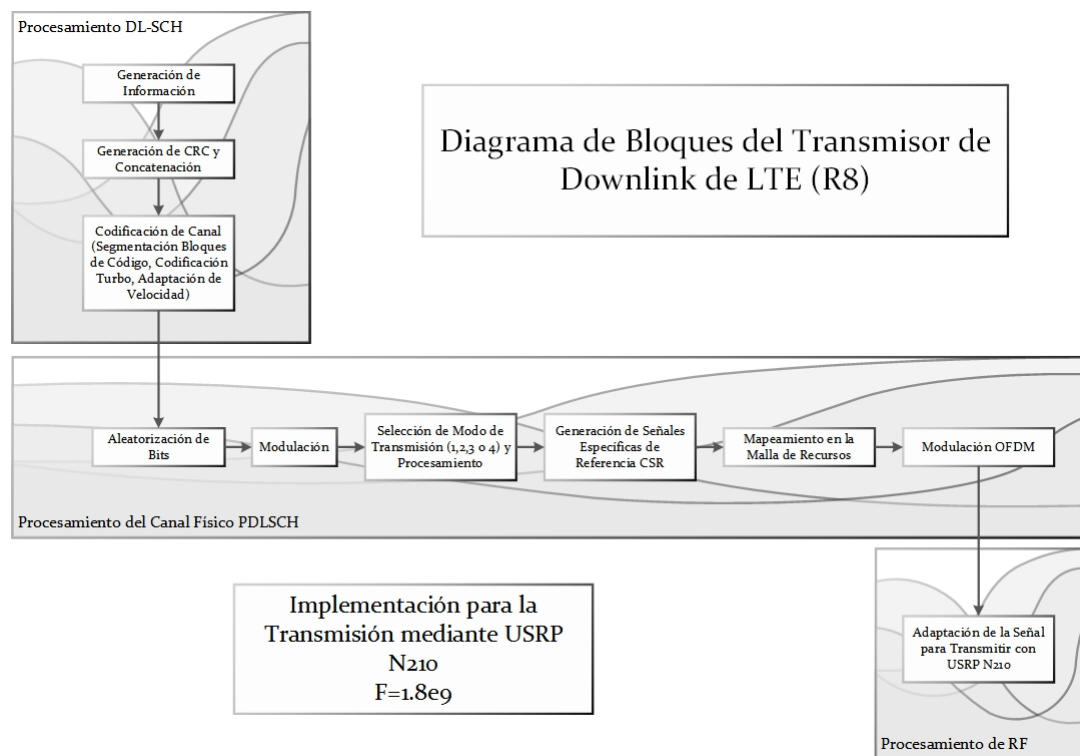


Figura 44: Modelo de transmisi3n del enlace de bajada - (Downlink). **Elaborado por:** John Madrigal

2.6 Especificaciones del Modelo del Enlace de Subida - *Uplink*

Para este modelo se tiene un procesamiento similar al del Downlink, con diferencias que ya se revisaron como es el uso de SC-FDM, los datos a transmitirse se consiguen aplicando los siguientes pasos:

1. Generación de Información
2. Generación y Concatenación del CRC
3. Codificación de Canal
4. Aleatorización de Bits
5. Modulación
6. DFT y Pre-codificación
7. Mapeamiento de las Señales en la Malla de Recursos
8. Modulación en Símbolos OFDM

La salida de la modulación en símbolos OFDM se ira a un bloque de Transmisión mediante el equipo USRP N210.

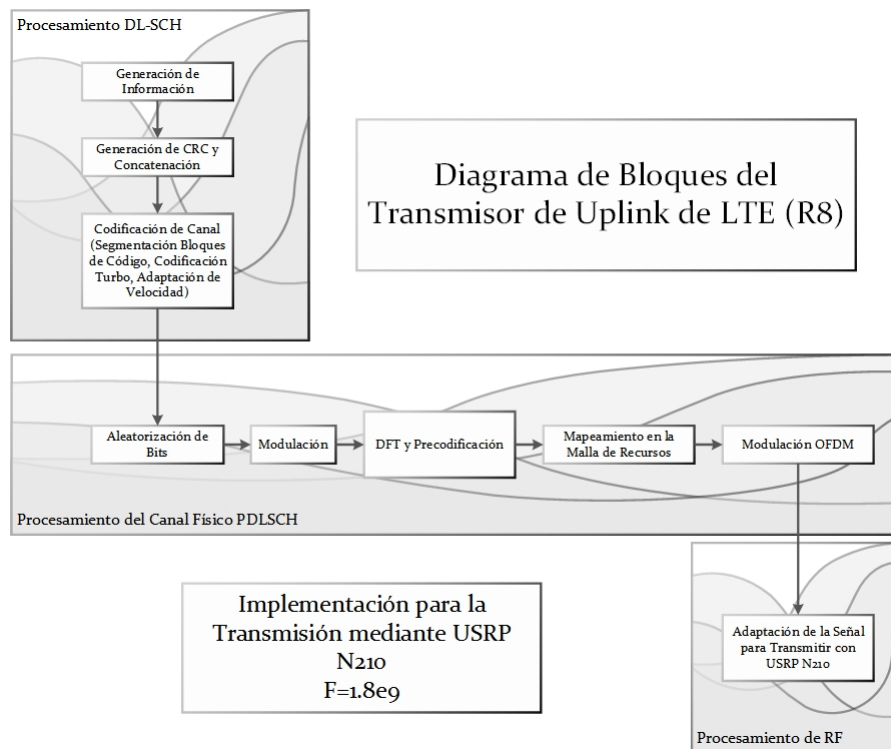


Figura 45: Modelo de transmisión del enlace de subida - (*Uplink*). **Elaborado por:** John Madrigal

CAPÍTULO 3

HARDWARE Y SOFTWARE

3.1 MATLAB/SIMULINK

3.1.1 MATLAB

"MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para cálculo numérico, visualización y programación." (MATLAB Primer R2014a, 2014). Este software permite realizar simulaciones mediante el uso de funciones embebidas o a su vez con la programación de algoritmos (*Scripts*) los cuales permiten manejar datos numéricos con vectores, matrices y estructuras. Otra de las características es la visualización de los datos mediante una variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.

Gracias a las funciones y posibilidades que ofrecen MATLAB se pueden realizar simulaciones, las cuales tengan como finalidad un estudio y entendimiento más claro de señales típicas de sistemas de telecomunicaciones, como se lo realiza en este Trabajo. En el presente trabajo se hace uso de MATLAB R2014a.

3.1.2 Simulink

"Simulink es un entorno de diagramas de bloques para la simulación multidominio y diseño basado en modelos. Es compatible con la simulación, generación automática de código, prueba continua y verificación de sistemas embebidos." (Simulink, 2014).

Este software ofrece un entorno gráfico con librerías personalizables y soluciones para el modelado de sistemas dinámicos, tiene un nivel de abstracción más alto que MATLAB pero a su vez permite integrar algoritmos realizados en este para el modelamiento, los resultados obtenidos pueden ser exportados a MATLAB para un análisis más completo.

Toolbox

Los *Toolbox* son un compendio de modelos matemáticos los cuales han sido incorporados en MATLAB, estos pueden ser directamente usados en Simulink o en MATLAB como objetos del sistema (*System Objects*), para el desarrollo del presente trabajo se ha hecho uso de ciertos Toolbox los cuales se listan a continuación:

- Communication System Toolbox
- DSP System Toolbox
- LTE System Toolbox
- USRP Support Package from Communications System Toolbox

Objetos del Sistema - *System Objects*

Los objetos del sistema se crean a partir de las librerías o toolbox de Simulink, estos se pueden usar como funciones las cuales permitan su uso en MATLAB, a continuación se observa cómo se debe inicializar un modulador QPSK:

```
ModuladorQPSK = comm.QPSKModulator('BitInput',true);
```

De esta manera se podrá utilizar el objeto del sistema para un *script* en MATLAB, en si la inicialización consta de cuatro partes fundamentales que son:

1. **Variable.** Es en donde se almacena el objeto. Ej. **ModuladorQPSK**.
2. **Tipo de Toolbox.** Abreviación del *Toolbox*. Ej. **comm**
3. **Objeto del Toolbox.** Función que se usará. Ej. **QPSKModulator**
4. **Parámetros.** Características del Sistema. Ej. **'Bit Input', true**

3.2 USRP - N210

Un USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) es un radio reprogramable o reconfigurable con el cual mediante el mismo hardware se pueden realizar diferentes sistemas de comunicaciones los cuales estén basados netamente en software siendo este el concepto fundamental de Radio Definido por Software - SDR. Este dispositivo tiene escalabilidad y flexibilidad, entre las características que se pueden modificar están: frecuencia, ancho de banda, esquemas de modulación y codificación, recursos de radio, gestión de movilidad y aplicaciones de usuario. Un sistema SDR está compuesto por 3 etapas: Radio Frecuencia - RF, Frecuencia Intermedia - IF y Banda Base como se observa en la Figura 46

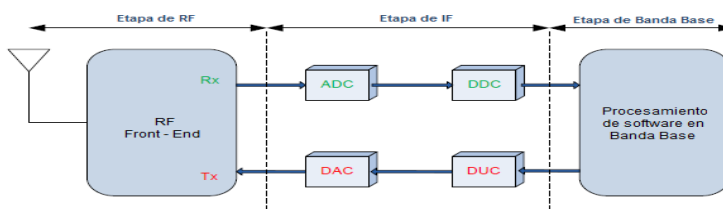


Figura 46: Esquema de un sistema SDR. **Fuente:** Alexander Galvis (2014)

En el desarrollo del presente trabajo se ha elegido el dispositivo *USRP-N210*, que se observa en la Figura 47 el cual es parte de la familia de productos *USRP* desarrollados por la empresa *Ettus Research*. La selección de este dispositivo viene principalmente dado por la necesidad del diseño e implementación de un Transmisor de LTE (R8) y adicionalmente este dispositivo puede funcionar con Simulink mediante la instalación de un paquete adicional. El USRP N210 reúne las características detalladas en la Tabla 7.



Figura 47: Dispositivo USRP-N210. **Fuente:** Research (2014d)

Tabla 7: Especificaciones Técnicas USRP-N210. **Fuente:** Research (2014c)

| Elemento | Característica |
|----------------------------|----------------------------|
| Serie FPGA | Spartan 3A DSP |
| ADC Frecuencia de Muestreo | 100 [MS/s] |
| ADC Resolución | 14 bits |
| ADC Ancho de Banda SFDR | 88 dBc |
| DAC Frecuencia de Muestreo | 400 [MS/s] |
| DAC Resolución | 16 bits |
| DAC Ancho de Banda SFDR | 80 dBc |
| Frecuencia de Trabajo | DC - 6 GHz |
| Software Compatible | GNU Radio/Simulink/LabVIEW |
| Puerto de Red | Gigabit Ethernet |
| Puerto de Expansión | MIMO |

El procesamiento en Banda Base se realiza en la computadora conectada al USRP mientras que la etapa de frecuencia intermedia se encarga el equipo USRP, para la etapa de Radio Frecuencia se usan tarjetas hijas o *Daughterboards* las cuales se detallan en la siguiente sección. Para mayor información sobre SDR y el USRP-N210 puede revisar: (Naranjo, 2013; Research, 2014d).

3.3 Daughterboard

Un USRP es modular lo que quiere que decir que se puede cambiar el hardware para los requerimientos del usuario, esto se realiza mediante las *Daughterboard*, estas tarjetas se encargan del procesamiento para la etapa de RF, la compañía Ettus Research ofrece una gran variedad.

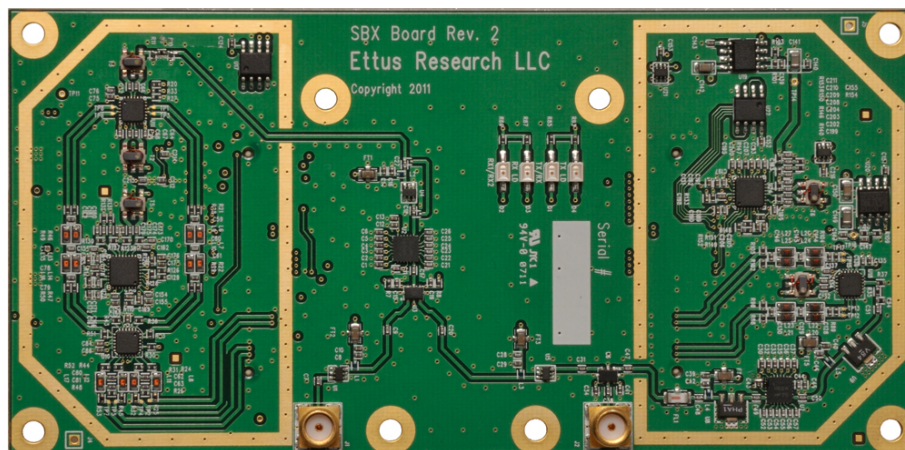


Figura 48: *Daughterboard* SBX. **Fuente:** Research (2014a)

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado la tarjeta SBX 400-4400 MHz Rx/Tx (40MHz) la cual trabaja desde los 400 MHz a los 4400 MHz, en esta se puede realizar tanto transmisión como recepción ya que posee dos puertos SMA como se observa en la Figura 48, las características técnicas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Especificaciones *Daughterboard* SBX. **Fuente:** Research (2014b)

| Elemento | Característica |
|-------------------------------|-----------------------|
| Banda de Frecuencia | 400 - 4400 MHz |
| Potencia de Salida | 100mW |
| Figura de Ruido | 8dB |
| Ancho de Banda | 40 MHz |
| Especificaciones de Canal | 1 Tx IQ, 1 Rx IQ, FD |
| Oscilador Local Independiente | Sí |
| Capacidad MIMO | Sí |
| Puertos | TX/RX y RX2 |

La selección de la tarjeta se ha realizado verificando los requerimientos del presente trabajo, ya que esta tarjeta trabaja en frecuencias que pueden cubrir ciertas bandas de AWS. De igual manera que se ha seleccionado esta tarjeta se debe seleccionar la antena que cumpla con los requisitos, la cual se encuentra en la siguiente sección. Más información sobre la daughterboard se puede encontrar en: (Research, 2014a)

3.4 Antena

Para la transmisión en la frecuencia de 2120 MHz se ha escogido la antena VERT900, como se muestra en la Figura 49, la cual es distribuida por *Ettus Research*, es una antena omnidireccional la cual se conecta a la Daughterboard SBX al puerto TX/RX. Las características de la antena se encuentra en la Tabla 9.

Figura 49: Antena Vert 900. **Fuente:** Research (2014e)

Tabla 9: Especificaciones Antena VERT900. **Fuente:** Research (2014e)

| Elemento | Característica |
|-----------------------|---------------------------|
| Frecuencia de Trabajo | 824-960MHz / 1710-2200MHz |
| Ganancia | 3dBi |
| Tipo | Omnidireccional |

Para la conexión entre la computadora en donde se ejecutará el transmisor, se necesita conectar un cable de red directamente con el equipo USRP N210 y se tendrá que realizar la instalación del *USRP Support Package from Communication System Toolbox* de MATLAB el cual permitirá la comunicación con el equipo, como requisito adicional para la conexión se necesita Visual Studio 2010/2013 el cual en su versión de prueba se encuentra disponible en (*Visual Studio*, 2014).

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE SIMULACIONES

4.1 Introducción

Para el desarrollo de las simulaciones se ha realizado una interfaz amigable al usuario, para lo cual se ha hecho uso de un GUI - *Graphical User Interface* el cual abarque todas las simulaciones a ser desarrolladas, a esta se le ha denominado **LTE Framework**, en la Figura 50 se puede observar la interfaz diseñada.

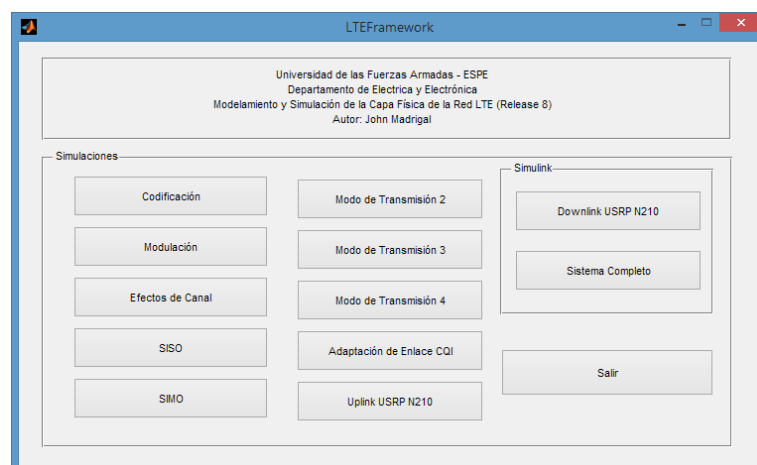


Figura 50: Entorno Gráfico de la Simulación: Framework

Las simulaciones que se podrán realizar mediante este *Framework* son:

- Codificación
- Modos de Transmisión (MIMO)
- Modulación
- Adaptación de enlace : CQI
- Efectos de Canal
- *Downlink* USRP N210
- SISO
- *Uplink* USRP N210 (SC-FDMA)
- SIMO
- Simulación Tx/Rx

En las siguientes secciones se describirán en detalle cada una de las simulaciones.

4.2 Codificación

Para el desarrollo esta simulación se han tomado en cuenta varios tipos de codificación como son: *Viterbi Hard-Decision*, *Viterbi Soft-Decision*, Turbo y además de estas se tomó en cuenta una simulación sin codificación, en estas simulaciones se utilizó la modulación QPSK, en la Figura 51 se observa cuáles son los parámetros configurables.

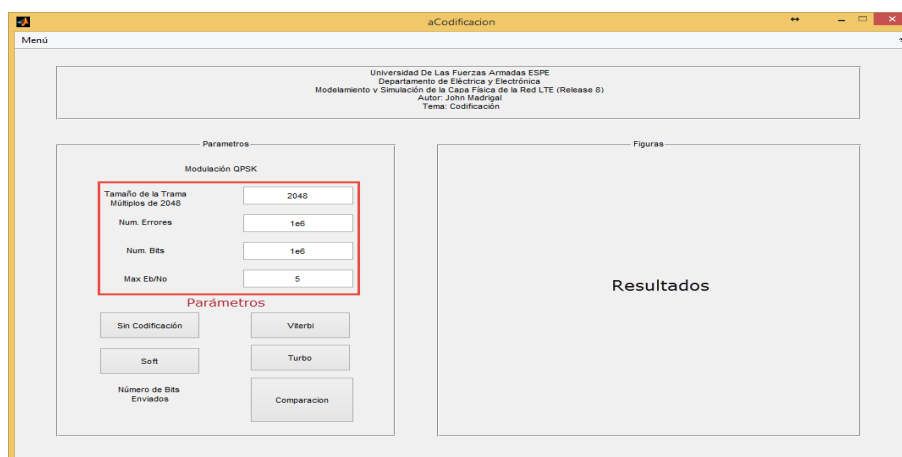


Figura 51: Entorno Gráfico de la Simulación: Codificación

Los valores que se observan son los que la simulación tendrá por defecto, de-

pendiendo de la exactitud que el usuario requiera podrá modificar estos parámetros, siendo el costo, el tiempo de simulación. Para poder observar que codificación tiene un mejor rendimiento se incluyó un botón de Comparación el cual presenta todas las simulaciones ya realizadas y se las observa en la parte derecha de la interfaz gráfica.

4.2.1 Métodos Utilizados

Como se mencionó en el Capítulo 3 existen *Toolbox's* en Matlab los cuales permiten realizar un diseño eficiente y rápido para estructurar las distintas simulaciones, dentro de estos existen objetos de sistema los cuales son configurados por el usuario para ajustarse al tipo de simulación. Para este caso se ha hecho uso del *Toolbox* de Comunicación y de Procesamiento Digital de Señales, siendo los objetos utilizados los indicados en la Tabla 10:

Tabla 10: Objetos del Sistema Utilizados: Codificación.

| Tipo | Nombre | Función |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Comm | <i>QPSK Modulator</i> | Modulación QPSK |
| Comm | <i>QPSK Demodulator</i> | Demodulación QPSK |
| Comm | <i>Bit Error</i> | Cálculo del Bit Error Rate |
| Comm | <i>Convolutional Encoder</i> | Codificación Convolutiva |
| Comm | <i>Viterbi Decoder</i> | Decodificación Viterbi |
| Comm | <i>Turbo Encoder</i> | Codificador Turbo |
| Comm | <i>Turbo Decoder</i> | Decodificador Turbo |
| DSP | <i>Scalar Quantizer Encoder</i> | Codificador y Cuantificador Escalar |

4.2.2 Diagrama de Flujo

En la Figura 52 se observa el diagrama de flujo de la simulación con Viterbi tanto con *Hard-Decision* como con *Soft-Decision*, el cambio radica únicamente en el bloque del decodificador *Viterbi* para el primer caso toma en cuenta distancias mínimas, mientras

que para el segundo se toma en cuenta radios de verosimilitud para tener una decodificación más acertada. En el caso del diagrama de flujo para Turbo lo que cambiaría sería los bloques de Codificación y Decodificación, siendo estos Turbo.

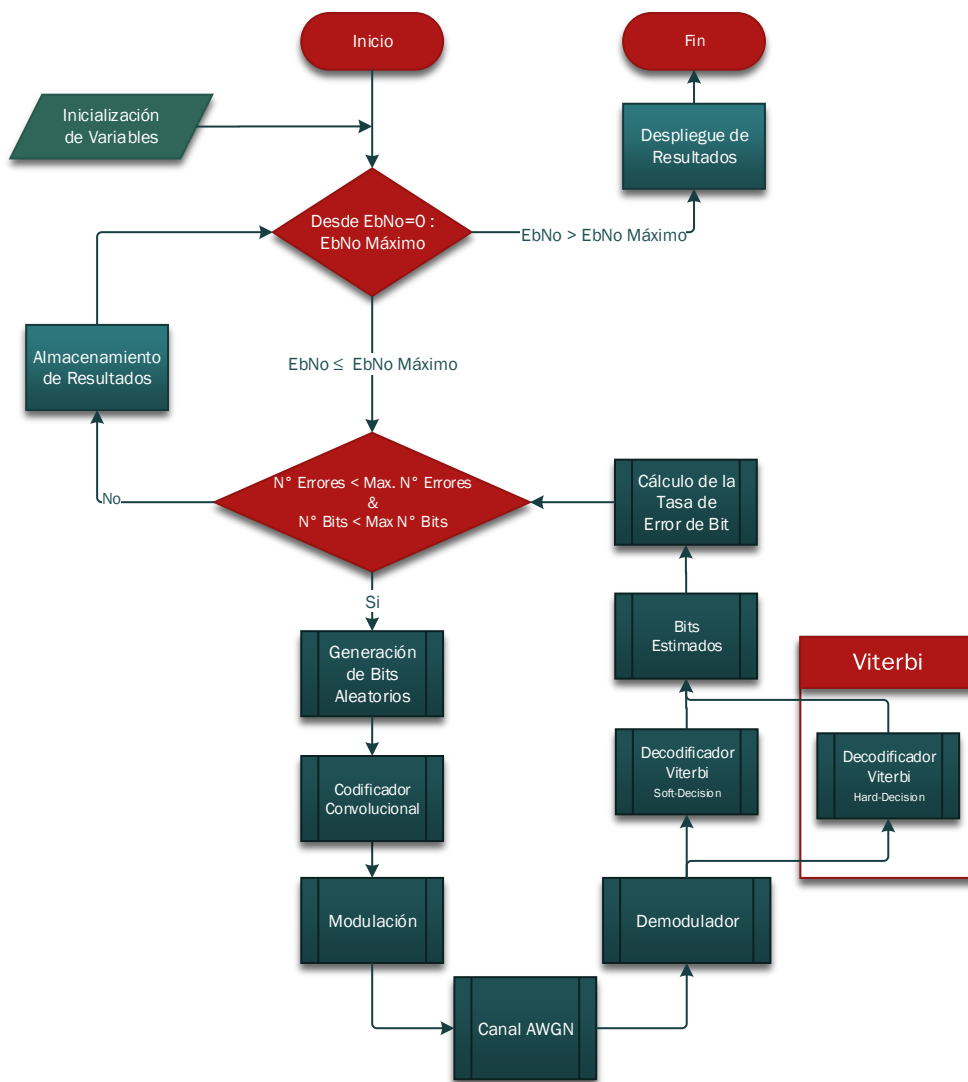


Figura 52: Diagrama de Flujos: Codificación Viterbi Soft y Hard Decision

4.3 Modulación

En esta simulación se podrá experimentar diferentes tipos de modulaciones que incluye: QPSK, 16QAM, 64QAM. Al igual que en la anterior simulación el resultado será la gráfica de la Tasa de Error de Bits (BER), las opciones que se tienen para realizar las simulaciones son:

- BER según la Modulación.
- Comparación del BER según la Modulación.
- BER incluyendo Bits Aleatorizados (*Scrambling*).
- Comparación del BER con y sin Bits aleatorizados.
- Comparación entre Turbo y Viterbi.
- Turbo con Mecanismo de Terminación Temprana.
- Turbo con diferentes Tasas de Codificación (1/2, 1/3).
- BER con todo el procesamiento del Canal de Transporte (TrCH).

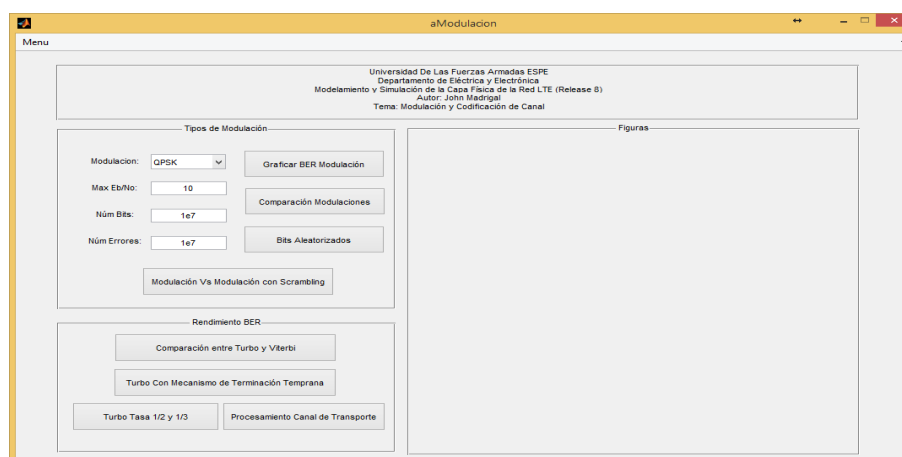


Figura 53: Entorno Gráfico de la Simulación: Modulación

Los resultados que se obtendrán serán los teóricos y simulados para los primeros dos casos. Mediante estas simulaciones se podrá comprender de mejor manera como afecta las diferentes modulaciones en la transmisión y analizar cuál es la modulación más robusta dependiendo la Relación Señal Ruido que se requiera, en la Figura 53 se puede observar el entorno que se ha diseñado, los parámetros variables son: Modulación, Máximo Eb/No, Número de Bits y Número de Errores.

4.3.1 Métodos Utilizados

Para esta simulación se ha hecho uso de los Objetos del Sistema que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Objetos del Sistema Utilizados: Modulación.

| Tipo | Nombre | Función |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Comm | <i>QPSK Modulator</i> | Modulación QPSK |
| Comm | <i>QPSK Demodulator</i> | Demodulación QPSK |
| Comm | <i>16QAM Modulator</i> | Modulación 16QAM |
| Comm | <i>16QAM Demodulator</i> | Demodulación 16QAM |
| Comm | <i>64QAM Modulator</i> | Modulación 64QAM |
| Comm | <i>64QAM Demodulator</i> | Demodulación 64QAM |
| Comm | <i>Gold Sequence</i> | Genera Secuencia Gold |
| Comm | <i>Integer to Bit</i> | Convierte de Entero a Bit |
| Comm | <i>Turbo Encoder</i> | Codificador Turbo |
| Comm | <i>Turbo Decoder</i> | Decodificador Turbo |
| Comm | <i>Bit Error</i> | Cálculo del Bit Error Rate |
| Comm | <i>Convolutional Encoder</i> | Codificación Convolutiva |
| Comm | <i>Viterbi Decoder</i> | Decodificación Viterbi |
| DSP | <i>Scalar Quantizer Encoder</i> | Codificador y Cuantificador Escalar |

4.3.2 Diagrama de Flujo

Se ha considerado la simulación del Procesamiento del Canal de Transporte, ya que esta incluirá todos los pasos para la generación de información que será usada para la Malla de Recursos, así como para las simulaciones siguientes, en la Figura 54 se observa el diagrama de esta simulación.

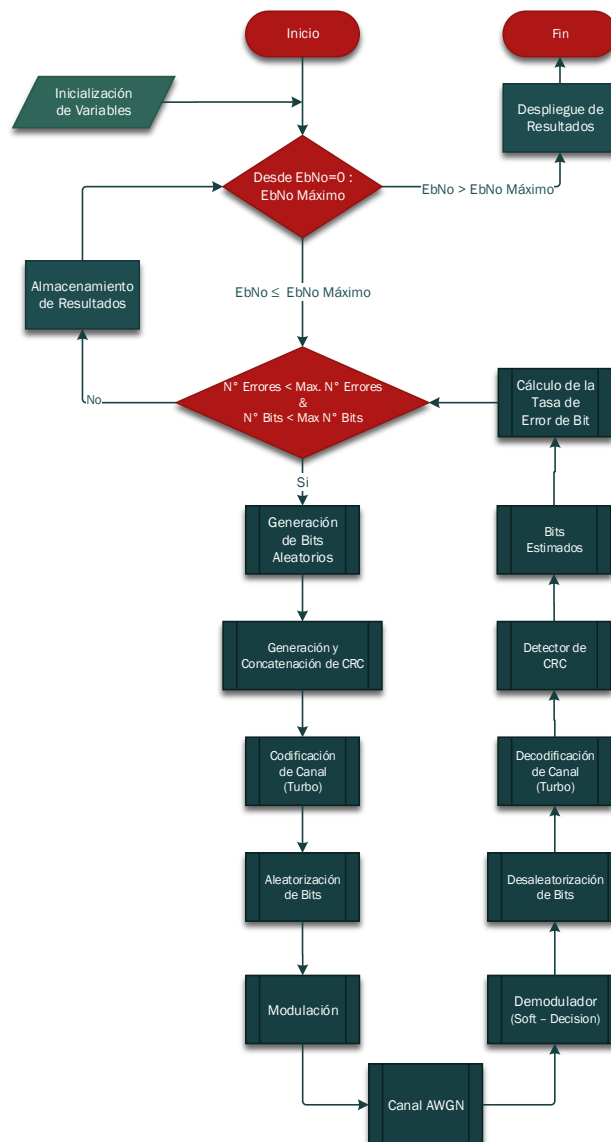


Figura 54: Diagrama de Flujos: Modulación - Canal de Transporte

4.4 Modelamiento de Canal

En esta simulación se experimenta con lo que son los diferentes efectos de canal, al igual que en anteriores simulaciones los parámetros variables de esta son: máximo número de errores y bits, la relación señal ruido Eb/No, el tipo de modulación (QPSK, 16QAM, 64QAM), la tasa de código y los efectos en el canal como se listan a continuación:

- Canal con Desvanecimiento Plano en Baja y Alta Movilidad
- Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia en Baja y Alta Movilidad

El entorno de simulación se observa en la Figura 55, una vez que comienza la simulación se podrá observar el espectro y la constelación de la señal que se está transmitiendo y recibiendo, en esta no se aplica lo que es Modulación OFDM por lo que el espectro que se observará será solo de la señal en el dominio de la frecuencia.

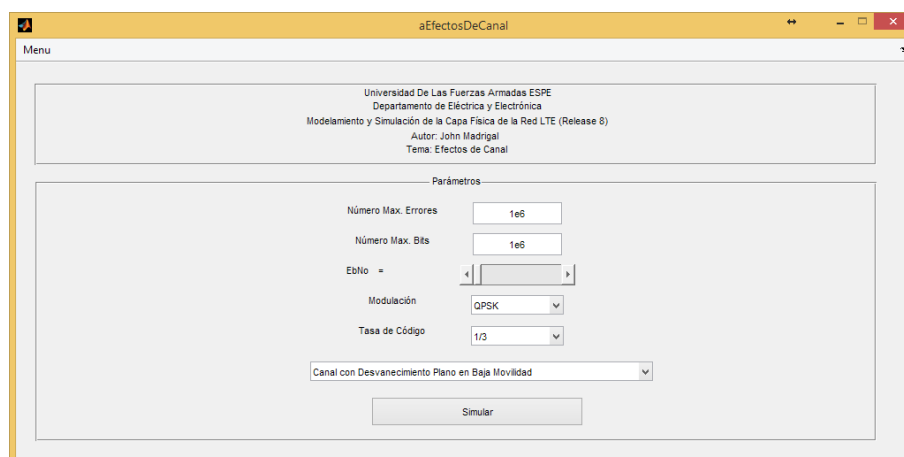


Figura 55: Entorno Gráfico de la Simulación: Canal

El objetivo de esta simulación es mostrar los efectos que tiene un desvanecimiento plano y uno selectivo en frecuencia en el canal, en esta se aplica el concepto de lo que es el efecto Doppler (Andrés, Septiembre de 2008).

4.4.1 Métodos Utilizados

Para esta simulación se ha hecho uso de los Objetos del Sistema que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Objetos del Sistema Utilizados : Modelamiento de Canal.

| Tipo | Nombre | Función |
|-------------|------------------------------|-----------------------------|
| Comm | <i>CRC Generator</i> | Genera el CRC |
| Comm | <i>Turbo Encoder</i> | Codificador Turbo |
| Comm | <i>Gold Sequence</i> | Genera Secuencia Gold |
| Comm | <i>Integer to Bit</i> | Convierte de Entero a Bit |
| Comm | <i>QPSK Modulator</i> | Modulación QPSK |
| Comm | <i>QPSK Demodulator</i> | Demodulación QPSK |
| Comm | <i>16QAM Modulator</i> | Modulación 16QAM |
| Comm | <i>16QAM Demodulator</i> | Demodulación 16QAM |
| Comm | <i>64QAM Modulator</i> | Modulación 64QAM |
| Comm | <i>64QAM Demodulator</i> | Demodulación 64QAM |
| Comm | <i>MIMO Channel</i> | Canal MIMO |
| Comm | <i>AWGN Channel</i> | Canal AWGN |
| DSP | <i>Constellation Diagram</i> | Diagrama de la Constelación |
| DSP | <i>Spectrum Analyzer</i> | Analizador de Espectros |
| Comm | <i>Turbo Decoder</i> | Decodificador Turbo |
| Comm | <i>Bit Error</i> | Cálculo del Bit Error Rate |

4.4.2 Diagrama de Flujo

En el diagrama que se observa en la Figura 56 se puede notar claramente la inclusión de nuevos bloques los cuales permiten la simulación del canal y la visualización de las señales, el bloque MIMO es el que permite realizar la inclusión de diferentes efectos en el canal, mientras que el bloque de Visualización de datos es en donde se muestra

el espectro y la constelación de la simulación.

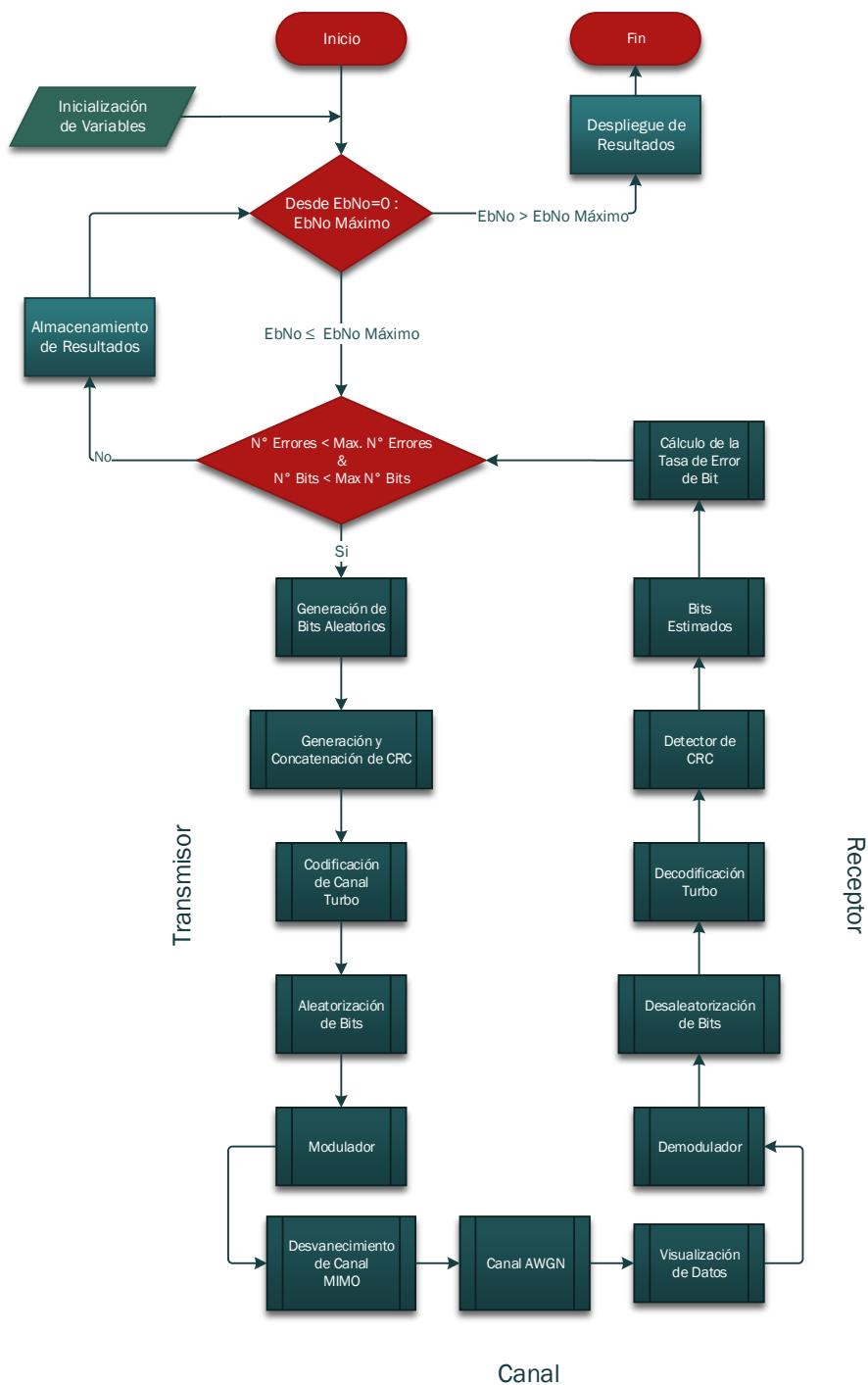


Figura 56: Diagrama de Flujos : Efectos de Canal

4.5 SISO

La simulación de SISO y las siguientes son más complejas que las anteriores ya que en estas se incluyen todo el proceso del transporte de canal de la Capa Física, para esta se tendrán más parámetros que son configurables, los cuales se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Parámetros de la Simulación : SISO

| Tipo | Variable | Valores |
|----------|------------------------------|--|
| Fijo | Antenas Tx | 1 |
| Fijo | Antenas Rx | 1 |
| Fijo | Iteraciones Decodificaciones | 6 |
| Variable | Ancho de Banda | 1.4/3/5/10/15/20 MHz |
| Variable | Símbolos de Control | 1/2/3 |
| Variable | Modulación | QPSK/16QAM/64QAM |
| Variable | Tasa de Codificación | 1/3 |
| Variable | Tipo de Decodificación | Completa/Terminación Temprana |
| Variable | Modelamiento de Canal | Baja/Alta Movilidad y Frecuencia Selectiva |
| Variable | Tipo de Ecuación | ZF |
| Variable | Estimación de Canal | Estimación/Ideal |
| Variable | Núm. de Bits | 1×10^5 |
| Variable | Núm. de Errores | 1×10^5 |
| Variable | Relación Señal Ruido | 10 |
| Variable | Visualización | Activada/Desactivada |

Como se describió en la Tabla 13 y se observa en la Figura 57 la mayoría de parámetros son configurables lo cual permite tener diferentes combinaciones para realizar pruebas de rendimiento de la Capa Física de una Red LTE (R8), la información que se obtiene como resultado será: Ancho de Banda Simulado y Tasa de Transmisión (*Throughput*). Adicionalmente a estos aspectos que se han incluido en esta simula-

ción, también se observa la Gráfica del BER y la Malla de Recursos correspondiente a la última Ranura que fue simulada.

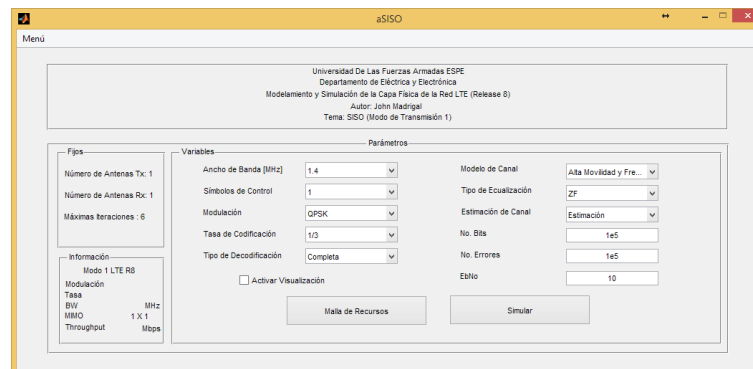


Figura 57: Entorno de Simulación: SISO

Algo muy importante en esta simulación es la posibilidad de ver la Malla de Recursos que va a ser generada, lo cual permite tener una mejor comprensión de cómo esta cambia dependiendo de los parámetros, para ver esta opción se debe pulsar sobre el botón *Malla de Recursos*.

4.5.1 Métodos Utilizados

Los Objetos del Sistema utilizados en esta simulación son los mismos que se utilizaron los Efectos de Canal, en esta se han usado funciones extraídas de (Understanding LTE with MATLAB, 2014), las cuales realizan: Malla de Recursos, Estimación de Canal, Ecuación, entre otras.

4.5.2 Diagrama de Flujo

En este diagrama de flujo se incluye lo que es la Generación de Señales CSR, las cuales como están explicadas en el Capítulo II, estas son señales de referencia las cuales ayudan al receptor a realizar la demodulación de la señal OFDM y la estimación de canal. De igual manera se incluye la Malla de Recursos y Modulación OFDM las

cuales van de la mano cuando hablamos de LTE, el diagrama de flujo se observa en la Figura 58.

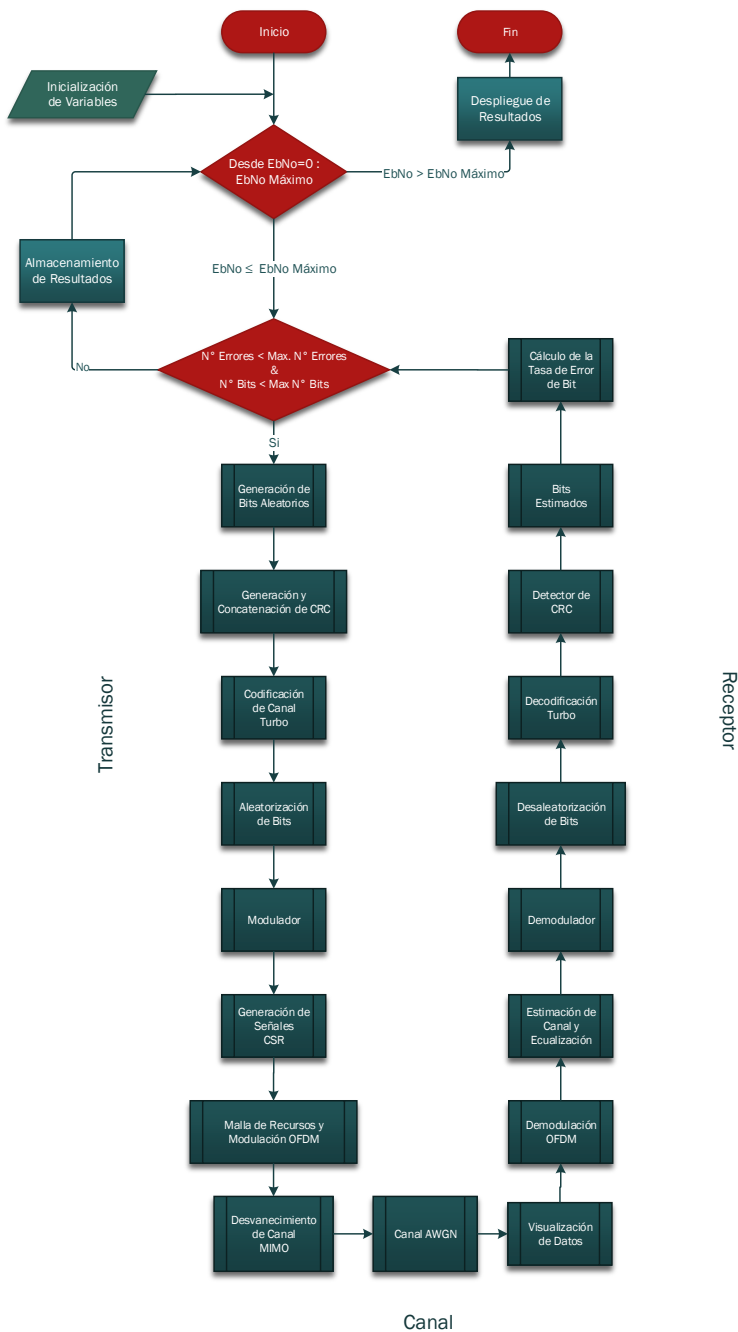


Figura 58: Diagrama de Flujos: SISO

NOTA.- En los próximos diagramas de Flujo se reemplazarán los bloques desde la

Generación de Bits hasta la Modulación por un bloque llamado Generación y Adaptación de Información para tomar en cuenta los bloques que se irán agregando, de igual manera en el lado del receptor.

4.6 SIMO

La simulación de SIMO mantiene características similares a la de SISO con la diferencia del número de antenas de Recepción que son cuatro, los parámetros configurables se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14: Parámetros de la Simulación: SIMO

| Tipo | Variable | Valor Por Defecto |
|-------------|------------------------------|--|
| Fijo | Antenas Tx | 1 |
| Fijo | Antenas Rx | 4 |
| Fijo | Iteraciones Decodificaciones | 6 |
| Variable | Ancho de Banda | 1.4/3/5/10/15/20 MHz |
| Variable | Símbolos de Control | 1/2/3 |
| Variable | Modulación | QPSK/16QAM/64QAM |
| Variable | Tasa de Codificación | 1/3 |
| Variable | Tipo de Decodificación | Completa/Terminación Temprana |
| Variable | Modelamiento de Canal | Baja/Alta Movilidad y Frecuencia Selectiva |
| Variable | Tipo de Ecuación | ZF |
| Variable | Estimación de Canal | Estimación/Ideal |
| Variable | Núm. de Bits | 1×10^5 |
| Variable | Núm. de Errores | 1×10^5 |
| Variable | Relación Señal Ruido | 10 |
| Variable | Visualización | Activada/Desactivada |

En la Figura 59 se observa el entorno de simulación de SIMO, los resultados a

obtenerse son similares a los de SISO, en donde se observa el mayor cambio es en el *Throughput* del sistema, la Tasa de Error de Bit se verá disminuida por el aumento de antenas en el Receptor ya que la señal que se decodifica será más robusta al ruido y efectos del canal.

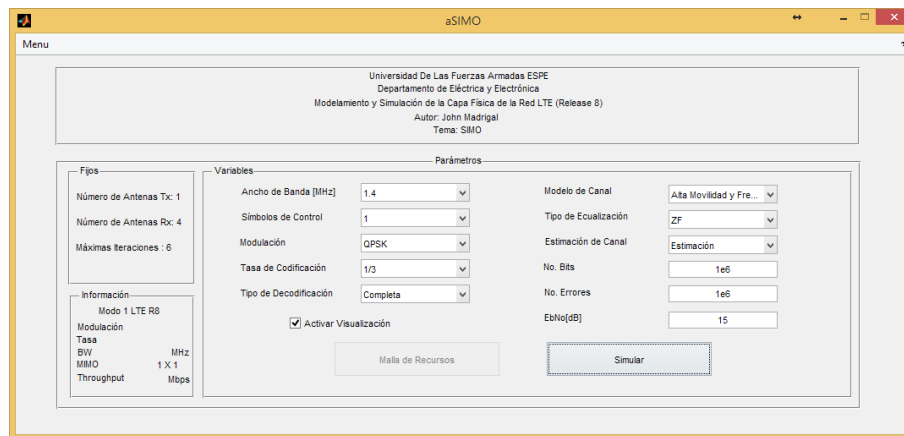


Figura 59: Entorno de Simulación: SIMO

4.6.1 Métodos Utilizados

Los Objetos del Sistema utilizados en esta simulación son los mismos que se utilizaron en el Modelamiento de Canal, en esta se han usado funciones extraídas de (Understanding LTE with MATLAB, 2014), las cuales realizan: Estimación de Canal, Ecuación; para la Malla de Recursos se ha utilizado el *LTE System Toolbox*.

4.6.2 Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo para SIMO es similar al de SISO con la diferencia del número de flujo de datos en la recepción que pasa de ser cuatro flujos a un único con toda la información.

4.7 Modos de Transmisión

De los siete Modos de Transmisión de LTE (R8) se toma en consideración los primeros cuatro, los casos de SISO y SIMO anteriormente descritos están vinculados directamente al Modo de Transmisión 1, mientras que casos en donde se usan de 1 a 4 antenas se toman en cuenta en los modos 2, 3 y 4.

4.7.1 Modo de Transmisión 2

El Modo de Transmisión 2 o Diversidad de Transmisión permite seleccionar cuantas antenas de Transmisión y Recepción se desea para la simulación, las opciones a elegir son:

- 1 X 1/2/3/4
- 2 X 2
- 4 X 4

El entorno de simulación se observa en la Figura 60, los parámetros que cambian en comparación a SISO o SIMO son el Modelo de Canal ya que en esta simulación se toma en cuenta los modelos EPA y EVA, la estimación de canal ahora tiene la opción de una estimación ideal o interpolación.

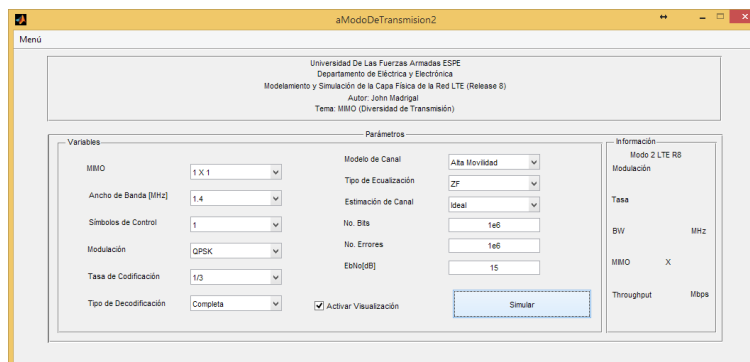


Figura 60: Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 2

Métodos Utilizados

Los métodos utilizados son los mismos que para el Modelamiento de Canal como se observó en la Tabla 12, se agregan varias funciones como la generación de señales CSR, estimación de canal y ecualización, las cuales se han tomado de referencia de (Understanding LTE with MATLAB, 2014).

Diagrama de Flujo

Como se explica en la Nota del diagrama de flujo de la simulación de SISO se ha reemplazado el proceso desde generación de bits hasta modulación por el bloque de Generación y Adaptación de Información.

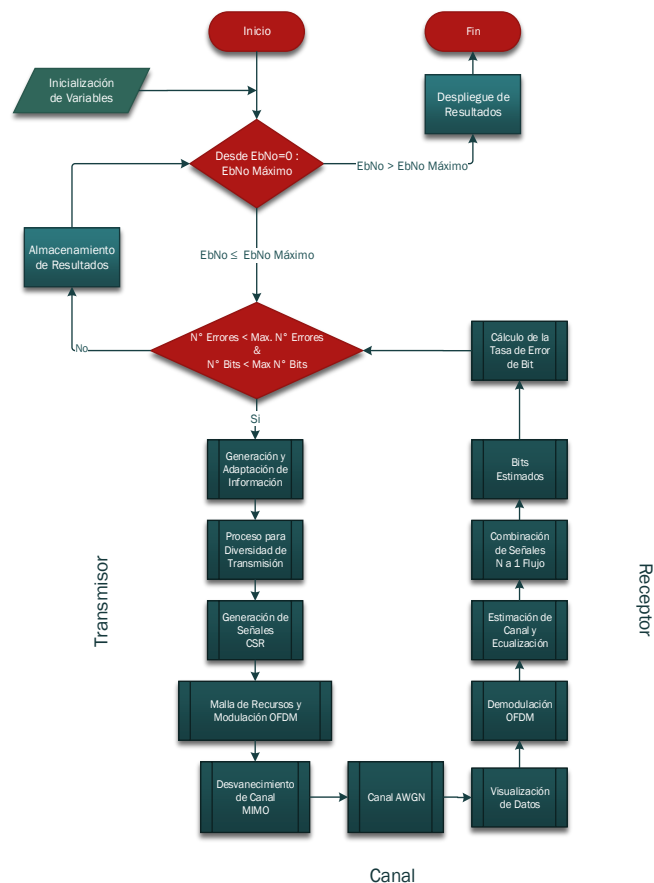


Figura 61: Diagrama de Flujos: Modo de Transmisión 2

El bloque de Proceso para Diversidad de Transmisión lo que hace es codificar el o los flujos de información para que estos sean codificados en la Malla de Recursos. En el Receptor se ubica el bloque de Combinación de Señales N a 1 flujo de lo que quiere decir que todos los flujos que han sido decodificados se integran y pasan a ser uno solo, para realizar los respectivos procesos como se observa en la Figura 61.

4.7.2 Modo de Transmisión 3 y 4

El modo de transmisión 3 y 4 usan Multiplexación Espacial con la diferencia de que el modo 3 es en Lazo Abierto mientras que el 4 es en Lazo Cerrado generalmente estos son usados para escenarios de alta movilidad. El entorno de simulación del Modo de Transmisión 3 y 4 se observan en la Figura 62 y 63 respectivamente.

Figura 62: Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 3

Figura 63: Entorno de Simulación: Modo de Transmisión 4

Al igual que en las simulaciones de SISO y SIMO el resultado de esta se mostrará el BER y el Throughput simulado, el último en la parte derecha del entorno de simulación.

4.7.2.1 Métodos Utilizados

Los métodos utilizados son similares a los anteriores, en estos dos modos se incluyen funciones que realizan la Multiplexación espacial tanto en lazo cerrado como abierto.

4.7.2.2 Diagrama de Flujo

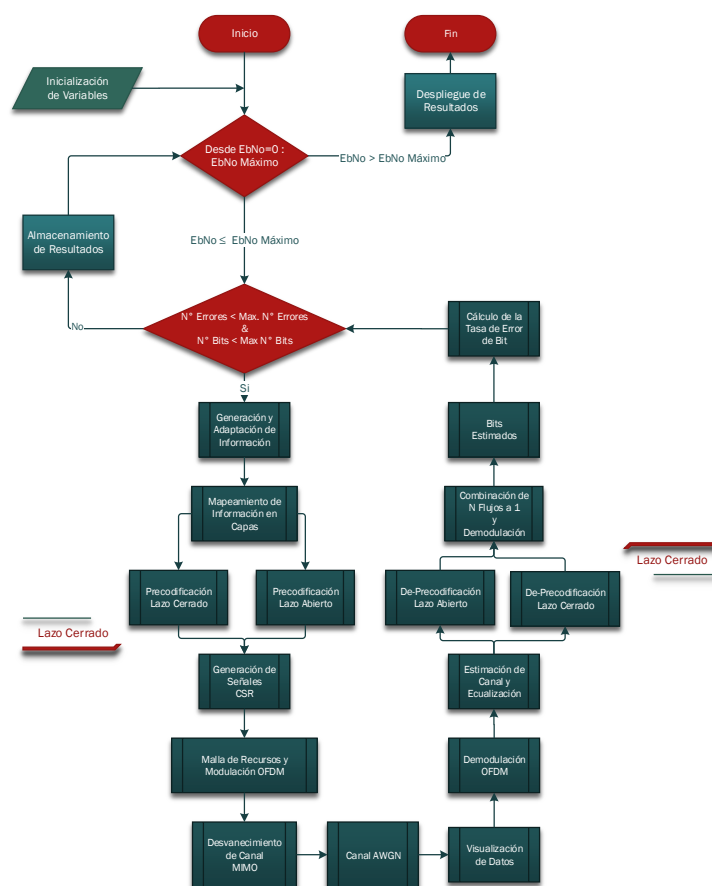


Figura 64: Diagrama de Flujo: Modo de Transmisión 3 y 4

El diagrama de flujo se observa en la Figura 64 en donde se ve que la diferencia radica en el proceso de Precodificación de la información uno actuando en Lazo Cerrado el cual calcula la matriz de precodificación y luego la aplica, mientras que en Lazo Abierto la calcula al momento de procesar la información, en síntesis una envía más datos de control para la De-Precodificación en el Receptor.

4.8 Adaptación de Enlace con CQI

Hasta ahora las simulaciones consisten en la variación de parámetros en el entorno de simulación, para esta simulación se ha optado por parámetros fijos y un despliegue netamente de resultados como se observa en la Figura 65. Los parámetros con los cuales se realiza esta simulación se observa en la Tabla 15 y son fijos.

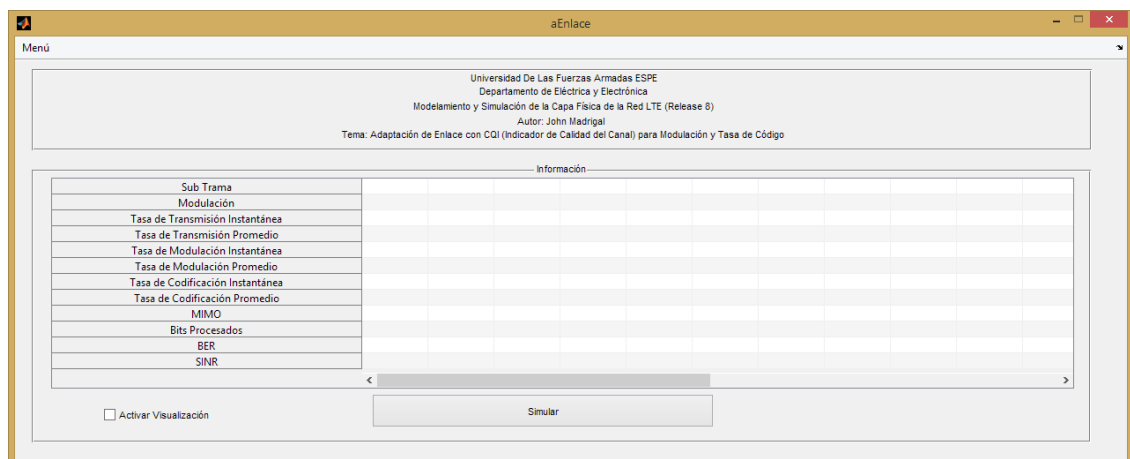


Figura 65: Entorno de Simulación: Adaptación de Enlace CQI

En esta simulación aparece el termino SINR el cual es un coeficiente que se calcula con los bits decodificados entre el receptor y la salida de la decodificación MIMO. Según el SINR se cambia la modulación y la tasa de codificación al momento de enviar la siguiente ranura, la tabla en donde se observa que modulación y tasa de codificación se observa en la Figura 66.

Tabla 15: Parámetros de la Simulación: Adaptación de Enlace CQI

| Tipo | Variable | Valor |
|-------------|------------------------------|-------------------------|
| Fijo | Antenas Tx | 2 |
| Fijo | Antenas Rx | 2 |
| Fijo | Iteraciones Decodificaciones | 6 |
| Variable | Ancho de Banda | 20 MHz |
| Variable | Símbolos de Control | 1 |
| Variable | Modulación | 64QAM |
| Variable | Tasa de Codificación | 1/2 |
| Variable | Tipo de Decodificación | Temprana |
| Variable | Modelamiento de Canal | Selectiva en Frecuencia |
| Variable | Tipo de Ecuación | MMSE |
| Variable | Estimación de Canal | Estimación |
| Variable | Núm. de Bits | 1×10^6 |
| Variable | Núm. de Errores | 1×10^6 |
| Variable | Relación Señal Ruido | 20 |
| Variable | Visualización | Activada |

Los resultados que se mostrarán al terminar la simulación son:

- Subtrama
- Modulación
- Tasa de Transmisión Instantánea
- Tasa de Transmisión Promedio
- Tasa de Modulación Instantánea
- Tasa de Modulación Promedio

- Tasa de Codificación Instantánea
- Tasa de Codificación Promedio
- MIMO
- Bits Procesados
- BER-*Bit Error Rate*
- SINR - Relación Señal Interferencia más Ruido

| CQI index | Modulation | Coding rate | Spectral efficiency (bps/Hz) | SINR estimate (dB) |
|-----------|------------|-------------|------------------------------|--------------------|
| 1 | QPSK | 0.0762 | 0.1523 | -6.7 |
| 2 | QPSK | 0.1172 | 0.2344 | -4.7 |
| 3 | QPSK | 0.1885 | 0.3770 | -2.3 |
| 4 | QPSK | 0.3008 | 0.6016 | 0.2 |
| 5 | QPSK | 0.4385 | 0.8770 | 2.4 |
| 6 | QPSK | 0.5879 | 1.1758 | 4.3 |
| 7 | 16QAM | 0.3691 | 1.4766 | 5.9 |
| 8 | 16QAM | 0.4785 | 1.9141 | 8.1 |
| 9 | 16QAM | 0.6016 | 2.4063 | 10.3 |
| 10 | 64QAM | 0.4551 | 2.7305 | 11.7 |
| 11 | 64QAM | 0.5537 | 3.3223 | 14.1 |
| 12 | 64QAM | 0.6504 | 3.9023 | 16.3 |
| 13 | 64QAM | 0.7539 | 4.5234 | 18.7 |
| 14 | 64QAM | 0.8525 | 5.1152 | 21.0 |
| 15 | 64QAM | 0.9258 | 5.5547 | 22.7 |

Figura 66: Tabla de Valores Modulación y Tasa de Código según el SINR

4.8.1 Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo se observa en la Figura 67 en donde se observa que en comparación con las simulaciones anteriores, después del Cálculo de la Tasa de Error de Bit se procede a realizar el cálculo del coeficiente SINR y se modifica la modulación y la tasa de codificación si fuese el caso.

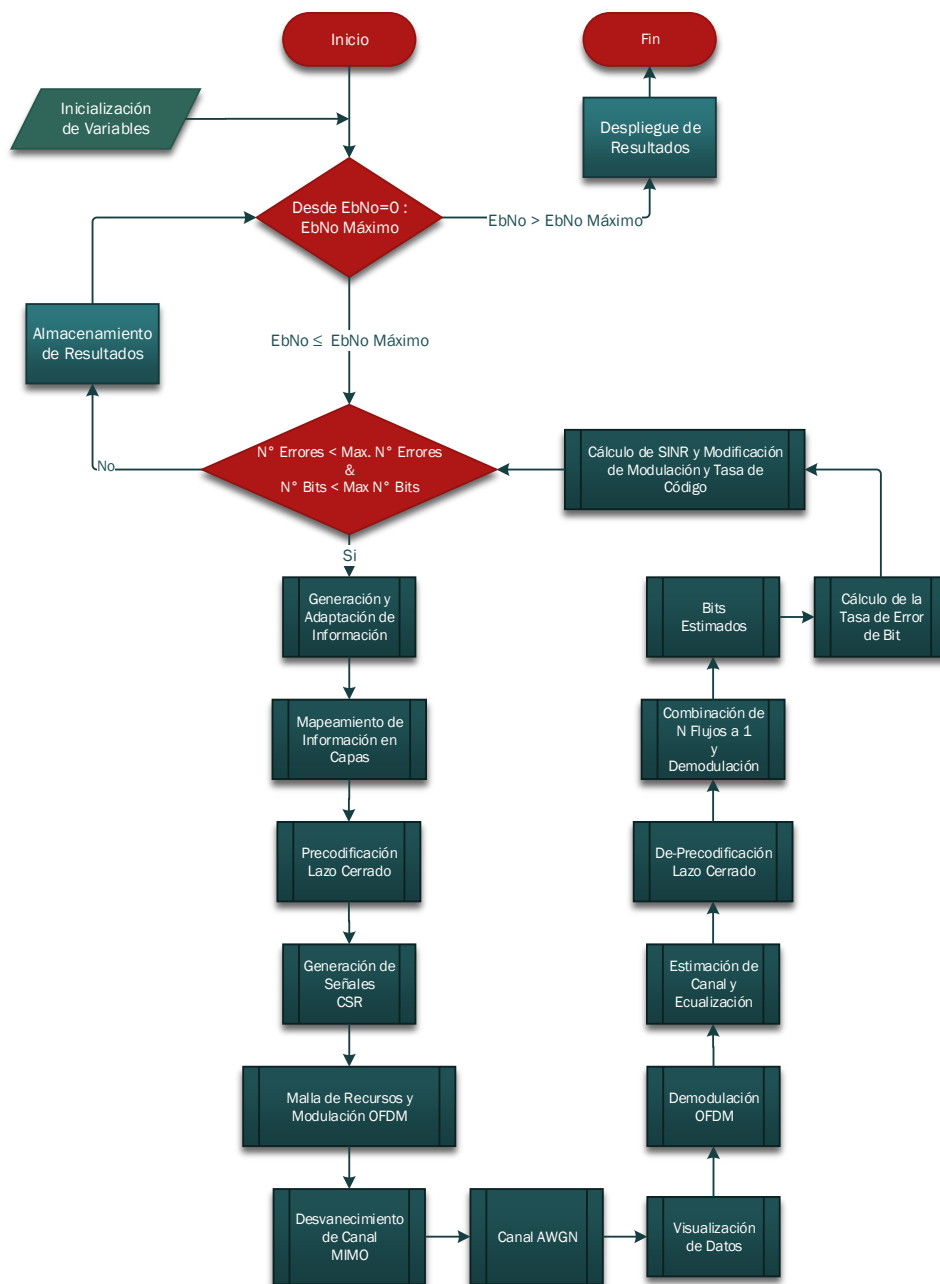


Figura 67: Diagrama de Flujo: Adaptación de Enlace CQI

4.9 Transmisión del *Downlink* mediante un USRP N210

Para la transmisión del Downlink se ha hecho uso de Simulink, en esta plataforma se puede realizar la transmisión con el USRP N210 debido a la librería que se dispone, cuyo diagrama de bloques se observa en la Figura 68, en este se encuentra la clase de *Downlink*, los parámetros del transmisor, el contador de las subtramas, un *display* para la visualización de la subtrama que se está enviando y por último el Sistema de Envío en donde entran dos señales: señal OFDM y la tasa de Muestreo del Transmisor.

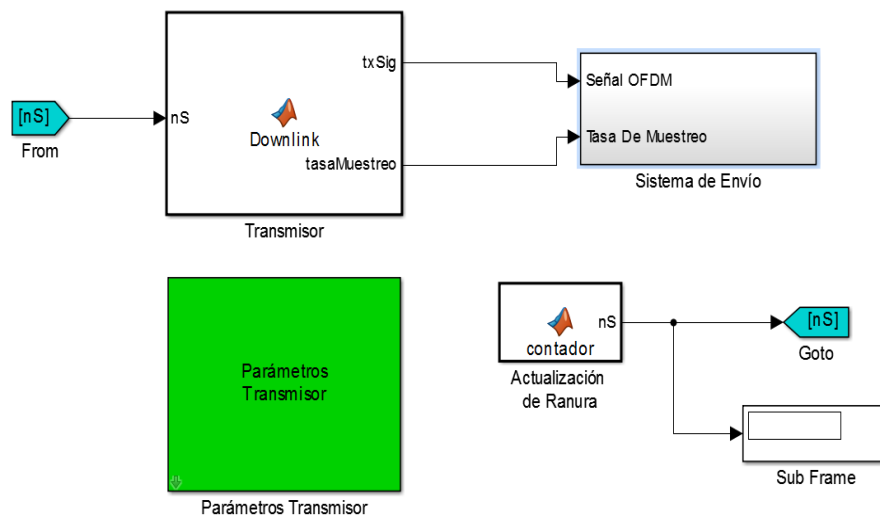


Figura 68: Diagrama de Bloques : Downlink

Los parámetros que se pueden configurar para la transmisión son:

- Ancho de Banda - 1.4/3/5/10/15/20 MHz
- Tipo de Modulación - QPSK, 16QAM, 64QAM
- Número de Símbolos de Control - 1/2/3
- Tipo de Codificación - Por Defecto 1/2

Dentro del Bloque Sistema de Envío se encuentra la señal OFDM la cual se multiplica por un Factor de 0.1, esto sirve para atenuar la señal y acoplarla al USRP. La

tasa de muestreo se divide por un factor de 1×10^8 el cual es la Tasa de muestreo del USRP, mediante esta división lo que se logra es obtener el Factor de Interpolación el cual determinará el Ancho de Banda de la Transmisión, esto se observa en la Figura 69.

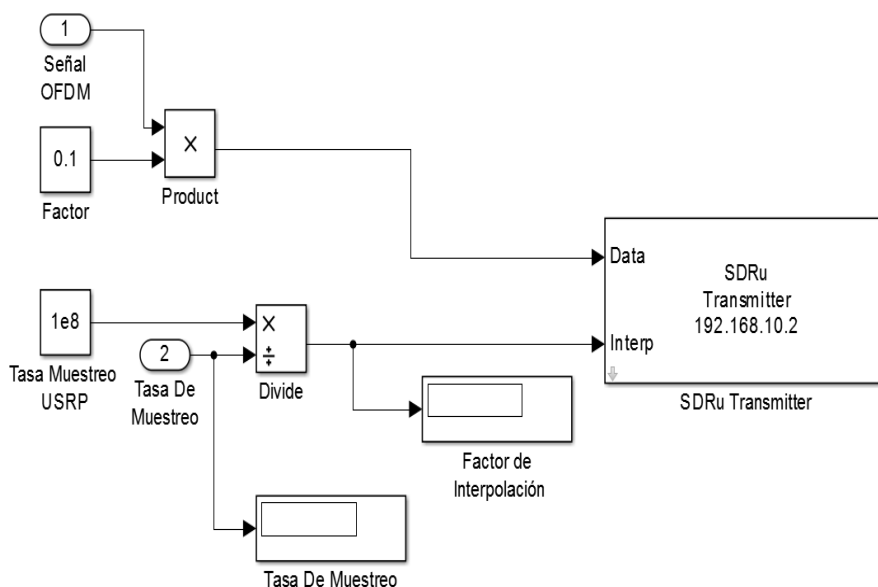


Figura 69: Diagrama de Bloques: Sistema de Envío

En el bloque del USRP denominado *SDRu Transmitter* se puede configurar la dirección IP del USRP, frecuencia central, ganancia y un *offset* para la frecuencia de transmisión. Estos parámetros vienen por defecto como:

- Dirección IP - 192.168.10.2
- Frecuencia Central - 2.1 GHz
- Frecuencia de Offset - 0 Hz
- Ganancia - 31.5 dB

La señal OFDM que se envía tendrá el procesamiento visto en el Capítulo II la cual cumple con el estándar de LTE R8, una vez ejecutado el programa comenzará la

compilación que puede demorar de 1 a 3 minutos, esto lo hará cuando se ejecute el programa por primera vez o cuando se cambie los parámetros utilizados, los resultados obtenidos se analizarán en el siguiente capítulo.

4.10 Transmisión del *Uplink* mediante un USRP N210

La transmisión del enlace de subida o Uplink se ha realizado mediante el uso del *Toolbox* de LTE que viene incluido en Matlab R2014a, en este se pueden generar señales que cumplen con lo descrito en el Capítulo II, estas se han generado según la Tabla A.3 del Anexo de la especificación técnica de la 3GPP TS 36.104 (3GPP, 2011). En la Tabla 16 se puede observar las características de esta señal.

Tabla 16: Parámetros de la Transmisión: *Uplink*

| Parámetro | A3-2 | A3-3 | A3-4 | A3-5 | A3-7 |
|-------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Ancho de Banda [MHz] | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 20 |
| Bloque de Recursos Utilizados | 6 | 15 | 25 | 50 | 100 |
| Modulación | QPSK | QPSK | QPSK | QPSK | QPSK |
| Tasa de Código | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Nº Total de Bits | 1728 | 4716 | 6732 | 15564 | 15564 |
| Nº Total de Símbolos | 864 | 2160 | 3600 | 7200 | 14400 |

El entorno de simulación se observa en la Figura 70, en donde se tiene los parámetros:

- Dirección IP - Dirección IP del USRP N210, ej. 192.168.10.2.
- Frecuencia Central - Frecuencia a la cual se transmitirá, ej. 2120 MHz.
- Ganancia - Ganancia del USRP N210, ej. 20 dB.
- Ancho de Banda - Con el que se transmite, ej. 1.4 MHz.

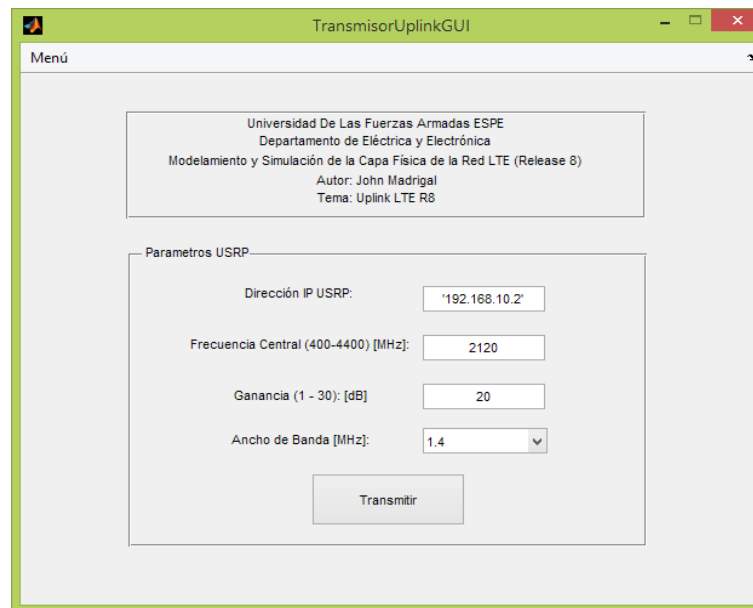


Figura 70: Entorno de Simulación: Transmisión del Enlace de Subida (*Uplink*)

4.11 Simulación de la Capa Física de LTE (R8)

Al igual que para la transmisión del enlace de bajada se hace uso de Simulink, en esta simulación se podrá simular completamente la capa física de LTE visualizando el espectro de la señal transmitida y recibida, en la Figura 71 se puede observar los bloques que conforman esta simulación los cuales son:

- Transmisor
- Canal
- Receptor
- Contador de Sub-Tramas.
- Parámetros del Modelo.
- Cálculo de la tasa de error de bit.

- Analizadores de Espectro para la señal Transmitida y Recibida.
- Display del contador de Sub-Trama.
- Display del valor del BER.

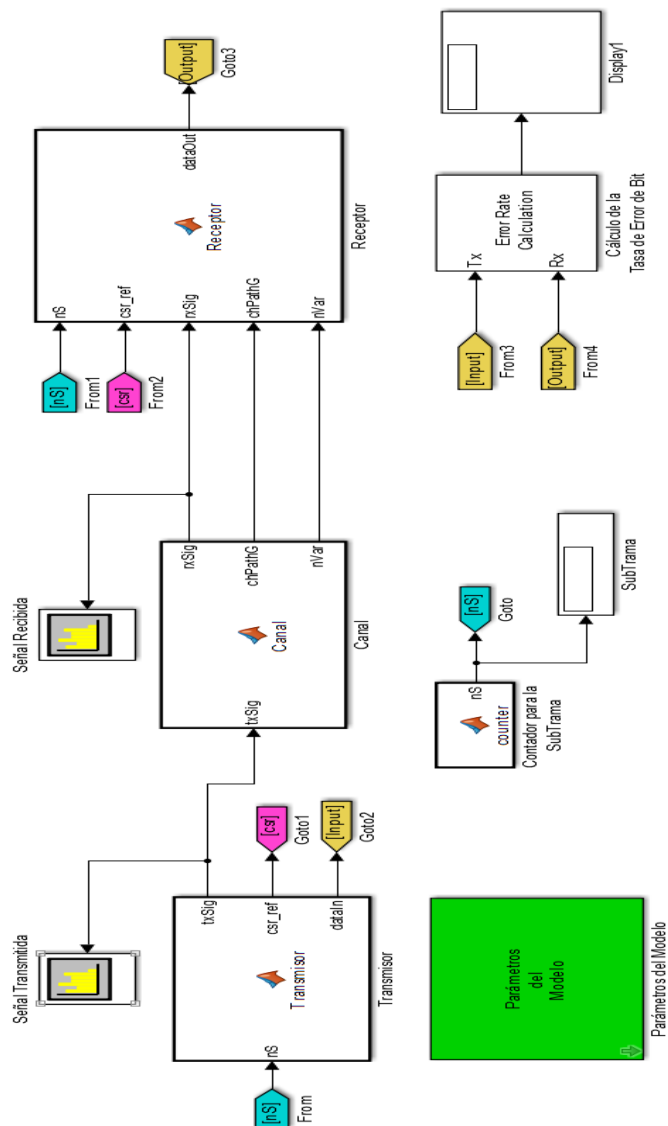


Figura 71: Simulación Completa de la Capa Física de LTE R8

Dentro de los parámetros del Modelos se encuentran todas las opciones para la simulación en la Tabla 17 se observan cuales son y sus valores por defecto.

Tabla 17: Parámetros de la Transmisión - Capa Física de LTE (R8)

| Parámetro | Valor |
|-----------------------|-----------------|
| Modo de Transmisión | SIMO |
| Antenas de TX | 1 |
| Antenas de RX | 2 |
| Ancho de Banda | 10 MHz |
| Tipo de Modulación | 16QAM |
| Símbolos de Control | 2 |
| Número de Flujos | 1 |
| Tasa de Código | 1/3 |
| Número de Iteraciones | 4 |
| Terminación Temprana | Activada |
| Tipo de Canal | Plano |
| Relación Señal Ruido | 5 |
| Bits a Transmitir | 1×10^6 |
| Tipo de Ecuación | MMSE |

En la Figura 72 se observa la interfaz para la elección de los parámetros.

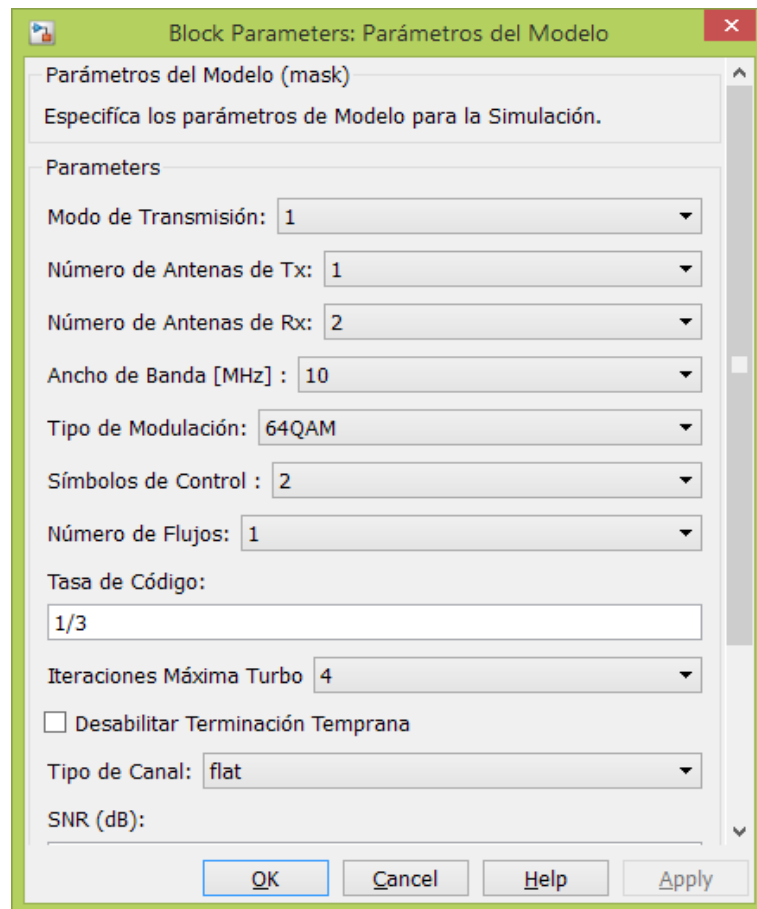


Figura 72: Interfaz de Parámetros de la Simulación: Capa Física LTE R8

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Codificación

En esta simulación el resultado es la Gráfica del *BER* la cual se observa en la Figura 73, en esta se puede notar que en 1dB de Turbo, en 3dB con Viterbi con decisión suave, en 5dB de Viterbi con decisión dura se tiene el mismo valor de BER de aproximadamente 4×10^{-4} , con lo cual se demuestra claramente la superioridad de la codificación/de-codificación Turbo, la cual tuvo que realizar 6 iteraciones para lograr ese rendimiento lo que implica una carga computacional más alta que los demás algoritmos.

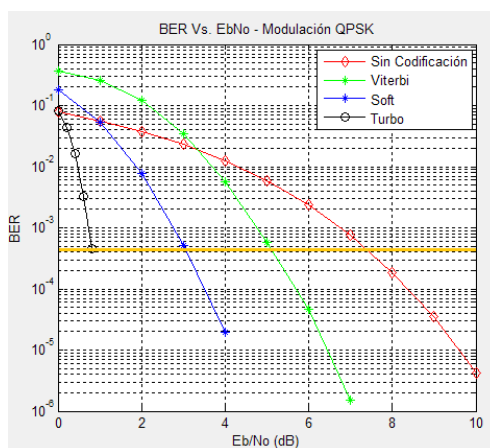


Figura 73: Comparación de BER con diferentes Codificaciones

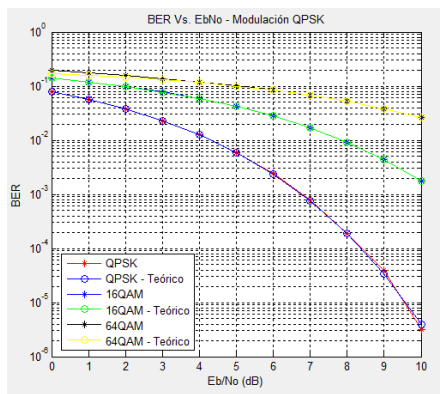
Los parámetros establecidos para esta simulación son: Tamaño de la Trama - 2048, Máximo Número de Errores - 1×10^7 , Número de Bits a transmitirse - 1×10^7 , Máxima Relación Señal Ruido - 10 dB.

5.2 Modulación

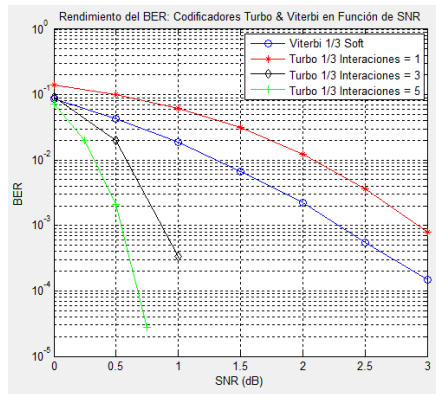
En la Figura 74 (a) se observa una comparación del BER de las modulaciones usadas en LTE, para tener cierta calidad en la transmisión el valor de la Relación Señal Ruido debe de ir aumentando progresivamente mientras pasamos de QPSK a 16QAM y a 64QAM, lo que sugiere que la modulación de menor orden como QPSK deben ser usadas en canales con alto ruido, para de esta manera atenuar la probabilidad de error con el costo de tener tasas de transmisión bajas, mientras que modulaciones de mayor orden como 16QAM y 64QAM son usadas en canales con menos ruido para mejorar estas tasas. Los resultados obtenidos en la simulación se pueden verificar debido a que se encuentran las curvas del BER Teóricas.

En la Figura 74 (b) se muestra una comparación entre Turbo con diferente número de iteraciones (1/3/5) y Viterbi para una misma tasa de código (1/3), mientras el número de iteraciones aumenta se observa que la curva del BER se acerca a la calidad óptima de un Decodificador Turbo completo. Es por el rendimiento de Turbo que ha sido seleccionado como el mecanismo de codificación de canal para LTE.

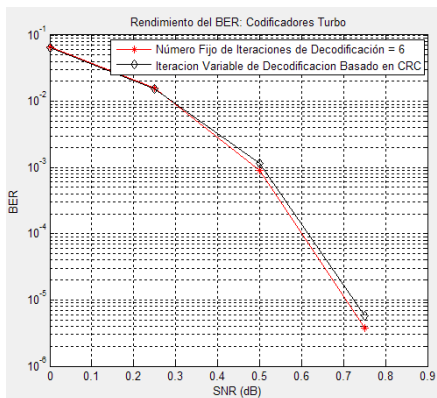
El Mecanismo de Terminación Temprana permite reducir en parte el procesamiento computacional que se ocupa con códigos Turbo, como se observa en la Figura 74 (c) el BER que se tiene cuando se ocupa este es similar al de cuando se ocupa un número de iteraciones fijo.



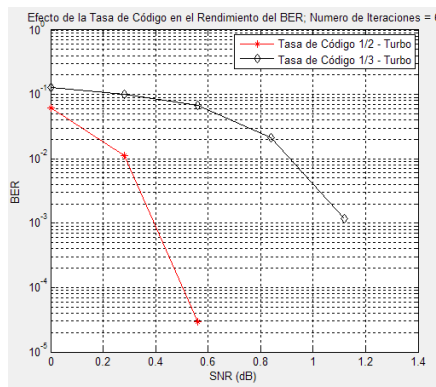
(a) Comparación Modulaciones



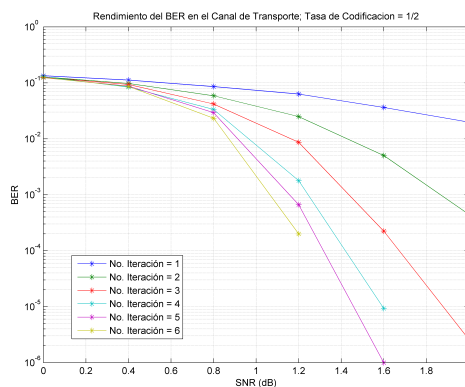
(b) Comparación Turbo y Viterbi



(c) Turbo con 6 Iteraciones y con Mecanismo de Terminación Temprana



(d) Efecto de la Tasa de Código en el BER



(e) Procesamiento del Canal de Transporte para varias iteraciones

Figura 74: Gráficas BER

El efecto de la tasa de codificación en el rendimiento del BER se observa en la Figura 74 (d), para tener una probabilidad de error de aproximadamente de 10^{-2} con tasa 1/2 se necesitan 0.3dB mientras que para tener un resultado similar con tasa 1/3 se necesita 0.9dB con esto se comprueba que con una tasa de 1/2 el rendimiento es mejor respecto a la tasa 1/3, esto debido a la cantidad de datos que se procesan.

En la Figura 74 (e) se observa el efecto de cambiar el número de iteraciones para la decodificación Turbo aplicando el procesamiento del Canal Lógico y Físico del enlace de bajada sin operaciones de OFDM y MIMO, el rendimiento mejora a medida de que se aumentan las iteraciones, lo que demuestra el rendimiento de Turbo para el procesamiento del canal.

Para las Simulaciones se han considerado los siguientes parámetros: Modulación - QPSK, Max Eb/No - 10, Número de Bits - 1×10^7 , Número de Errores 1×10^7 , con excepción para el Procesamiento del Canal de Transporte que se usaron 1×10^4 .

5.3 Efectos de Canal

En la Figura 75 se muestra tanto la constelación y la señal que pasa por el canal y es receptada, se nota que a lo largo de la frecuencia el desvanecimiento es constante, de ahí el nombre de desvanecimiento plano, todo esto considerando que se simula con baja movilidad.

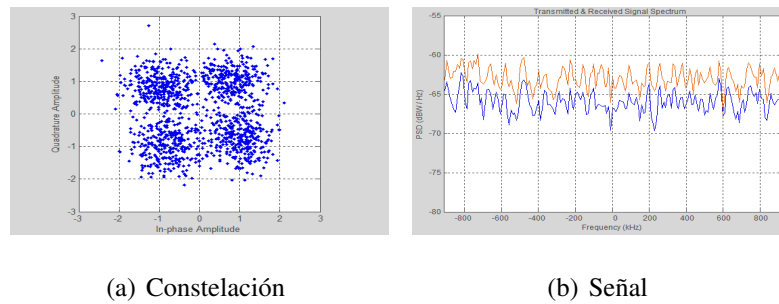


Figura 75: Canal con Desvanecimiento Plano y Baja Movilidad

Para el caso de la Figura 76 se simula con alta movilidad lo cual hace que el desvanecimiento varíe en función al tiempo, la constelación irá rotando la fase como una consecuencia del Efecto Doppler.

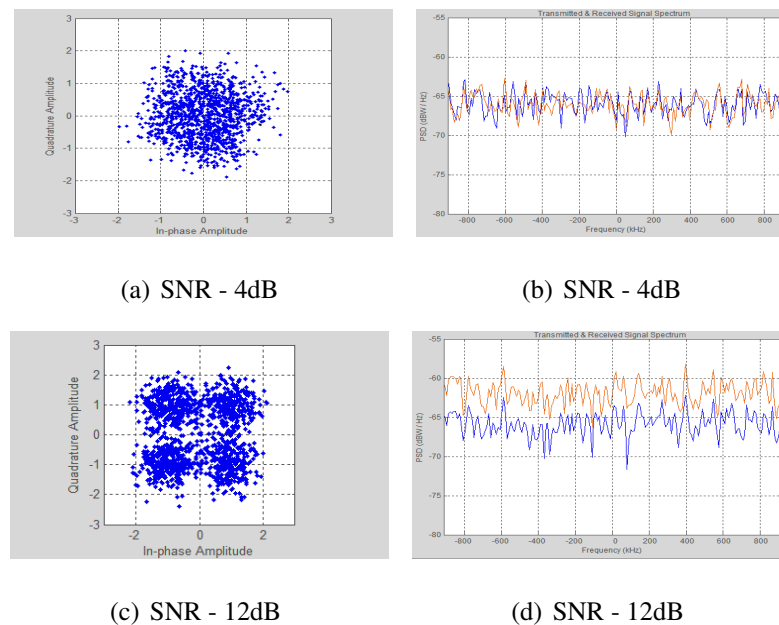


Figura 76: Canal con Desvanecimiento Plano y Alta Movilidad

Para el caso de la Figura 77 se tiene un Efecto Doppler de 0 pero con un vector asociado al perfil de retraso en el tiempo lo que afecta directamente en la frecuencia, se puede observar que el vector tiene la misma ganancia y se mantendrá el desvanecimiento constante, es decir el desvanecimiento es constante y la frecuencia es variable.

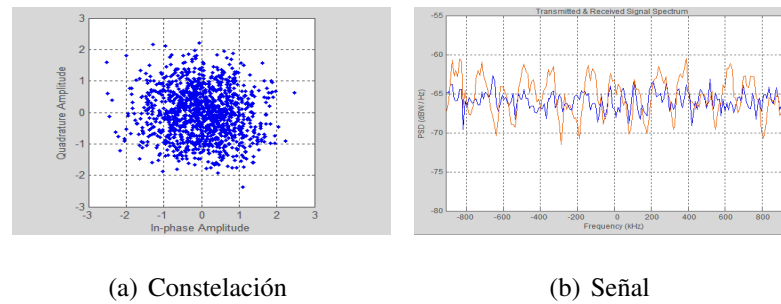


Figura 77: Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Baja Movilidad

Para el caso de alta movilidad el desvanecimiento es variable así como también lo es la frecuencia lo que se observa en la Figura 78, este es el caso más complejo en esta simulación por lo que el receptor necesita realizar mayor procesamiento.

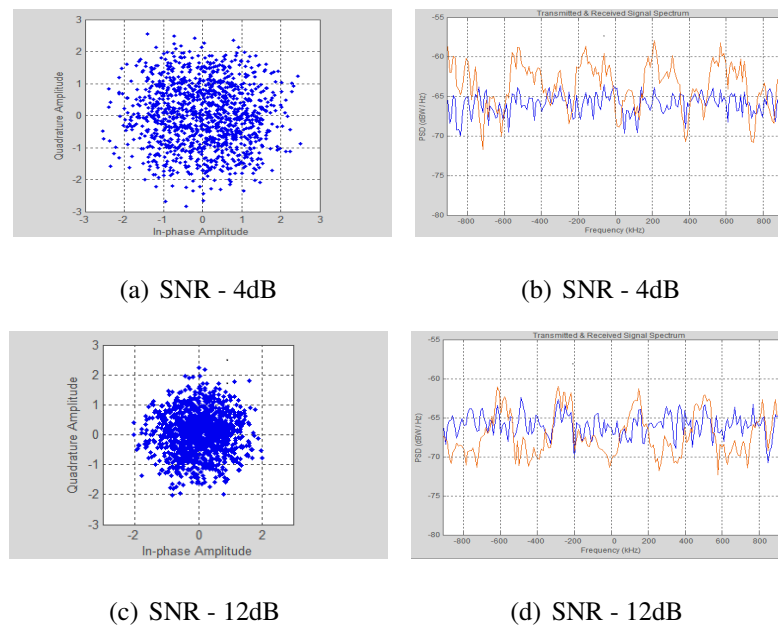


Figura 78: Canal con Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia y Alta Movilidad

5.4 SISO

En las constelaciones que se observan en la Figura 79 se puede notar el trabajo que realiza el ecualizador en este caso uno de tipo ZF, lo que hace es compensar los efectos

del canal con desvanecimiento y el resultado de esto es una constelación más aproximada a la ideal. De igual manera tomando en cuenta el espectro de la señal se nota el mismo efecto como se observa en la Figura 80.

En el canal 1 se muestra la señal enviada, en el canal 2 la señal antes del ecualizador en donde se observa el efecto del desvanecimiento selectivo en frecuencia, mientras que en el canal 3 es la señal que ha sido ecualizada la cual tiene una forma mucho más cercana a la transmitida ya que se mitigaron los efectos del canal.

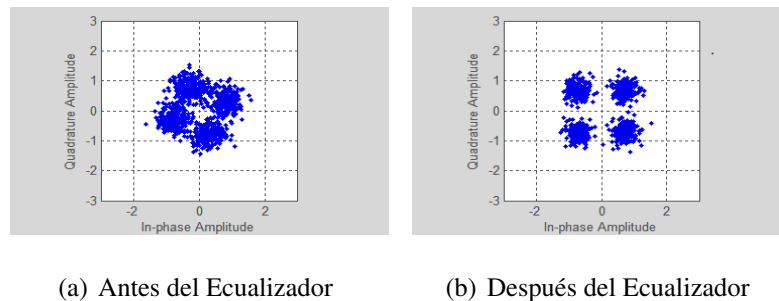


Figura 79: Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Constelación - SISO

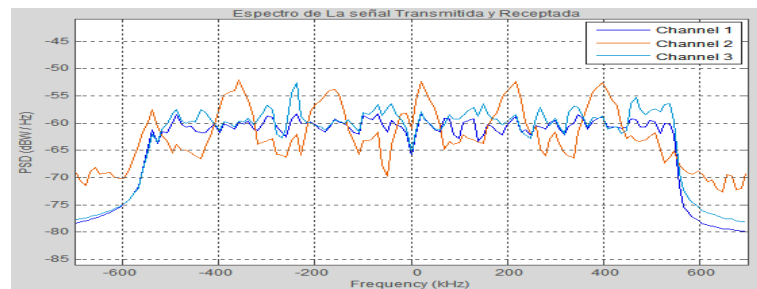


Figura 80: Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Espectro

En la Figura 81 se observa el rendimiento del BER en un modo de transmisión SISO con una tasa de código de 1/3, modulación 64QAM, ancho de banda de 10 MHz lo cual da una tasa máxima de transferencia de 30.58 Mbps según la ecuación descrita en el Capítulo 2. Se puede notar que tiene un desempeño parecido desde 0 a 12dB lo que significa que necesita mayor potencia de transmisión para mejorar el BER.

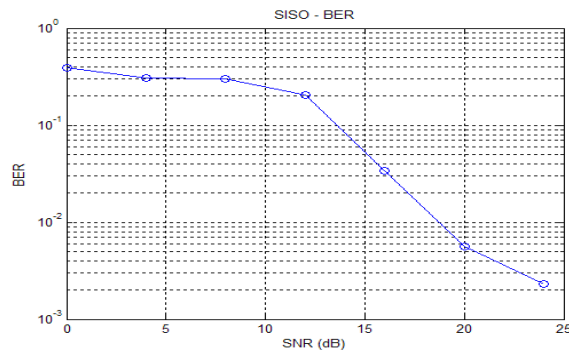


Figura 81: BER SISO con Ecuador

En la Tabla 18 se observa la tasa máxima de transmisión para las diferentes modulaciones y tomando en cuenta el número de símbolos de control, esto para notar el efecto que estos tienen en la transmisión. Tomando de referencia el caso de la modulación QPSK se observa que mientras más símbolos de control se tenga se reduce la tasa de transmisión, pero algo peculiar ocurre con 64QAM y es que al estar ocupando todo el ancho de banda se usa la eficiencia espectral máxima por lo que la velocidad no dependerá de los símbolos de control.

Tabla 18: Tasas de Transmisión - Variando Símbolos de Control - SISO

| AB | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| [MHz] | QPSK | | | 16QAM | | | 64QAM | | |
| 1.4 | 0.56 | 0.47 | 0.46 | 1.14 | 1.01 | 0.94 | 1.80 | 1.80 | 1.80 |
| 3 | 1.50 | 1.29 | 1.25 | 2.89 | 2.63 | 2.34 | 4.58 | 4.58 | 4.58 |
| 5 | 2.52 | 2.17 | 2.13 | 4.91 | 4.35 | 4.01 | 7.74 | 7.74 | 7.74 |
| 10 | 5.08 | 4.39 | 4.32 | 9.91 | 8.76 | 7.99 | 15.26 | 15.26 | 15.26 |
| 15 | 7.63 | 6.71 | 6.58 | 15.26 | 12.96 | 12.73 | 22.92 | 22.92 | 22.92 |
| 20 | 10.30 | 8.76 | 8.76 | 19.85 | 17.57 | 17.22 | 30.58 | 30.58 | 30.58 |

5.5 SIMO

En el caso de SISO se usa una antena de Transmisión y una de Recepción para SIMO se usa igualmente una antena de transmisión y para la recepción se usan 4 antenas por lo que el proceso de recepción es más complejo pero permite tener una señal ecualizada casi igual a la que se transmitió. En la Figura 82 se puede observar la constelación antes y después del ecualizador, para esta simulación se usa una modulación 64QAM.

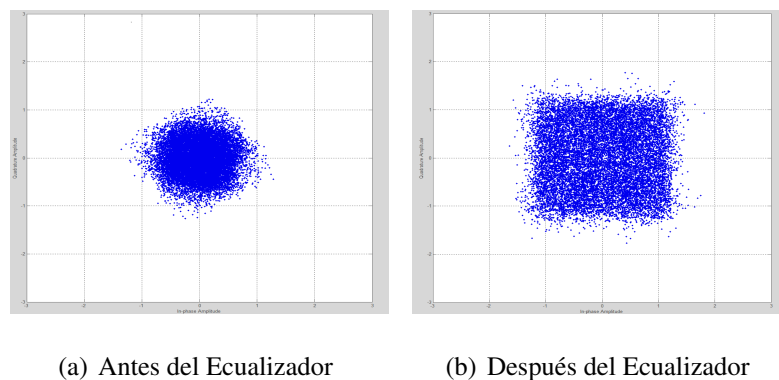


Figura 82: Aplicación del Ecualizador en la Recepción - Constelación - SIMO

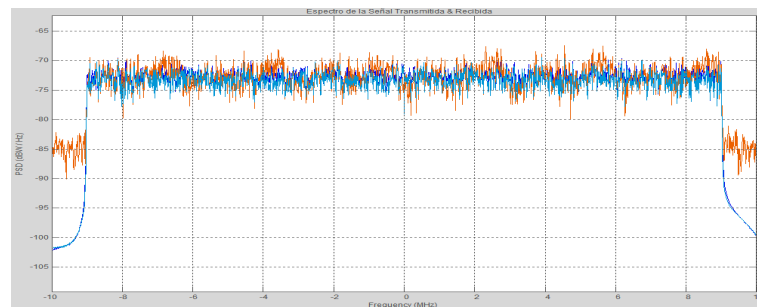


Figura 83: Espectro de la Señal Transmitida y Recibida antes y después del Ecualizador - SIMO

En la Figura 83 a comparación de SISO se puede notar que se ha mitigado al máximo el desvanecimiento del canal por el número de antenas de recepción y esto en conjunto con el ecualizador tenemos una señal casi igual a la que se transmitió, mostrando así el benéfico que brinda MIMO. La señal de color azul es la transmitida,

la de color naranja es antes del ecualizador y la señal celeste es la señal después del ecualizador.

El BER para SIMO se observa en la Figura 84, comparando con el BER de SISO este lo supera ya que en la Figura 81 en 8dB se tiene aproximadamente una probabilidad de error de bit de 10^0 mientras que con SIMO se tiene se aproxima a 10^{-1} y más aún si se toma en consideración en 12 dB no se tiene comparación, comprobando la eficiencia de SIMO.

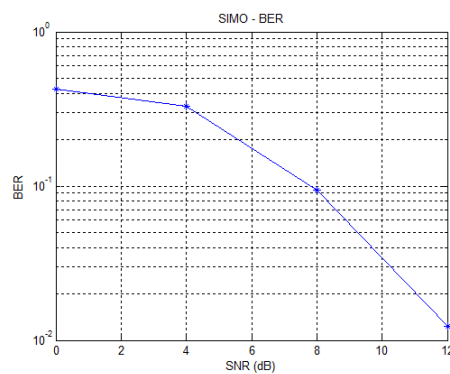


Figura 84: BER - SIMO

5.6 Modos de Transmisión

5.6.1 Modo de Transmisión 2

En la Figura 85 se observa la constelación para una relación señal ruido para 4dB y para 12dB, se nota entonces que la constelación después del ecualizador para el segundo caso tiene un error casi nulo, comprobando una vez más la efectividad del ecualizador en conjunto con el número de antenas de recepción.

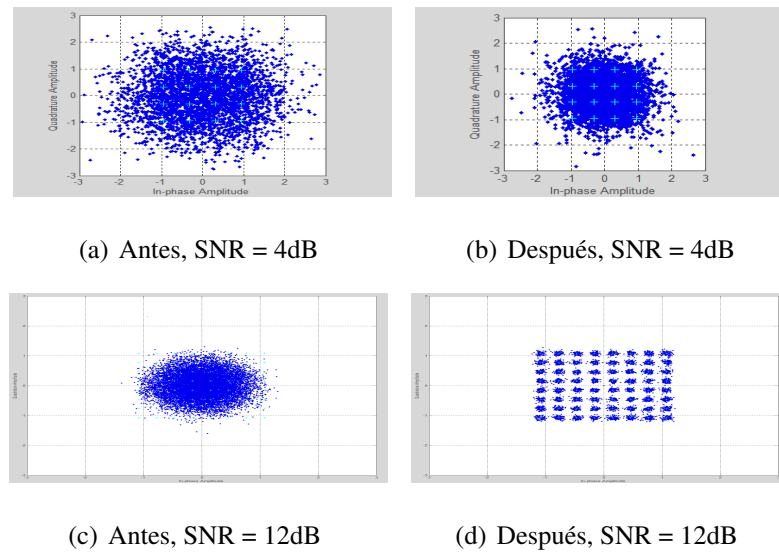


Figura 85: Constelaciones con MIMO 2X2

En la Figura 86 se observa el espectro de los datos obtenidos para una antena con diferente SNR para 4dB y 12dB respectivamente, se muestra la señal antes y después de la ecualización en conjunto con la señal transmitida para poder verificar el correcto funcionamiento, las configuraciones que se usaron para esta simulación son: MIMO - 2X2, Ancho de Banda - 20 MHz, Modulación - 64QAM, Canal - Baja Movilidad y Frecuencia Selectiva y una Tasa de Codificación de 1/2.

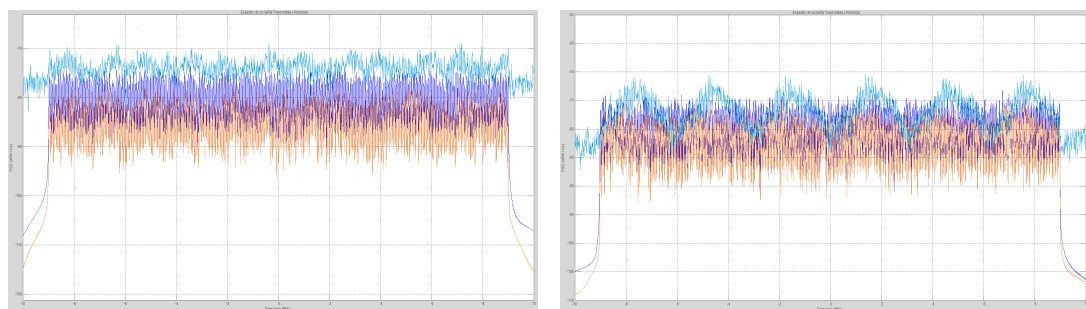
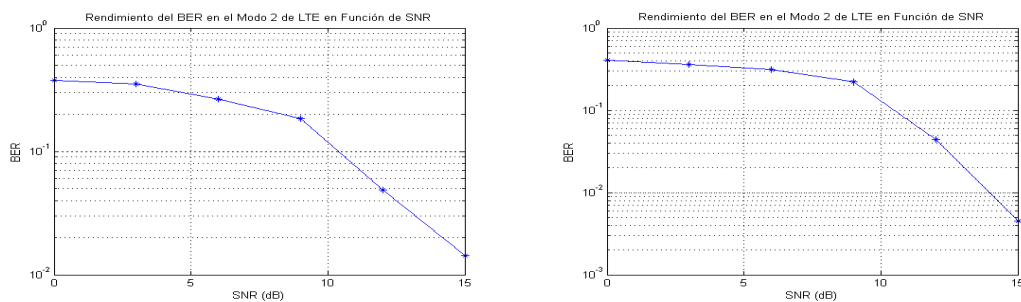


Figura 86: Señal con MIMO 2X2



(a) BER MIMO 2X2

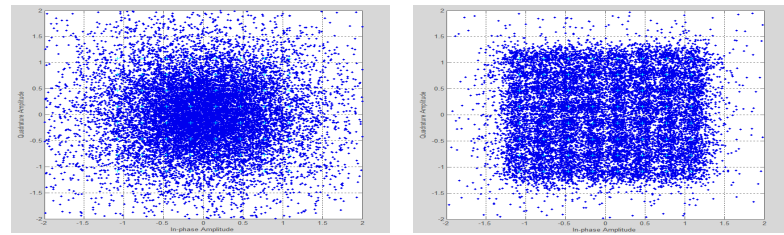
(b) BER MIMO 4X4

Figura 87: Rendimiento del BER en el Modo de Transmisión 2

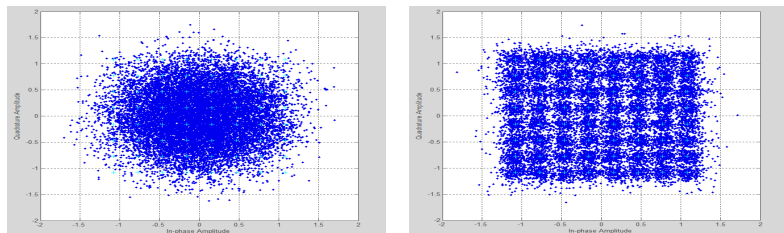
En la Figura 87 se observa el BER tanto para un MIMO de 2X2 como para 4X4 para realizar una comparación en donde se observa que al usar 2 a 4 antenas en modo de transmisión de diversidad se obtiene un mejor resultado al usar más antenas. Algo muy importante de destacar en este análisis es que cuando se tiene un SNR mayor a 9dB el BER disminuye casi a cero, lo que quiere decir se tiene un error mínimo por el uso de MIMO.

5.6.2 Modo de Transmisión 3

Para el modo de transmisión se usa Multiplexación Espacial la cual es una técnica de múltiples antenas que permite a sistemas inalámbricos MIMO obtener una mejor eficiencia espectral dividiendo un flujo de datos en múltiples flujos, estos son modulados independientemente para acomodarlos de tal manera que se aumente la velocidad de transmisión. En la Figura 88 se observa la constelación de las señales recibidas antes y después de pasar por el ecualizador, como se observa se compensa el efecto de desvanecimiento y la constelación recibida se aproxima más a una constelación 64QAM.



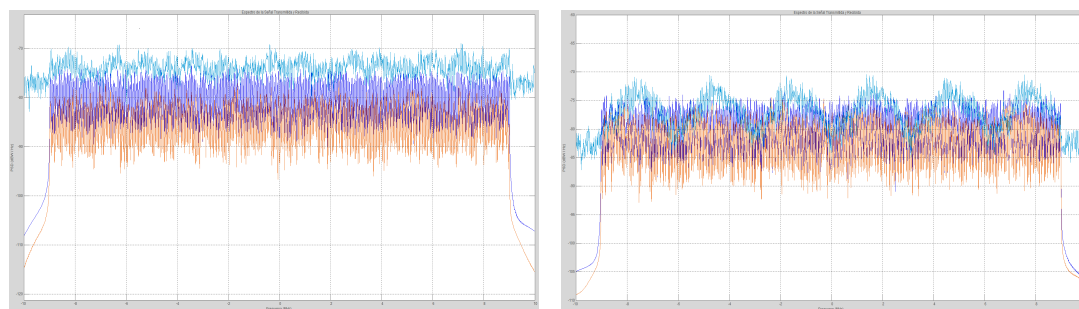
(a) Antes del Ecuador, Antena - 1 (b) Después del Ecuador, Antena - 1



(c) Antes del Ecuador, Antena - 2 (d) Después del Ecuador, Antena - 2

Figura 88: Constelaciones con MIMO 2X2

El espectro que se observa de cada antena muestra la señal transmitida, antes del ecualizador y después del ecualizador, la señal que entra al ecualizador muestra efectos de desvanecimiento selectivo en frecuencia y alta movilidad este es efectivamente ecualizada por la Multiplexación espacial en lazo abierto, mitigando de esta manera los efectos del canal, es por eso que la señal que sale del mismo se asemeja a la señal transmitida, esto se observa en la Figura 89.

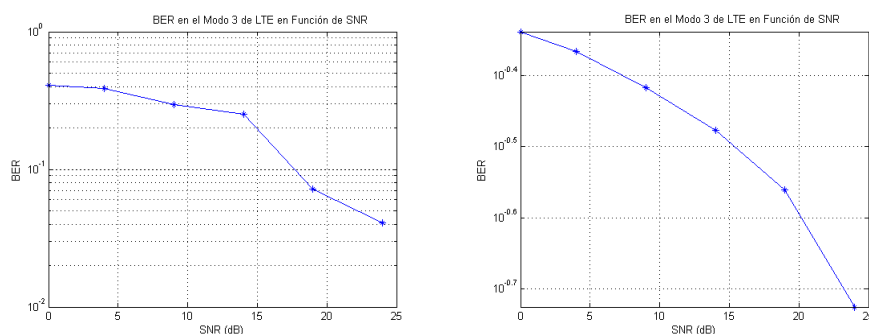


(a) Antes del Ecuador

(b) Después del Ecuador

Figura 89: Espectro de la señal con MIMO 2X2

De igual manera que se hizo para el modo de transmisión 2 se procede a comparar el BER para un MIMO de 2X2 y 4X4, lo que se observa en la Figura 90, estas Figuras son similares ya que la Multiplexación espacial no se enfoca directamente en el rendimiento del BER más bien lo hace en la Tasa de Transmisión.



(a) BER MIMO 2X2

(b) BER MIMO 4X4

Figura 90: BER en el Modo de Transmisión 3

5.6.3 Modo de Transmisión 4

El Modo de Transmisión 4 utiliza el concepto de Multiplexación Espacial solo que para este es en lazo cerrado, los resultados de constelación y del espectro obtenido son similares a los del modo de transmisión 3, pero en donde se nota realmente la mejora en

la implementación de este Modo es en el *Throughput*. En la 91 se observa las gráficas del BER para cuando se usan 2 y 3 símbolos de control permitiendo diferenciar el rendimiento al cambiar este parámetro, al tener más símbolos de control el rendimiento del BER mejora debido a que el momento en que el receptor realiza la estimación de canal y decodificación tiene más datos que ayudan a optimizar este proceso.

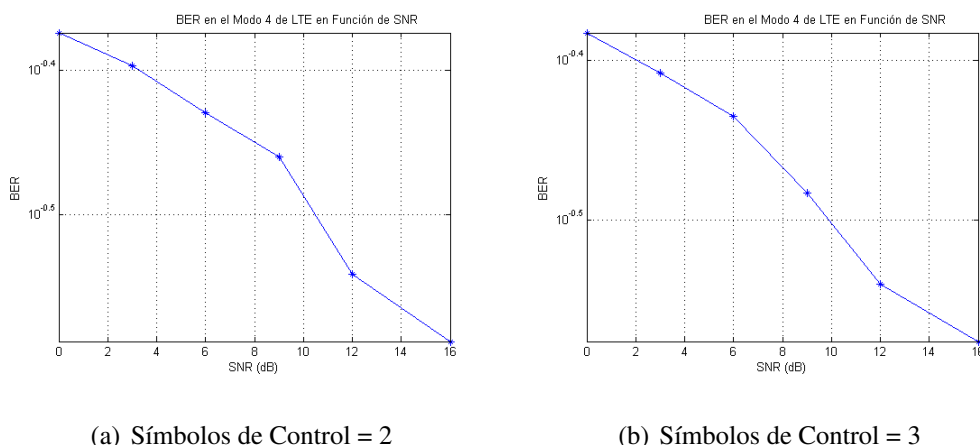


Figura 91: BER en el Modo de Transmisión 4, según los Símbolos de Control

5.7 Adaptación de Enlace con CQI

En la Adaptación de Enlace con el Indicador de Calidad de Canal (CQI) se realiza el cálculo del SINR el cual indica la modulación y la tasa de código que se debe utilizar para la siguiente transmisión de la subtrama con lo cual se logra minimizar la pérdida de información, este indicador está vinculado directamente al índice CQI que se observa en la Figura del SINR en el Capítulo 4. El resultado de este proceso es una modulación adaptativa que permite tener la mejor tasa de transmisión según sea la Relación Señal Ruido del canal. En la Figura 92 se observa el resultado de la simulación con los siguientes parámetros:

- Modo de Transmisión - 4

- MIMO - 2X2
- Ancho de Banda - 20MHz
- Modulación inicial - 64QAM
- Tasa de Código Inicial - 1/2

Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE
Departamento de Electrónica y Electrónica
Modelamiento y Simulación de la Capa Física de la Red LTE (Release 8)
Autor: John Madrigal
Tema: Adaptación de Enlace con CQI (Indicador de Calidad del Canal) para Modulación y Tasa de Código

Información

| Sub Trama | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Modulación | 64QAM | QPSK | 16QAM | 16QAM | 16QAM | 16QAM | 16QAM | 16QAM | 64QAM | 64QAM |
| Tasa de Transmisión Instantánea | 87.9360 | 20.6160 | 56.7048 | 56.7048 | 56.7048 | 56.7048 | 56.7048 | 61.6040 | 78.7040 | 78.7040 |
| Tasa de Transmisión Promedio | 87.9360 | 54.2760 | 55.0896 | 55.4904 | 55.7333 | 55.8952 | 56.0109 | 58.7175 | 59.1804 | 61.1148 |
| Tasa de Modulación Instantánea | 6 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| Tasa de Modulación Promedio | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4.2222 | 4.4000 |
| Tasa de Codificación Instantánea | 0.5000 | 0.3333 | 0.4790 | 0.4790 | 0.4790 | 0.4790 | 0.4790 | 0.6020 | 0.4550 | 0.4550 |
| Tasa de Codificación Promedio | 0.5000 | 0.4167 | 0.4374 | 0.4478 | 0.4541 | 0.4582 | 0.4612 | 0.4788 | 0.4761 | 0.4740 |
| MIMO | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 | 2X2 |
| Bits Procesados | 87936 | 108562 | 165888 | 223224 | 200560 | 337896 | 396232 | 456896 | 535600 | 614304 |
| BER | 0.0884 | 0.0797 | 0.0522 | 0.0388 | 0.0308 | 0.0256 | 0.0219 | 0.0189 | 0.0162 | 0.0141 |
| SINR | 1.7284 | 9.2740 | 9.0140 | 9.4497 | 10.1388 | 10.0897 | 11.3690 | 12.2234 | 12.7022 | 13.8440 |

Activar Visualización

Figura 92: Resultados Adaptación de Enlace con CQI

Como se observa en la Figura 92 la transmisión comienza con una modulación 64QAM y tasa de código de 1/2, se procesa la primera trama y el SINR es de 1.73 con lo cual si revisamos la tabla deberá cambiar a una modulación QPSK y su tasa de código disminuye, la modulación desde la trama dos a la 6 no cambian ya que está en el rango de la modulación 16QAM pero lo que si varía es la tasa de código y así irá revisando sucesivamente los valores del SINR para cambiar estos parámetros. Algo muy relevante es que el BER a pesar de que se cambien cualquiera de estos dos irá disminuyendo ya que el sistema se está ajustando a los mejores parámetros posibles.

En la Figura 93 se observa las constelaciones, al final la simulación se termina con una modulación QPSK, además que el desvanecimiento en el canal es de frecuencia selectiva y alta movilidad por la variación tanto en fase como en cuadratura.

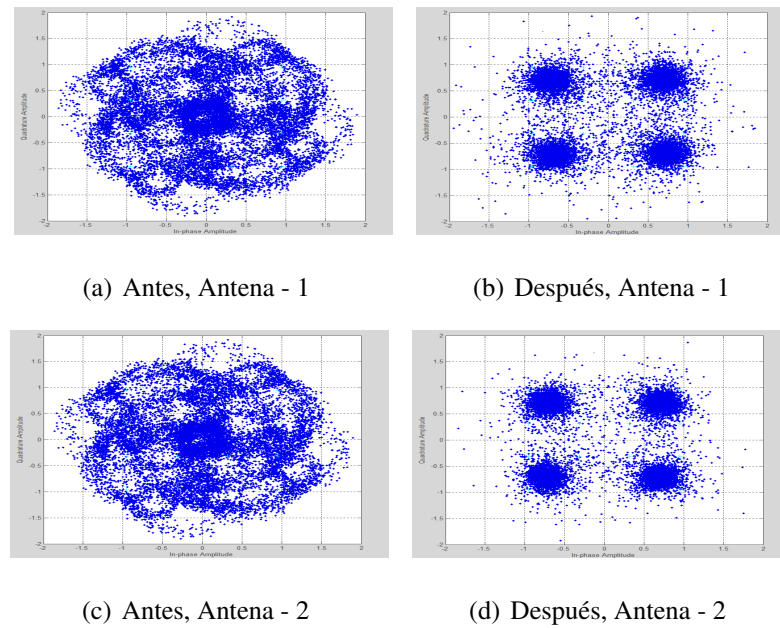


Figura 93: Constelaciones - Adaptación de Enlace

En la Figura 94 se puede ver que la señal recibida que es la de color naranja se asemeja mucho a la señal que fue transmitida esto por el efecto del ecualizador, el número de antenas de recepción y por la adaptación que ha tenido este enlace.

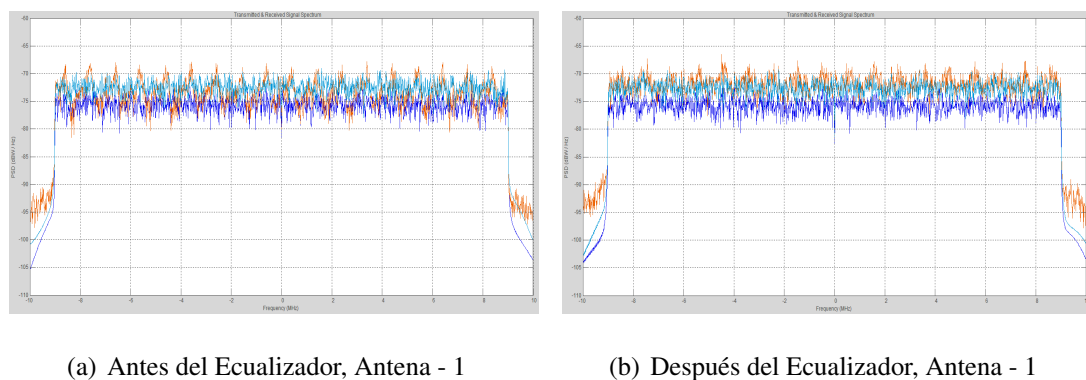


Figura 94: Señales - Adaptación de Enlace

El vector del SINR se muestra en la Figura 95 en donde se encuentran todos los valores que fueron calculados durante la simulación el eje Y representa la amplitud y el eje X representa cada iteración, como un resumen de la tabla de este parámetro se

tiene que cuando el valor esta entre -6.7 y 5.8 se usa una modulación QPSK, entre 5.9-11.6 modulación 16QAM y entre 11.7-22.7 modulación 64QAM, afectando también en la tasa de código lo cual repercute directamente en el *Throughput* Instantáneo del sistema.

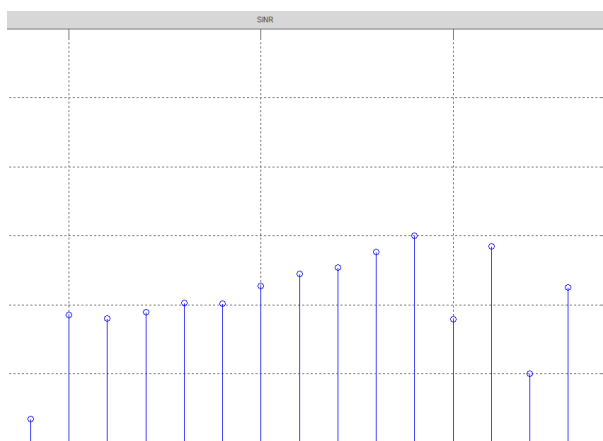


Figura 95: Vector SINR

5.8 Transmisión del Downlink mediante USRP N210

Para la transmisión del enlace de bajada o *downlink* como se mencionó anteriormente se hizo uso del USRP N210 obteniendo los resultados que se verán a continuación. Este equipo al ser relativamente de bajo costo comparado con equipos de telecomunicaciones profesionales tienen filtros que no realizan el tratamiento a la señal como se desearía, es por eso que al momento de transmitir los datos se observará que tienen en la frecuencia central un pico que tiene mayor potencia que el resto de la señal OFDM.

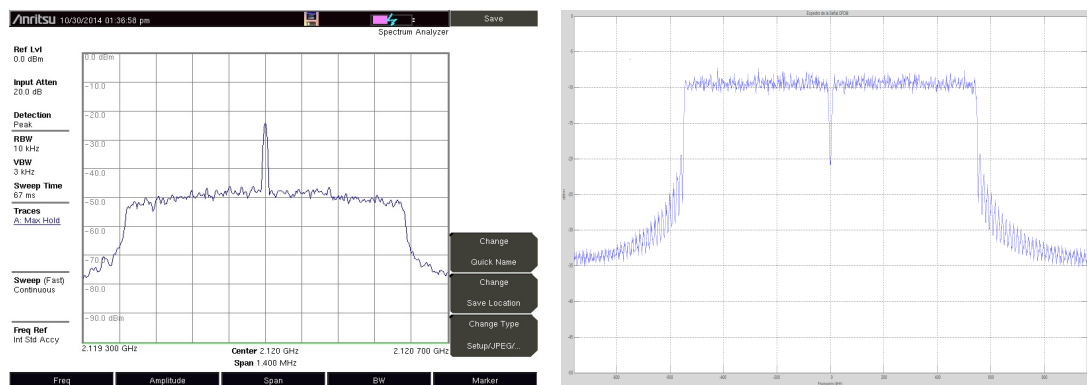
Otro de los problemas al trabajar con estos equipos es que al momento de escoger el valor de interpolación el cual se calcula mediante la Ecuación 5.1 se nota que el resultado es un número decimal lo cual es un problema debido a que el bloque de Simulink para el USRP solo acepta valores enteros, lo que acarrea esto es que el valor de interpolación es el que define el ancho de banda del sistema, por lo que en la trans-

misión se tendrá un error mínimo con respecto a el Ancho de Banda total.

$$\text{Interpolación} = \frac{\text{Frecuencia de muestreo USRP}}{\text{Frecuencia de Muestreo de la Señal}} \quad (5.1)$$

Las Frecuencia de Muestreo del equipo es 100MHz y la frecuencia de muestro de la señal dependerá exclusivamente del ancho de banda de esta.

En la Figura 96 (a) se observa el espectro de la señal transmitida, se nota que tiene un ancho de banda aproximado a los 1.4MHz con lo cual cumple el estándar. De igual manera se muestra el espectro de la señal transmitida (b) que ha sido capturada mediante un analizador de espectros en Simulink.

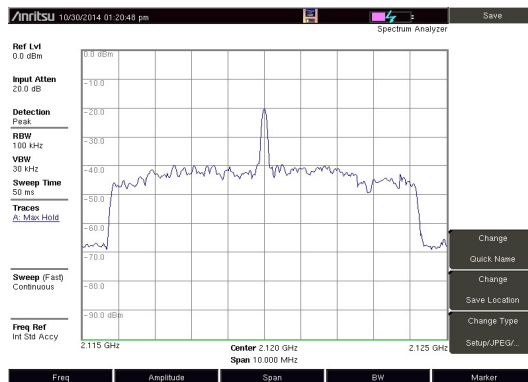


(a) Analizador de Espectros - Anritsu

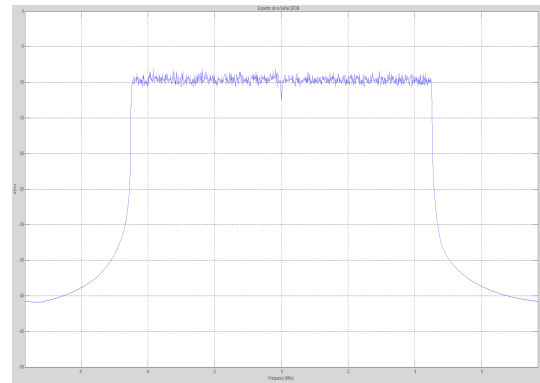
(b) Analizador de Espectros - Simulink

Figura 96: Espectro de la Señal Transmitida Física y de Simulink - 1.4MHz

En la Figura 97 (a) se observa el espectro de la señal de 10MHz con un ancho de banda práctico aproximado de 8.5MHz , dejando una banda de guarda de 1.5MHz y en la Subfigura (b) se muestra el obtenido de Simulink.



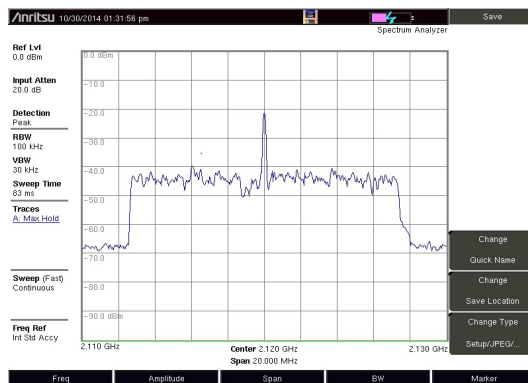
(a) Analizador de Espectros - Anritsu



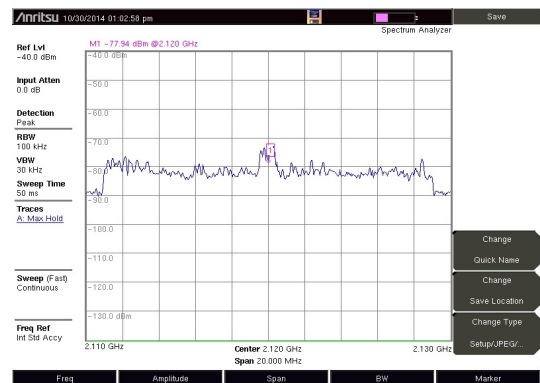
(b) Analizador de Espectros - Simulink

Figura 97: Espectro de la Señal Transmitida Física y de Simulink - 10MHz

Para los 20MHz se hace la comparación con el espectro de la señal obtenida de una estación base eNodeB en las cercanías de los Laboratorios del Departamento de Eléctrica y Electrónica con lo que se observa que el espectro de la señal que se generó es similar a la que está siendo transmitida por un equipo profesional, esto se observa en la Figura 98.



(a) Analizador de Espectros - Anritsu



(b) Analizador de Espectros - Simulink

Figura 98: Espectro de la Señal Transmitida Física por el USRP y un eNodeB - 20MHz

Las potencias de transmisión máximas para los diferentes anchos de banda está en un rango desde -55 a -40 dBm's, siendo la que más potencia tiene la señal de 20 MHz,

esto es debido a que al transmitir más información se necesita que la señal sea más robusta para superar problemas de desvanecimiento e interferencia en el canal.

5.9 Transmisión del Uplink mediante USRP N210

Para el enlace de subida se hizo uso del LTE System Toolbox el cual genera señales de referencia al estándar, estas tienen un tratamiento diferente al que se le dio en el desarrollo del presente trabajo, por lo que al aplicar ganancia para los diferentes anchos de banda se observa que no se tiene problema de la potencia en la frecuencia central. En la Figura 99 se observa el espectro de la señal generada en MATLAB (a) y la señal que fue capturada con el analizador de espectros (b), en donde se nota que el espectro es muy similar pero a diferencia del enlace de bajada la potencia de transmisión disminuye.

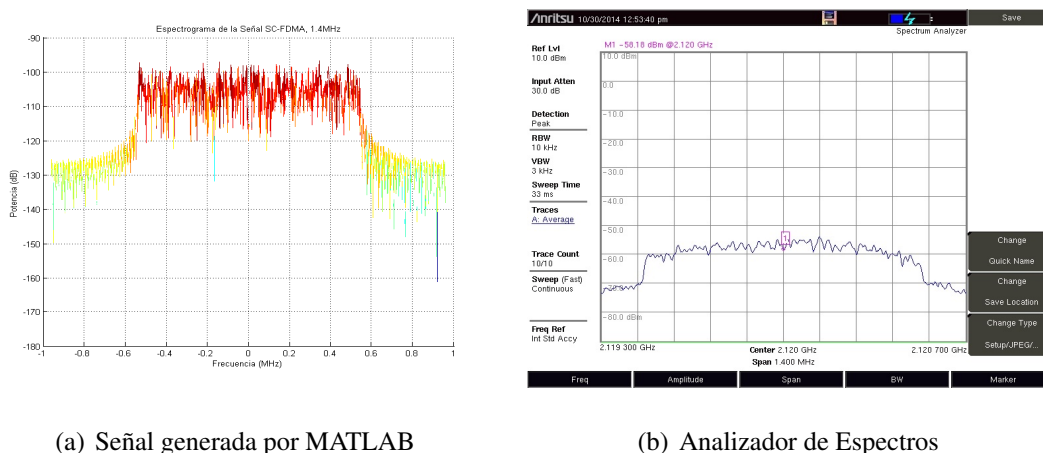


Figura 99: Espectro de la Señal generada en MATLAB y de la señal transmitida

Para observar como es la transmisión de la señal OFDM en el tiempo, frecuencia y potencia se realizó un script, el resultado de este se muestra en la Figura 100. Si se analiza en planos 2D se tendrá en el plano X/Y de la Frecuencia y el Tiempo respectivamente que permite observar el espectro OFDM, mientras que si se ve en el plano

X/Z de la frecuencia y tiempo se observa la malla de recursos.

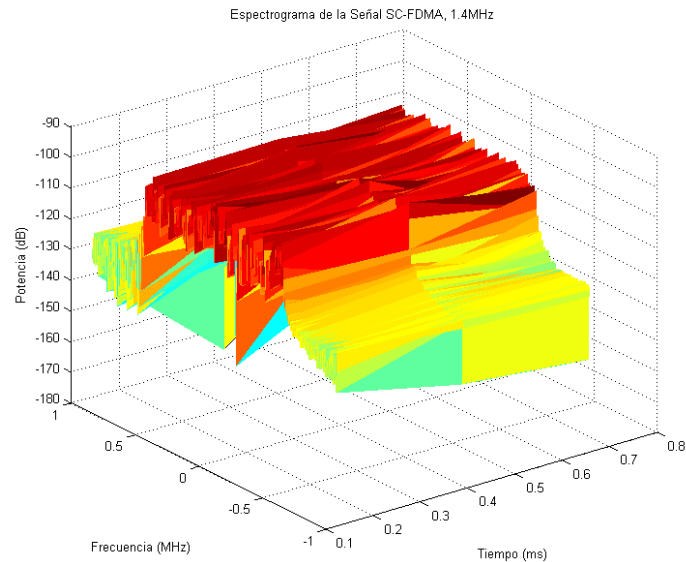


Figura 100: Gráfica en 3D de la Señal a transmitirse.

5.10 Simulación de la Capa Física de LTE (R8)

Como se observó en el Capítulo anterior en el desarrollo de la simulación completa de la Capa Física de LTE se tiene el transmisor, el canal y el receptor. Para la Figura 101 y 102 se ha tomado en cuenta los siguientes parámetros: Modo de Transmisión - 2, MIMO - 2X2, Ancho de Banda - 5MHz, Modulación - 16QAM, Símbolos de Control - 1, Número de Flujo de Datos - 1, Tasa de Código - 4/7, Iteraciones para Turbo - 4, Tipo de Canal - Desvanecimiento Selectivo en Frecuencia, SNR - 5dB, Número de Bits a Transmitir -1×10^6 , Tipo de Ecuación - Zero Forcing ZF.

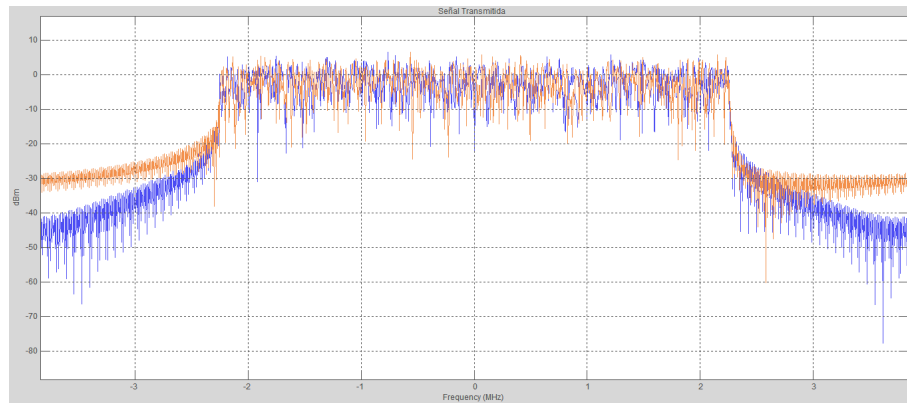


Figura 101: Señal Transmitida - 20MHz

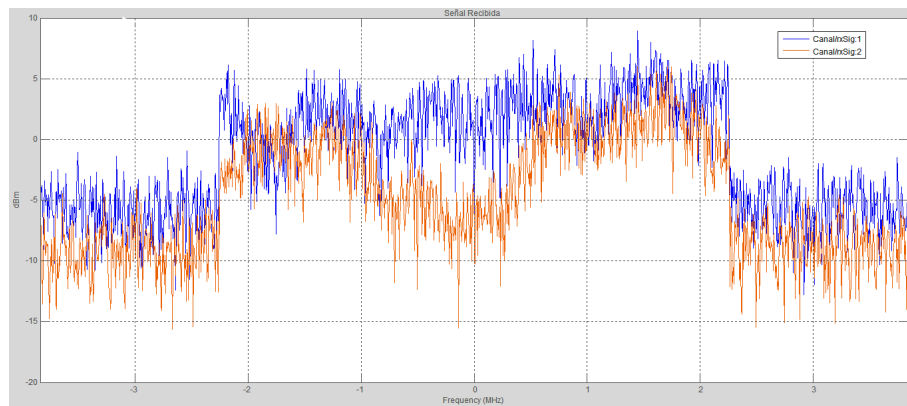


Figura 102: Señal Recibida - 20MHz

Como el resultado de esta simulación se observa el espectro de la transmisión de datos aleatorios en la señal OFDM, como de la recepción de esta después de que ha pasado por un canal con efectos de desvanecimiento de frecuencia selectiva, así como también la tasa de error de bit que en el caso simulado es de 0.1006 con 1.006×10^6 de bits transmitidos. Existen muchas combinaciones que se pueden realizar para simular el sistema y observar su comportamiento las cuales quedan a disposición de los usuarios de esta Plataforma desarrollada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones

Se logró implementar una plataforma amigable al usuario la cual contiene las simulaciones necesarias para la comprensión del funcionamiento de la capa física de LTE (R8) y de esta manera realizar diferentes análisis de los datos y gráficas obtenidas mediante la integración de algoritmos fundamentales en el procesamiento de la información.

Se investigó y analizó las especificaciones técnicas de la capa física de LTE (R8) con lo cual se realizó la implementación de las simulaciones que permiten realizar un análisis completo y fundamentado.

Las gráficas de las modulaciones estructuradas en LTE permiten observar el porque de las tasas de transmisión son elevadas para el sistema LTE, y cual es el efecto la

modulación en el Throughput.

Las señales obtenidas al transmitir mediante el equipo USRP N210 permiten analizar el comportamiento en un entorno real al variar los parámetros de la Capa Física.

Como se observo en el Capítulo 5 el rendimiento para el caso del enlace de bajada es similar al de una estación radio base usada comercialmente, pero con la limitación del los filtros del *USRP*; Mientras que para el enlace de subida se tiene un rendimiento casi igual al de un equipo comercial, lo cual se justifica por el uso del *Toolbox* de LTE de *MATLAB* que usan librerías especiales y de uso específico para generar señales de referencia al estándar, llamadas *Conformance Tests*.

De las codificaciones que se implementaron la que mejor rendimiento respecto a las otras fue la Codificación Turbo, la cual en apenas 1dB tiene un BER de aproximadamente 1×10^{-4} mientras que las otras alcanzan este rendimiento con una Relación Señal/Ruido mas alta.

Las modulaciones ayudan a confirmar la teoría en la cual si tenemos una modulación que use menos símbolos esta será más robusta a las interferencias del canal, para las pruebas realizadas se mantuvo constante la modulación QPSK para de esta manera asegurar que los resultados sean más claros, comprobando el efecto de cambiar el número de decodificaciones, la tasa de código, esto para observar los efectos al cambiar parámetros en las simulaciones y de esta manera definir que configuración es la más efectiva en contra de las interferencias.

Mediante los modos de transmisión se observa como se comportan las señales en un canal, aplicando modelos estadísticos como el EVA o EPA y a su vez modelos teóricos de baja y alta movilidad, con la finalidad de aclarar conceptos inmersos dentro de estos, como el efecto Doppler. Las gráficas del BER a su vez nos permiten concluir

que el modo de transmisión 2 con un MIMO de 4X4 tiene mejor rendimiento que los demás, mientras que en los modos 3 y 4 la velocidad de transmisión se duplica y cuadriplica respectivamente respecto al modo 2.

La adaptación de enlace da una idea clara de como es que LTE logrará mantener esas tasas de transmisión elevadas, mediante el SINR la modulación y la tasa de velocidad se modifica con la finalidad de mantener una tasa de transmisión promedio estable, para que de esta manera el usuario no sienta cortes en la transmisión de su información y de esta manera brindar una mejor experiencia de usuario.

6.2 Recomendaciones

Para realizar el procesamiento de las señales tanto para el enlace de bajada como de subida se debe realizar una revisión bibliográfica extensa de los temas tomados en cuenta en el presente trabajo, debido a la complejidad de estos.

Al realizar la comparación entre el espectro de una señal generada con este software y una con la estación base profesional se debe tomar en cuenta los costos que esto implica, siendo el USRP N210 un equipo de bajo costo respecto a otros equipos de esta índole.

Esta herramienta debe de ser usada en conjunto con la parte teórica de LTE la cual se dicta en la materia de Redes de Nueva Generación en la Universidad, para que de esta manera se tenga un entendimiento y un enfoque mas acertado para comprender el estándar.

6.3 Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se plantea la implementación de los cambios realizados en Releases superiores al 8 de la 3GPP como agregación de portadora y variaciones de OFDM para el enlace de subida. La plataforma es actualizable en este sentido ya que es de código abierto, mas no el software en donde se ejecuta.

Se propone también realizar la implementación de las capas superiores de LTE para tener una comunicación con dispositivos terminales que usen este estándar.

Y finalmente se propone la implementación de un receptor en el cual se pueda observar la información que es transmitida con esta plataforma para la verificación de los parámetros de LTE.

BIBLIOGRAFÍA

- 3GPP. (2011). *Base station (bs) radio transmission and reception*.
- Agilent. (2009). System overview, product development and test challenges..
- Alexander Galvis, L. D. S., Christian Ceballos. (2014). *Sdr: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico*. Retrieved from <http://roboticslab.uc3m.es/publications/Articulo1.pdf>
- Andrés, F. C. (Septiembre de 2008). *Estudio de los efectos del movimiento en señales ofdm*.
- Arias, P. C. Y. (2009). *Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación (Pregrado)*.
- Erik Dahlman, S. P. (2011). *4g lte/lte-advanced for mobile broadband*.
- Etsi ts 136.211. (2010).
- EUIT. (2012). Capa física y planificación en lte..
- GSACOM. (2014a). *Evolution to lte report*.
- GSACOM. (2014b). *Lte rel-12 and beyond*.
- GSACOM. (2014c). *Lte user devices growth*. Retrieved from http://www.gsacom.com/downloads/pdf/lte-user_devices_growth_140714.php4
- Guide, L. (2011). *S1 interface*. Retrieved from <http://lteguide.blogspot.com/2011/11/s1-interface.html>
- Guo, D. (2012). *Multiple-input-multiple-output (mimo) systems*.
- Holma, H., & Toskala, A. (2009). *Lte for umts-ofdma and sc-fdma based radio access*.

John Wiley & Sons.

Holma, H., & Toskala, A. (2011). *Lte for umts: Evolution to lte-advanced*. John Wiley & Sons.

Innovations, T. (2010). Lte in a nutshell. *White Paper*.

John R. Barry, E. A. L. (2003). *Digital communication*.

Khan, F. (2009). *Lte for 4g mobile broadband: air interface technologies and performance*. Cambridge University Press.

Khan, S. (2011). *Lte channel modelling for system level simulations*.

Klein, A., Kaleh, G. K., & Baier, P. W. (1996). Zero forcing and minimum mean-square-error equalization for multiuser detection in code-division multiple-access channels. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 45(2), 276–287.

López, A. M. (2009). Lte/sae, una apuesta segura en la evolución de las redes móviles. *Antena de telecomunicación*(176), 27–31.

Lucent, A. (2010). The lte network architecture. In *The lte network architecture*.

Matlab primer r2014a. (2014).

Myung, H. G. (2008). Technical overview of 3gpp lte. *Polytechnic University of New York*.

Naranjo, F. (2013). *Diseño e implementación de un transmisor y receptor digital utilizando la tarjeta para radio definido por software usrp-n210* (Pregrado).

Narayanan, K. R., & Stuber, G. L. (1997). A novel arq technique using the turbo coding principle. *IEEE Communications Letters*, 1(2), 49–51.

Plan nacional de frecuencias. (4 de Julio del 2012).

Poole, I. (2012). *Lte physical, logical and transport channels*. Retrieved from <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/lte-long-term-evolution/physical-logical-transport-channels.php>

Rappaport, T. S., et al. (1996). *Wireless communications: principles and practice* (Vol. 2). prentice hall PTR New Jersey.

- Research, E. (2014a). *Sbx 400-4400 mhz rx/tx (40 mhz)*. Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/SBX>
- Research, E. (2014b). *Selecting an rf daughterboard*. Retrieved from http://www.ettusresearch.com/content/files/kb/Selecting_an_RF_Daughterboard.pdf
- Research, E. (2014c). *Usrp n200/n210 networked series*. Retrieved from https://www.ettus.com/content/files/07495_Ettus_N200-210_DS_Flyer_HR_1.pdf
- Research, E. (2014d). *Usrp n210*. Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>
- Research, E. (2014e). *Vert900 antenna*. Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/VERT900>
- Rethnakaran, P., H. D. (2003). Orthogonal frequency division multiplexing.
- Rohde, & Schwarz. (2009). *Introduction to mimo* (Rohde & Schwarz, Eds.).
- Rohde, & Schwarz. (Febrero 2014). *Lte transmission modes and beamforming*.
- Simulink*. (2014). Retrieved from <http://www.mathworks.com/products/simulink/>
- Stefania Sesia, M. B., Issam Toufik. (2009). Lte, the umts long term evolution. In *From theory to practice*.
- Sturm, C., Zwick, T., & Wiesbeck, W. (2009). An ofdm system concept for joint radar and communications operations. In *Vtc spring*.
- Telefónica. (2013). *Hacia la 4g de comunicaciones móviles*.
- Usrp n210*. (2014). Retrieved from <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>
- Van de Beek, J.-J., Edfors, O., Sandell, M., Wilson, S. K., & Ola Borjesson, P. (1995). On channel estimation in ofdm systems. In *Vehicular technology conference, 1995 IEEE 45th* (Vol. 2, pp. 815–819).

Visual studio. (2014). Retrieved from <http://www.visualstudio.com/>

Xuan, S. P. G. (2009). Simulink based lte system simulator. In *Simulink based lte system simulator*.

Yong Soo Cho, J. K. (2010). MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB.

Zarrinkoub, H. (2014, Marzo). *Understanding LTE with MATLAB*. (Massachusetts, Wiley)

Zyren, J., & McCoy, W. (2007). Overview of the 3GPP long term evolution physical layer. *Freescale Semiconductor, Inc., white paper*.

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ACTA DE ENTREGA

El presente proyecto fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica, y reposa en los archivos desde:

Sangolquí, _____ .

Elaborado por:

John Alexander Madrigal Ramos

Autoridad:

Ing. Paúl Bernal Oñate
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES